

THE RECORD OF ELECTRICAL AND
COMMUNICATION ENGINEERING CONVERSAZIONE
TÔHOKU UNIVERSITY

Vol. 93 No. 1 July 2024

東北大学電通談話会記録

第 93 卷 第 1 号

令和 6 年 7 月

東 北 大 学

電 氣 通 信 研 究 所

工 学 研 究 科

電気エネルギーシステム専攻

通信工学専攻

電子工学専攻

技術社会システム専攻

情 報 科 学 研 究 科

情報・生命系

医 工 学 研 究 科

医工学専攻

第 93 卷 第 1 号 目 次

令和 5 (2023) 年度学位論文関連短編

論文内容	題	目	第一著者名	指導教員	頁
博士後期課程					
工学研究科					
通信工学専攻					
1.	スピン状態の差分を用いた大規模完全グラフ向け				
	高性能アニーリングプロセッサに関する研究	シン	トツキユ (羽生)	教授	2
2.	3M技術によるデジタルコヒーレント伝送システムの大容量化に				
	関する研究	別府	翔平 (廣岡)	教授	6
電子工学専攻					
3.	ロール・トゥ・ロール式成膜法により作製したCoPtCrグラニューラ型				
	スパッタ磁気テープの高記録密度化に関する研究	立花	淳一 (齊藤)	教授	10
情報科学研究科					
情報基礎科学専攻					
4.	新生児指紋認証に関する研究	幸田	芳紀 (青木)	教授	14
5.	深層学習に基づく医療用超音波画像処理に関する研究	三浦	幹太 (青木)	教授	18
医工学研究科					
医工学専攻					
6.	虚血性心疾患の定量診断を目指した				
	心筋収縮特性の超音波局所計測に関する研究	小原	優 (金井)	教授	22
博士前期課程					
工学研究科					
電気エネルギーシステム専攻					
7.	軟磁性化した負磁歪材料を用いた				
	バイモルフ型振動発電デバイスの開発に関する研究	阿部	宏恒 (石山)	教授	26
8.	ACDCコンバーターにおける交流電圧変動および負荷変動に対する				
	ロバスト性向上技術に関する研究	石川	慧亮 (遠藤)	教授	28
9.	電力設備の部分放電監視用TEVセンサの現場環境下での				
	適用性評価に関する研究	梅村	竜吾 (斎藤)	教授	30
10.	低電力デジタルCIMを用いたBCNNアクセラレータのための				
	差動STT-MRAMに関する研究	王	勇成 (遠藤)	教授	32
11.	広帯域低振幅振動に対応した振動発電機構に関する研究	上倉	拓郎 (石山)	教授	34
12.	DCDCコンバータの小型化・高耐圧化に関する研究	工藤	啓介 (遠藤)	教授	36
13.	物体検出応用に向けた低電力・高速				
	エッジAIプロセッサの構成に関する基礎研究	小林	陸 (遠藤)	教授	38

14.	水素負イオンビーム用光中性化セルの数値解析	佐々木悠介 (安藤)	教授	40
15.	水プラズマを用いたマグネトロンスパッタリングによる推力発生と 小型電気推進機の開発	清水 颯太 (安藤)	教授	42
16.	近傍磁界計測によるノイズ伝搬の可視化に関する研究	菅原 祐介 (石山)	教授	44
17.	磁気ノズルと電子流体の相互作用による推力発生に関する室内実験	角川 颯哉 (安藤)	教授	46
18.	気象予測データに基づく配電用ポリマーがいしの 漏れ電流発生量の評価手法に関する研究	田中 庸介 (斎藤)	教授	48
19.	直交フラックスゲートセンサ方式によるひずみセンサに関する研究	千田 健太 (石山)	教授	50
20.	映像脈波を利用した生体認証に関する基礎的研究	寺井 孝則 (杉田)	教授	52
21.	可視化マップを用いた医用画像診断における 深層学習モデル性能向上に関する研究	水野 泰平 (杉田)	教授	54
22.	GaN on Siパワーデバイスを用いたデータセンター向け 小型・高効率48V降圧コンバータに関する研究	宮崎 俊輔 (遠藤)	教授	56
23.	60kV級CVケーブルにおける水トリー劣化の進行と 劣化診断指標の相関性に関する研究	山田 文斗 (斎藤)	教授	58

通信工学専攻

24.	耐エラー数表現に基づく省エネルギー 不揮発ニューラルネットワークの構成	浅野 健 (羽生)	教授	60
25.	中赤外減衰全反射法による汚水中窒素化合物分析に関する研究	新井 蓮 (松浦)	教授	62
26.	コヒーレントナイキストパルス伝送の長距離化に関する研究	石川 碧人 (廣岡)	教授	64
27.	作詞補助システムのための深層学習を用いた歌詞生成に関する研究	井上 真揮 (伊藤)	教授	66
28.	軽量認証暗号ソフトウェアの実装安全性評価に関する研究	岩佐 大将 (本間)	教授	68
29.	遅延耐性ネットワークの発信ノードにおける 受信信号強度に基づく中継ノード選択に関する研究	上村 優樹 (西山)	教授	70
30.	シリコン光集積回路を用いた量子計算に関する研究	小田川朋史 (山田)	教授	72
31.	再エネ駆動分散型マイクロデータセンタに関する研究	加藤 泰成 (山田)	教授	74
32.	遅延耐性ネットワークにおける移動特性を考慮した クラスタリングに基づく中継端末選択に関する研究	鎌田 峻暉 (西山)	教授	76
33.	ストリーム暗号ハードウェアの安全性評価に関する研究	小林蒼一朗 (本間)	教授	78
34.	28GHz帯光・無線融合フルコヒーレント伝送に関する研究	白幡 晃一 (廣岡)	教授	80
35.	グラフェンチャネルトランジスタのデバイスプロセス高度化と その高感度テラヘルツ波検出への応用に関する研究	関 宏信 (尾辻)	教授	82
36.	RFID部分義歯管理システムに関する研究	高寺 裕二 (末松)	教授	84
37.	中赤外光誘起超音波を用いた生体組織光音響イメージングの研究	田中 望実 (松浦)	教授	86
38.	共通鍵暗号ソフトウェアの深層学習に基づく安全性評価に関する研究	田中 陸真 (本間)	教授	88
39.	双方向DC/DCコンバータによる直流電力交換システムに関する研究	唐 琮顔 (山田)	教授	90
40.	中赤外光音響分光法による血中成分分析の高精度化に関する研究	談 成 (松浦)	教授	92
41.	分散アンテナシステム用再エネ発電電源に関する研究	テイ ウセン (山田)	教授	94
42.	ミリ波DBFアンテナ用デジタルRF送信機の デジタル信号処理実装に関する研究	中村 公紀 (末松)	教授	96
43.	プラズモニク・テラヘルツ電磁波検出素子の高性能化と その高速テラヘルツ無線通信への応用に関する研究	成田 健一 (尾辻)	教授	98
44.	高スループット暗号ハードウェアに対する サイドチャネル解析に関する研究	東 哲平 (本間)	教授	100
45.	機械学習を用いた上りリンク通信方式選択手法に関する研究	福士 凜人 (西山)	教授	102
46.	空中基地局を利用した公平な上りリンク通信のための 速度制御手法と帯域割当手法に関する研究	三井 周 (西山)	教授	104

47. 周期構造リング型光共振器による導波モード共鳴現象に関する研究	室岡 宏彌 (山田 教授)	106
48. InP系光電子融合ダブルミキサトランジスタの高周波動作化と その光-テラヘルツ帯キャリア周波数下方変換応用に関する研究	渡邊 光貴 (尾辻 教授)	108

電子工学専攻

49. 混合変調半導体レーザの周波数チャープ特性に関する研究	浅見 昇輝 (八坂 教授)	110
50. LAPSを組み込んだ電気化学的分極システムの 開発と腐食試験への応用	池田凜太郎 (吉信 教授)	112
51. リンパ球細胞におけるプラズマ促進電気的遺伝子導入法の高品質化	及川 和起 (金子 教授)	114
52. プラズマ合成五酸化二窒素によるアミノ酸の化学修飾機構解明	大場 優人 (金子 教授)	116
53. プラズマCVDによるグラフェンナノリボン量子デバイスの集積化合成	加藤 樹 (金子 教授)	118
54. 双方向超音波加振による正弦変位量のネットワークアナライザを 用いた計測による組織粘弾性特性評価法に関する研究	小松 祐也 (金井 教授)	120
55. 結晶配向面の異なるFe ₄ N薄膜の異常ホール効果	佐藤 崇哉 (角田 教授)	122
56. 電流計測プラットフォームを用いた大容量密度トレンチキャパシタの 統計的計測に関する研究	鈴木 達彦 (黒田 教授)	124
57. グラフェン-流動層界面の電位制御と発電特性	竹谷 透 (齊藤 教授)	126
58. 高解像度軟X線CMOSイメージセンサに向けた 高効率信号読み出し画素技術に関する研究	塚田 一成 (黒田 教授)	128
59. 光負帰還狭線幅半導体レーザの線形周波数掃引幅拡大に関する研究	長久保峻介 (八坂 教授)	130
60. アンモニア触媒合成用Al-Mo-B層状化合物の形成	梨本 一樹 (齊藤 教授)	132
61. 半導体レーザの広帯域・高感度光変調周波数応答評価法に関する研究	野原 友治 (八坂 教授)	134
62. 下腿部慣性センサによる異常歩行評価の 時空間パラメータの簡略的推定法の基礎研究	長谷川真之 (渡邊 教授)	136
63. 流体濃度計測CMOSイメージセンサの高速・高精度化に関する研究	濱谷 碧 (黒田 教授)	138
64. チタン酸化物層によるペロブスカイト太陽電池特性の制御	平井 力 (齊藤 教授)	140
65. 日常歩行モニタリングによる異常運動発生部位の推定に関する基礎研究	松本 優太 (渡邊 教授)	142
66. 不揮発性メモリの統計的特性解析に向けた 抵抗計測プラットフォームに関する研究	光田 薫未 (黒田 教授)	144
67. Fe-Fe ₃ O ₄ ナノ粒子2相集合体におけるFeナノ粒子の分散および 凝集状態と磁化のプロッキング現象	柳田 翔一 (齊藤 教授)	146
68. ガス・ソース気相成長法により製膜された 数分子層二硫化タングステンへのキャリアドーピング	米窪 和輝 (佐藤 教授)	148

技術社会システム専攻

69. 永久磁石を有する直交磁心型可変インダクタに関する研究	会津 翔太 (中村 教授)	150
70. 磁気ギヤードSRモータに関する研究	岩城 圭悟 (中村 教授)	152
71. 洋上風力発電用大型磁気ギヤに関する研究	岡崎 晃洋 (中村 教授)	154
72. 高速スイッチトリラクタンスモータの瞬時トルク制御に関する研究	岡田 篤弥 (中村 教授)	156
73. 集中巻埋込磁石モータの性能向上に関する研究	尾花 輝哉 (中村 教授)	158
74. 電動車両用分布巻埋込磁石モータの性能向上に関する研究	田村 一樹 (中村 教授)	160
75. 小型EV用インホイール・アキシヤルギャップ型SRモータの 駆動領域拡大に関する研究	西海 悠介 (中村 教授)	162

情報科学研究科

情報基礎科学専攻

76. 多視点ステレオのためのNeRFを用いた

- デプスマップ推定の高精度化に関する研究…………… 伊藤慎太郎 (青木 教授) 164
77. 機械学習を用いたボトルネックリンクにおける
 競合フロー推定に関する研究…………… カ タクユウ (長谷川 教授) 166
78. 静脈を考慮した最適肝切除領域推定に関する研究…………… 来栖 弘美 (張山 教授) 168
79. Le Fort I 型骨切り術における骨片位置づけのための
 キャリブレーションフリー磁気式ナビゲーション…………… 近藤 恵休 (張山 昌論) 170
80. OCT画像からの網膜層セグメンテーションに関する研究 …… 近野 翼 (青木 教授) 172
81. 多数の子どもの同時計測可能な無線位置計測システムとその評価…………… 斉藤 涼太 (張山 教授) 174
82. LPWAを用いたネットワーク機器管理における
 コマンドの出現分布に着目した高効率トラヒック圧縮手法…………… 田邊 広大 (長谷川 教授) 176
83. 顔領域のマルチパイオメトリクスに関する研究…………… 外崎 汰斗 (青木 教授) 178
84. 手術ナビゲーションのための超音波画像からの3次元再構成…………… 西田 統尊 (張山 教授) 180
85. 特徴量埋め込みに基づく顔画像非識別化に関する研究…………… 塙 剛生 (青木 教授) 182
86. ダイレクトマッピングに基づくFPGA神経回路シミュレータの
 最適設計に関する研究…………… 原澤 瑞樹 (張山 教授) 184
87. HBM搭載FPGAの高効率メモリアクセスに基づくZipper型
 テンソルネットワーク縮約用アーキテクチャに関する研究…………… 福田 琢朗 (張山 教授) 186
88. ステレオレーダグラマトリに基づく3次元計測に関する研究…………… 山崎 祐輝 (青木 教授) 188

システム情報科学専攻

89. グラフ構造に基づく幸福頂点集合遷移問題の計算複雑性に関する研究…………… 石井 裕 (周 教授) 190
90. パラメタ化文字列照合問題に対する省領域アルゴリズムに関する研究…………… 出口 晴貴 (篠原 教授) 192
91. グラフのトークンシフト問題を解くアルゴリズムに関する研究…………… 伊藤 慎 (周 教授) 194
92. 2つの正規言語を分離する状態数最小の決定性
 シンボリック・オートマトンの質問学習に関する研究…………… 河崎 喜斗 (篠原 教授) 196
93. 順序付き禁止トランジションを持つグラフにおける経路に関する研究…………… 熊倉 航太 (周 教授) 198
94. グラフの点素最短パス遷移に関する研究…………… 斉藤 凜 (伊藤 教授) 200
95. グラフの一般化経路問題に関する研究…………… 鈴木 駿太 (周 教授) 202
96. 集団における模倣学習と言語創発…………… 高田 純弥 (篠原 教授) 204
97. 音響特徴および感性印象が話速知覚に及ぼす影響…………… 玉川 真帆 (坂本 教授) 206
98. 音響特徴と空間特性に基づく聴覚知覚体制化に関する基礎的研究…………… 堀田 堯八 (坂本 教授) 208
99. 深層学習モデルを用いた正中面音像定位手がかりの検討…………… 松岡 広泰 (坂本 教授) 210
100. 正則誘導部分グラフの遷移問題に関する研究 …… 松舘 快 (伊藤 教授) 212
101. パラメタ化文字列に対する圧縮とパターン照合に関する研究 …… 松野 直也 (篠原 教授) 214
102. 格子グラフの巡回セールスマン問題と空間充填曲線に関する研究 …… 三浦 拓弥 (篠原 教授) 216
103. 音像距離知覚要因に着目した聴覚的注意の
 空間特性に関する基礎的研究…………… 森田 爽 (坂本 教授) 218
104. 確率的テンポラルグラフ上のパス問題に関する研究 …… 矢部 博丈 (周 教授) 220

応用情報科学専攻

105. ニューロンが時間履歴項を持つニューラルネットワーク

- リザバーの時系列予測に関する研究…………… 石井 豪 (堀尾 教授) 222
106. 量子アニーリングを用いたキーボード配列の最適化 …… 尾形凜太郎 (田中 教授) 224

107.	耐災害無線LANローミングシステムのための 安全なローカル認証方式に関する研究	菅原 綾人 (菅沼)	教授	226
108.	時空間コンテキスト学習・記憶ニューラルネットワークの 解析と回路実装	辻 孟 (堀尾)	教授	228
109.	MR技術を用いたギター演奏技能育成支援システムに関する研究	吉田 周平 (菅沼)	教授	230

医工学研究科

医工学専攻

110.	非侵襲血中成分分析のための中赤外光熱偏向分光システムの研究	伊藤 大登 (松浦)	教授	232
111.	関節角度と関節剛性の閉ループFES制御の実現性に関する 計算機シミュレーション研究	太田 雄大 (渡邊)	教授	234
112.	FESによる動作補助中の慣性センサを用いた 随意活動度推定に関する基礎研究	鹿野 脩太 (渡邊)	教授	236
113.	リンパ行性薬物送達法を用いた固形腫瘍に対する 放射免疫療法に関する研究	高木 洸樹 (小玉)	教授	238
114.	超音波ビーム焦点内の複数散乱体に対する後方散乱特性を用いた 赤血球集合度評価法に関する研究	武山 莉奈 (金井)	教授	240
115.	頸動脈内腔表面粗さの超音波計測とシステムの設計に関する研究	山根 綾太 (金井)	教授	242

VOL. 93 No. 1

CONTENTS

Summary of Doctor-Course Dissertations '23

Duckgyu SHIN (Supervisor : T. HANYU)	
Study on High-Performance Annealing Processor for Large Fully-Connected Ising Model Based on Differential Stochastic Simulated Annealing	2
Shohei BEPPU (Supervisor : T. HIROOKA)	
Study on Large-Capacity Digital Coherent Transmission Systems with 3M Technologies	6
Junichi TACHIBANA (Supervisor : S. SAITO)	
Study on High Recording Density of CoPtCr Granular Sputtered Magnetic Tape Fabricated by Roll-to-Roll Deposition Method	10
Yoshinori KODA (Supervisor : T. AOKI)	
Newborn Fingerprint Authentication	14
Kanta MIURA (Supervisor : T. AOKI)	
Medical Ultrasound Image Processing Based on Deep Learning	18
Yu OBARA (Supervisor : H. KANAI)	
Ultrasound Local Measurement of Myocardial Contractile Property for Quantitative Diagnosis of Ischemic Heart Diseases	22

Summary of Master-Course Dissertations '23

Hirohisa ABE (Supervisor : K. ISHIYAMA)	
Research on the Development of Bimorph-Type Power Generation Devices Using Soft Magnetized Negative Magnetostrictive Materials	26
Keisuke ISHIKAWA (Supervisor : T. ENDOH)	
A Study on Technology to Improve Robustness of ACDC Converters against AC Voltage Fluctuations and Load Fluctuations	28
Ryugo UMEMURA (Supervisor : H. SAITOH)	
Study on Evaluation of Applicability of TEV Sensor for Monitoring Partial Discharge of Electric Power Facilities under Field Environment	30
Wang YONGCHENG (Supervisor : T. ENDOH)	
Research on Differential-pair-type STT-MRAMs for BCNN Accelerator Based on Low-power Digital CiM Architecture	32
Takuo KAMIKURA (Supervisor : K. ISHIYAMA)	
Vibration power generation system for low-amplitude broadband vibration	34
Keisuke KUDO (Supervisor : T. ENDOH)	
Study on miniaturization and high breakdown voltage of DCDC converters for electric vehicles	36
Riku KOBAYASHI (Supervisor : T. ENDOH)	
Basic Research on Low-Power and High-Speed Edge AI Processor Configuration for Object Detection Applications	38
Yusuke SASAKI (Supervisor : A. ANDO)	
Numerical analysis of photo-neutralization cell for negative hydrogen ion beam	40

Sota SHIMIZU (Supervisor : A. ANDO)	
Thrust Generation Induced by Water-Fueled Magnetron Sputtering Source and Development of a Micro Electric Propulsion Device	42
Yusuke SUGAWARA (Supervisor : K. ISHIYAMA)	
A Study on Visualization of Noise Propagation by Measuring Near Magnetic Field	44
Soya SUMIKAWA (Supervisor : A. ANDO)	
Laboratory experiments on the thrust generation due to the magnetic nozzle and the electron gas.	46
Yosuke TANAKA (Supervisor : H. SAITOH)	
Study on Evaluation Method of Leakage Current Generation of Polymeric Insulators for Distribution Lines Based on Meteorological Forecast Data	48
Kenta CHIDA (Supervisor : K. ISHIYAMA)	
Study on Strain Sensor Based on Orthogonal Fluxgate sensor system	50
Takanori TERAJ (Supervisor : N. SUGITA)	
Fundamental Study on Biometric Identification Using Video Plethysmography	52
Taihei MIZUNO (Supervisor : N. SUGITA)	
Performance Improvement of Deep Learning Model for Medical Image Diagnosis by Using Visual Explanation Maps	54
Shunsuke MIYAZAKI (Supervisor : T. ENDOH)	
Study on Compact and High Efficiency 48V Buck Converter for Data Centers with GaN on Si Power Device.....	56
Fumito YAMADA (Supervisor : H. SAITOH)	
Study on Correlation between Progression of Water Trees Degradation and Degradation Diagnostic Index in 60kV Class XLPE Cable	58
Ken ASANO (Supervisor : T. HANYU)	
Design of an Energy-Efficient Nonvolatile Neural Network Based on Error-Tolerant Data Representation.....	60
Ren ARAI (Supervisor : Y. MATSUURA)	
Measurement of Nitride Concentration in Sewage by Mid-infrared ATR Method	62
Aoto ISHIKAWA (Supervisor : T. HIROOKA)	
Study on Long-Distance Coherent Nyquist Pulse Transmission	64
Masaki INOUE (Supervisor : A. ITO)	
Research of lyrics generation using deep learning for lyric assistance systems	66
Daisuke IWASA (Supervisor : N. HOMMA)	
Side-Channel Security Evaluation of ASCON Software Implementation	68
Masaki UEMURA (Supervisor : H. NISHIYAMA)	
A Study on Relay Node Selection Based on Received Signal Strength at a Source Node in Delay/ Disruption Tolerant Networks	70
Tomofumi ODAGAWA (Supervisor : H. YAMADA)	
Study of Quantum Computing Using a Silicon Integrated Optical Circuit	72
Taisei KATO (Supervisor : H. YAMADA)	
A Study on Renewable Energy Driven Distributed Data Centers	74
Ryoki KAMADA (Supervisor : H. NISHIYAMA)	
A Study on Relay Node Selection Based on Clustering Considering Mobility Characteristics in Delay/Disruption-Tolerant Networks.....	76
Soichiro KOBAYASHI (Supervisor : N. HOMMA)	
Security Evaluation of Stream Cipher Hardware.....	78
Koichi SHIRAHATA (Supervisor : T. HIROOKA)	
Study on Optical and Wireless Linked Fully Coherent Transmission at 28 GHz Band	80
Hironobu SEKI (Supervisor : T. OTSUJI)	
Study on advanced device/process technology for graphene-channel transistors and their applications to highly sensitive terahertz detection	82

Yuji TAKATERA (Supervisor : N. SUEMATSU)	
A Study on Partial Denture Management RFID System	84
Nozomi TANAKA (Supervisor : Y. MATSUURA)	
A Study on Photoacoustic Imaging of Bio-tissue by Ultrasound Induced by Mid-infrared Light	86
Rikuma TANAKA (Supervisor : N. HOMMA)	
Deep-Learning based Security Evaluation of Symmetric Cipher Software	88
Qiongyan TANG (Supervisor : H. YAMADA)	
Research on DC Power Exchange Systems Using Bidirectional DC/DC Converters	90
Cheng TAN (Supervisor : Y. MATSUURA)	
High-Precision Analysis of Blood Components Using Mid-Infrared Photoacoustic Spectroscopy	92
Yuxuan DING (Supervisor : H. YAMADA)	
Research on renewable energy-based power sources for distributed antenna systems	94
Kouki NAKAMURA (Supervisor : N. SUEMATSU)	
A Study on Digital Signal Processing Implementation for Millimeter-Wave DBF Antenna Digital RF Transmitter	96
Kenichi NARITA (Supervisor : T. OTSUJI)	
Study on High Performance Terahertz Plasmonic Detectors and their Application to High-Speed Terahertz Wireless Communication	98
Teppei HIGASHI (Supervisor : N. HOMMA)	
A Study on Side-Channel Attacks for Unrolled Implementation of Block Ciphers	100
Rinto FUKUSHI (Supervisor : H. NISHIYAMA)	
A Study on Uplink Communication Scheme Selection Technique Using Machine Learning	102
Shu MITSUI (Supervisor : H. NISHIYAMA)	
A Study on Speed-Control and Bandwidth Allocation Methods for Achieving Fair Uplink Communications Using an Aerial Base Station	104
Koya MUROOKA (Supervisor : H. YAMADA)	
Research on waveguide mode resonance phenomena in periodically structured ring optical resonators	106
Mitsuki WATANABE (Supervisor : T. OTSUJI)	
Study on High-Frequency Operation of InP-Based Optoelectronic Double-Mixer Transistors and their Application to Optical-to-THz Carrier Frequency Down-Conversion	108
Shoki ASAMI (Supervisor : H. YASAKA)	
Study on Modulation Chirp Characteristics of Hybrid Modulation Semiconductor Laser	110
Rintaro IKEDA (Supervisor : T. YOSHINOBU)	
Development of an Electrochemical Polarization System Incorporating LAPS and Its Application to Corrosion Testing	112
Kazuki OIKAWA (Supervisor : T. KANEKO)	
Quality Improvement in Plasma-Enhanced Electro-Transfection into Lymphocyte Cells	114
Yuto OBA (Supervisor : T. KANEKO)	
Elucidation of Chemical Modification of Amino Acids Induced by Plasma-Synthesized Dinitrogen Pentoxide	116
Tatsuki KATO (Supervisor : T. KANEKO)	
Integrated Synthesis of Graphene Nanoribbon Quantum Devices by Plasma CVD	118
Yuya KOMATSU (Supervisor : H. KANAI)	
A Study on Evaluation Method of Viscoelastic Properties of Biological Tissues by Measuring Sinusoidal Displacements Generated by Dual Ultrasound Excitation Using a Network Analyzer	120
Takaya SATO (Supervisor : M. TSUNODA)	
Anomalous Hall Effect of Fe ₄ N Thin Films with Different Crystallographic Orientations	122
Tatsuhiko SUZUKI (Supervisor : R. KURODA)	
A Study on Statistical Measurements of High Capacitance Density Trench Capacitors Using Current Measurement Platform	124

Toru TAKEYA (Supervisor : S. SAITO)	
Potential Control of Boundary between Graphene and Flowing Water and Output Performance	126
Issei TSUKADA (Supervisor : R. KURODA)	
A Study on Highly Efficient Signal Readout Pixel Technology for High-Resolution Soft X-ray CMOS Image Sensors	128
Shunsuke NAGAKUBO (Supervisor : H. YASAKA)	
Study on Linear Frequency Sweep Range Expansion of Optical Negative Feedback Narrow Linewidth Semiconductor Laser	130
Kazuki NASHIMOTO (Supervisor : S. SAITO)	
Fabrication of Al-Mo-B Layered Compounds for Catalysts of Ammonia Synthesis	132
Tomoharu NOHARA (Supervisor : H. YASAKA)	
Study on Wide-Bandwidth and High-Sensitivity Measurement Technique of Optical Modulation Response	134
Sanayuki HASEGAWA (Supervisor : T. WATANABE)	
A Basic Study on Simplified Estimation Method of Spatio-Temporal Parameters for Abnormal Gait Assessment Using Lower Leg IMUs	136
Aoi HAMAYA (Supervisor : R. KURODA)	
A Study on Speed and Precision Improvements of CMOS Image Sensors for Fluid Concentration Measurements	138
Chikara HIRAI (Supervisor : S. SAITO)	
Controlling Perovskite Solar Cells Characteristics by Titanium Oxide Layers	140
Yuta MATSUMOTO (Supervisor : T. WATANABE)	
A Basic Study on Estimation of Position Causing Abnormal Movement by Daily Gait Monitoring	142
Hidemi MITSUDA (Supervisor : R. KURODA)	
A Study on Resistance Measurement Platform for Statistical Characterization of Nonvolatile Memory Materials	144
Shoichi YANAGITA (Supervisor : S. SAITO)	
Dispersion and aggregation states of Fe nanoparticles and magnetization blocking phenomena in Fe-Fe ₃ O ₄ nanoparticle 2-phase assemblies	146
Kazuki YONEKUBO (Supervisor : S. SAITO)	
Doping of Few Molecular Layer Tungsten Disulfide Grown by Gas-source Chemical Vapor Deposition	148
Shota AIZU (Supervisor : K. NAKAMURA)	
A Study of Orthogonal-Core-type Variable Inductor with Permanent Magnets	150
Keigo IWAKI (Supervisor : K. NAKAMURA)	
A Study of Magnetic-g geared SR motor	152
Akihiro OKAZAKI (Supervisor : K. NAKAMURA)	
A Study of Large-scale Magnetic Gear for Offshore Wind Power Generation	154
Atsuya OKADA (Supervisor : K. NAKAMURA)	
A Study of Instantaneous Torque Control Method for High-Speed Switched Reluctance Motor	156
Teruya OBANA (Supervisor : K. NAKAMURA)	
A Study of Performance Improvement of Concentrated-Winding Interior Permanent Magnet Motor	158
Kazuki TAMURA (Supervisor : K. NAKAMURA)	
A Study of Performance Improvement of Distributed Winding Interior Permanent Magnet Motor for Electric Vehicle	160
Yusuke NISHIGAI (Supervisor : K. NAKAMURA)	
A Study of Drive Range Expansion of In-Wheel Axial-Flux SR Motor for Compact EV	162

Shintaro ITO (Supervisor : T. AOKI)	
Accuracy Improvement of Depth Map Estimation Using NeRF for Multi-View Stereo	164
Zeyou XIA (Supervisor : G. HASEGAWA)	
Machine learning-based estimation of the number of competing flows at a bottleneck link	166
Hiroimi KURUSU (Supervisor : M. HARIYAMA)	
Research on Optimal Estimation of Resected Regions Considering Hepatic Veins	168
Ekyu KONDO (Supervisor : M. HARIYAMA)	
Calibration-free Electromagnetic Navigation System for maxillary positioning in the Le Fort I osteotomy	170
Tsubasa KONNO (Supervisor : T. AOKI)	
Retinal Layer Segmentation from OCT Images	172
Ryota SAITO (Supervisor : M. HARIYAMA)	
A system to measure locations of many children wirelessly and Its Evaluation	174
Kodai TANABE (Supervisor : G. HASEGAWA)	
An Efficient Traffic Compression Method for Remote Network Management over LPWA based on Command Appearance Distribution	176
Taito TONOSAKI (Supervisor : T. AOKI)	
Multibiometrics for Facial Area	178
Michitaka NISHIDA (Supervisor : M. HARIYAMA)	
3D Reconstruction from Ultrasound Images for Surgery Navigation	180
Goki HANAWA (Supervisor : T. AOKI)	
Face Image De-identification Based on Feature Embedding	182
Mizuki HARASAWA (Supervisor : M. HARIYAMA)	
Architecture of an FPGA-Based Brain Neural Network Simulator Using Direct Mapping	184
Takuro FUKUDA (Supervisor : M. HARIYAMA)	
A Study on Architecture for Zipper-type Tensor Network Shrinkage Based on Highly Efficient Memory Access in HBM-equipped FPGAs	186
Yuki YAMASAKI (Supervisor : T. AOKI)	
3D Measurement Based on Stereo Radargrammetry	188
Yutaka ISHII (Supervisor : X. ZHOU)	
The Complexity of the Happy Set Reconfiguration Problem Based on Graph Structures	190
Haruki IDEGUCHI (Supervisor : A. SHINOHARA)	
Efficient Parameterized Pattern Matching in Sublinear Space	192
Shin ITO (Supervisor : X. ZHOU)	
Algorithms for Token Shifting Problem on Graphs	194
Yoshito KAWASAKI (Supervisor : A. SHINOHARA)	
Query Learning of Minimal Deterministic Symbolic Finite Automata Separating Two Regular Languages	196
Kota KUMAKURA (Supervisor : X. ZHOU)	
On the Routing Problems in Graphs With Ordered Forbidden Transitions	198
Rin SAITO (Supervisor : T. ITO)	
A Study for Reconfiguring Vertex-disjoint Shortest Paths on Graphs	200
Shunta SUZUMURA (Supervisor : X. ZHOU)	
Computational Complexity of General Routing Problem on Graphs	202
Junya TAKADA (Supervisor : A. SHINOHARA)	
Imitation Learning in Populations and Language Emergence	204
Maho TAMAKAWA (Supervisor : S. SAKAMOTO)	
Effect of Acoustic Characteristics and Affective Factors	206
Takaya HOTTA (Supervisor : S. SAKAMOTO)	
A Fundamental Study on Auditory Perceptual Organization based on Acoustic Features and Spatial characteristics	208

Hiroyasu MATSUOKA (Supervisor : S. SAKAMOTO)	
Research on perceptual cues for median plane sound localization using deep learning models	210
Kai MATSUDATE (Supervisor : T. ITO)	
A Study on Reconfiguration Problems of Regular Induced Subgraphs	212
Naoya MATSUNO (Supervisor : A. SHINOHARA)	
Compression and Pattern Matching for Parameterized String	214
Takumi MIURA (Supervisor : A. SHINOHARA)	
Research on the traveling salesman problem on lattice graphs and space-filling curves	216
So MORITA (Supervisor : S. SAKAMOTO)	
Basic study on the spatial characteristics of auditory attention considering perceptual cues of auditory distance.	218
Hirotake YABE (Supervisor : X. ZHOU)	
The Path Problem on Stochastic Graphs	220
Go ISHII (Supervisor : Y. HORIO)	
Time Series Prediction in Neural Network Reservoir Consists of Neurons with Local Temporal History	222
Rintaro OGATA (Supervisor : K. TANAKA)	
Keyboard Layout Optimization by Quantum Annealing.....	224
Ayato SUGAHARA (Supervisor : T. SUGANUMA)	
Secure Local Authentication Method for Disaster-tolerant Wireless LAN Roaming Systems	226
Takeru TSUJI (Supervisor : Y. HORIO)	
Analysis and Circuit Implementation of Spatiotemporal Contextual Learning and Memory Neural Networks.....	228
Shuhei YOSHIDA (Supervisor : T. SUGANUMA)	
A Study on Support System for Guitar Performance Training Using MR Technology	230
Hiroto ITO (Supervisor : Y. MATSUURA)	
Mid-Infrared Photothermal Deflection Spectroscopy System for Non-Invasive Blood Component Analysis	232
Yudai OHTA (Supervisor : T. WATANABE)	
A Computer Simulation Study on the Feasibility of Closed-Loop FES Control of Joint Angles and Joint Stiffness	234
Shuta KANO (Supervisor : T. WATANABE)	
A Basic Study on Estimation of Voluntary Activity Level Using Inertial Sensors during Movement Assistance by FES	236
Koki TAKAGI (Supervisor : T. KODAMA)	
A Study of Radioimmunotherapy for Solid Tumors Using Lymphatic Drug Delivery System	238
Rina TAKEYAMA (Supervisor : H. KANAI)	
Evaluation Method of Red Blood Cell Aggregation Using Backscattering Properties for Numerous Scatterers in Focal Region of Ultrasound Beam	240
Ryota YAMANE (Supervisor : H. KANAI)	
A Study on Designing of Ultrasonic Measurement System of Luminal Surface Roughness on Carotid Artery	242

令和 5 (2023) 年度学位論文関連短編

Doctor's Thesis Abstract (March 2024)

スピン状態の差分を用いた大規模完全グラフ向け
高性能アニーリングプロセッサの研究

シン トツキュ

指導教員：羽生 貴弘， 研究指導教員：鬼沢 直哉

Study on High-Performance Annealing Processor for Large Fully-Connected
Ising Model Based on Differential Stochastic Simulated Annealing

Duckgyu SHIN

Supervisor: Takahiro HANYU, Research Advisor: Naoya ONIZAWA

In this paper, we introduce a differential stochastic simulated annealing algorithm (DSSA) for implementing a large and fully-connected annealing processor. The DSSA algorithm reduces a hardware area, which is caused by a fully-connected spin connections, by serializing spin-to-spin interactions. The proposed algorithm utilizes differentials generated from flipped spins to reduce unnecessary calculations, thereby mitigating the increase in annealing time caused by serialization. A fully-connected 2,048-spin annealing processor based on DSSA is synthesized using TSMC 28 nm process, which results in the power consumption is 316.1 mW and the clock frequency of 500 MHz. For evaluation, the proposed DSSA algorithm and DSSA processor are applied for solving 2K-spin maximum cut problems, such as K2000. Compared with a conventional SSA, the DSSA algorithm achieves the near optimal solution for K2000 with the 15.9 times faster annealing time. Furthermore, the proposed annealing processor achieves a near-optimal solution for K2000 with 3.5 times greater energy efficiency compared to a state-of-the-art annealing processor.

1. Introduction

Combinatorial optimization problems (COPs) serve as effective approaches to finding optimal solutions for various real-world challenges, such as stock trading decision, path finding of robots, or very-large-scale-integrated (VLSI) design. The COPs are often classified as NP-hard problems, making stochastic methods a necessity for their resolution. Simulated annealing (SA) [1] is a well-known probabilistic algorithm for tackling COPs, and stands as a potential candidate for solving the NP-hard COPs. However, as the size of the COP grows, the time required for the SA algorithm to converge to an optimal or near-optimal solution also increases exponentially. To address this issue, annealing hardware based on application-specific integrated circuit (ASIC) or field programmable gate array (FPGA) have emerged. Furthermore, non-conventional computing methods have been explored to accelerate the annealing process, such as quantum annealing (QA), a magnetic tunnel junction (MTJ) based model, or stochastic simulated annealing (SSA) [2].

SSA is an annealing algorithm designed for Ising

models converted from the COPs. The Ising models consist of Ising spins with binary states, and their interconnected weights. Implementation of the Ising spins is accomplished using spin-gates based on stochastic computing (SC). SSA has been evaluated using various COPs, consistently achieving near-optimal solutions. For instance, SSA successfully solved the 2K-spin COP, achieving the best-known solution for a K2000 maximum cut problem [3].

In this paper, we propose a differential stochastic simulated annealing (DSSA) to realize a fully-connected annealing hardware capable of handling a large number of spins. DSSA effectively reduces the hardware area, resulting from the fully-connected topology, by serializing spin connections. While serialization generally poses a trade-off between hardware area and computation time. DSSA mitigates the increase in computation time by using spin state differentials.

2. Annealing Algorithm and Its Principles

COPs are often effectively tackled using the Ising model in conjunction with SA. The Ising model is a

network model composed of Ising spins and their interconnections. Each Ising spin, denoted as σ_i , possesses a binary state, either $\{-1, +1\}$, accompanied by a bias term h_i . These spins are interconnected through weights, J_{ij} . An energy of the Ising model, Hamiltonian, is defined by:

$$H = -\sum_i \sigma_i h_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \sigma_i \sigma_j J_{ij}. \quad (1)$$

The optimal solution of the given COP is embedded into the global minimum of the Hamiltonian.

SSA is an annealing algorithm based on SC. SSA can be implemented using CMOS circuits. SSA has demonstrated faster and more accurate performance compared to traditional Simulated Annealing (SA) methods across various Combinatorial Optimization Problems (COPs). The spin operations of SSA are defined by the following equations.

$$I_i(t+1) = h_i + \sum_j J_{ij} \sigma_j(t) + n_{rnd} \cdot r_i(t), \quad (2)$$

$$\text{Itanh}_i(t+1) =$$

$$\begin{cases} I_0 - 1 & \text{if } I_i(t+1) + \text{Itanh}_i(t) \geq I_0, \\ -I_0 & \text{if } I_i(t+1) + \text{Itanh}_i(t) < -I_0, \\ I_i(t+1) & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3)$$

$$\sigma_i(t+1) = \begin{cases} +1 & \text{if } \text{Itanh}_i(t+1) \geq 0, \\ -1 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (4)$$

where n_{rnd} is a magnitude of noise signals, $r_i(t)$ is the random noise signal, $I_0(t)$ is pseudo inverse temperature, and t is an annealing step.

3. Stochastic Simulated Annealing (SSA) Hardware

Based on SSA, an annealing hardware with 800 spins is implemented on FPGA. Fig. 1 shows the architecture of the SSA hardware. The Spin-gate array is the main component of the hardware and is composed of spin-gates. The spin-gates in the SSA hardware are connected to 8 neighborhood spins. The random number generator (RNG) for the stochastic behavior of spins generates 800-bit random signals. The controller manages hardware control, inverse temperature parameter generation, and the BRAM stores the annealing results. The 800-spin SSA hardware achieves the near optimal solution for G11, which is an 800-node maximum cut problem (MAXCUT), with the annealing time of 1.0 ms. Compared to IPAPT annealing hardware [4], the SSA hardware achieves almost equivalent solutions for G11 with the 2.64 times annealing time.

4. Differential Stochastic Simulated Annealing (DSSA) Algorithm

An annealing processor for the large Ising model with the complete topology faces an exponential increase in the area of wiring and computational units required for spin connections. Serialization is a common technique for reducing hardware area. However, serialization involves a trade-off between hardware area and computation time. Serialization causes the increase in the number of clock cycles for spin connection calculations. To mitigate the escalation in computation time, the proposed differential stochastic simulated annealing (DSSA) algorithm employs spin state differentials. The spin operations of DSSA are defined

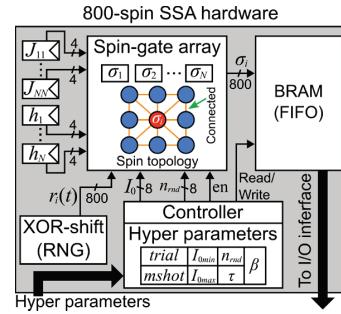


Fig. 1 Architecture of 800-spin SSA hardware.

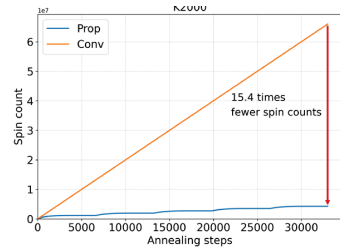


Fig. 2 Comparisons of the number of clock cycles of DSSA and serialized SSA for G27.

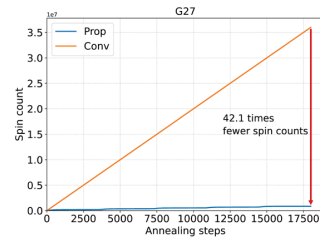


Fig. 3 Comparisons of the number of clock cycles of DSSA and serialized SSA for K2000.

by:

$$\Delta_j(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } \sigma_j(t) \neq \sigma_j(t-1) \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (5)$$

$$\Delta I_i(t+1) = 2 \sum_j J_{ij} \sigma_j(t) \Delta_j(t) + n_{rnd} \cdot r_i(t), \quad (6)$$

$$I_i(t+1) = \Delta I_i(t+1) + I_{anh} r_i(t), \quad (7)$$

where, $\Delta_j(t)$ is a flag for the flipped spins. Since $\Delta_j(t)$ is 0 when the spin state is not flipped, the spin connection with $\sigma_j(t+1)$ can be skipped. The spin state can be determined by the spin state differentials.

For evaluations, DSSA solves 2,000-node MAXCUT problems. Table 1 summarizes the average and best solutions obtained by DSSA. DSSA achieves 99% of the best known solution for each problem, and it achieves the best known solution for G27 and K2000.

Fig. 2 and Fig. 3 show the total number of clock cycles per annealing steps of DSSA (prop) and serialized SSA (conv) applied to K2000 and G27, respectively. DSSA completes 36,000 annealing steps for K2000 with the 15.4 times faster annealing time than that of serialized SSA approach. Additionally, the total number of clock cycles for G27 using DSSA is 42.1 times fewer than that of serialized SSA.

5. High-Performance DSSA Processor for Large and Fully-Connected Ising model

Based on the DSSA algorithm which employs the spin state differentials for spin interaction calculations, the high-performance DSSA annealing processor for large and fully-connected Ising model is designed. Fig. 4 shows the architecture of the fully-connected 2,048-

Table 1 Annealing performance for 2,000-node MAXCUT problems.

Problem	Avg.	Best
G22	13,318.0 (99.7%)	13,349 (99.9%)
G23	13,309.5 (99.7%)	13,337 (99.9%)
G24	13,300.3 (99.7%)	13,318 (99.9%)
G27	3,317.1 (99.3%)	3,341 (100.0%)
G35	7,634.1 (99.3%)	7,651 (99.5%)
G39	2,380.8 (98.9%)	2,397 (99.5%)
K2000	33,229.1 (99.7%)	33,337 (100.0%)

spin DSSA processor. In the DSSA method, the Ising spins are perturbed using random noise signals, which are generated by an XOR-shift random number generator (RNG). The required bit-width for the noise signals is 2,048 bits, as each spin-gate requires a 1-bit noise signal. To reduce the hardware area of the RNG, every 16 spins share a 1-bit noise signal. Consequently, the RNG only generates 128 bits of random signals. The spin-gate array receives weights from the SRAM weight memory (WM). Each weight is a 4-bit signed integer, and since there are 2,048 spins, the size of the SRAM is 16Mb with an 11-bit address width. The spin-gate array (SGA), a main component of the processor, comprises 2,048 DSSA spin-gates, with each spin-gate corresponding to one Ising spin. DSSA computes spin interactions sequentially, resulting in a significant reduction in the spin-to-spin connection area. To select and activate only the flipped spins, the DSSA processor incorporates the SSC. The SSC employs a priority encoder to select indexes of the flipped spins, which are subsequently used as addresses for the Weight Memory (WM) in the next annealing step. Additionally, the SSC generates reset signals for the flags, $\Delta_i(t)$, associated with the flipped spins. A scheduler module receives hyperparameters and generates a pseudo inverse temperature. The annealing process is also controlled by the scheduler. In contrast to the typical SA method, the DSSA method rapidly increases the pseudo temperature from a minimum to a maximum. This sequence is referred to as ‘a shot’, and it is repeated several times in a ‘trial’.

The design of the spin-gate is shown in Fig. 5, the spin-gate based on Eq. (5), (6), and (7). The spin-gate comprises a spin interaction circuit (SIC) and a spin update circuit (SUC). The SIC computes the spin interactions among connected spins in accordance with Eq. (2) or Eq. (5) and (6). When $t = 0$, the SIC selects J_{ij} (the path #1 in Fig. 5), and computes the initial $I_i(1)$. The serially delivered spin interactions are accumulated to the register within the SIC, and the bias,

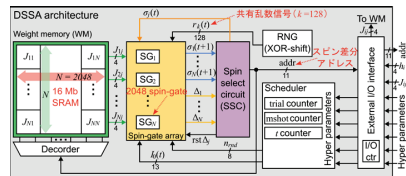


Fig. 4 Architecture of the fully-connected 2,048-spin DSSA processor.

h_i , is also accumulated by resetting the register as the bias. After the first step, the SIC selects the shifted J_{ij} for the flipped spins (the path #2 in Fig. 5), and calculates the differential, $\Delta I_i(t+1)$, following Eq. (6). The sign of the J_{ij} (or $2J_{ij}$) is determined by $\sigma_j(t)$ using a sign inverter (SI) and a multiplexer.

While the spin interactions are accumulated serially, spin updates are executed in parallel. The SUC receives $\Delta I_i(t+1)$ (or $I_i(1)$ during the first annealing step) from the SIC, and accumulates the noise signal. The $\text{Itanh}_i(t+1)$ is implemented using a saturated up-down counter. The differential flag, $\Delta_i(t)$, is also generated by the SUC using a comparator. When $\Delta_i(t)$ equals '1', the interactions of the spin, $\sigma_i(t+1)$, is activated. After accumulating the interactions of $\sigma_i(t+1)$, $\Delta_i(t)$ is reset by the reset signal $\text{rst}\Delta_i(t)$ generated from the SSC.

The DSSA processor is designed based on the TSMC 28 nm process and synthesized using Synopsys Design Compiler U-2022.12. The power consumption of the synthesized DSSA processor is 316.1 mW, and it operates at a clock frequency of 500 MHz. Based on the clock frequency and post-synthesis power consumption, the annealing performance is simulated and compared with the serialized conventional SSA method and state-of-the-art annealing chips [5, 6]. The numbers of spins composed in JSSC'21 and ISSCC'23 are 512. ISSCC'23 can compute 2k-spin with four multi chips. In contrast, the proposed DSSA processor contains 2,048 spins in a single chip, thus, it can compute the fully-connected 2,048-spin Ising model without multi chips. Moreover, the power dissipation per spin of the DSSA processor is 0.86 mW, which is 6.2 times more efficiency than that of ISSCC'23. JSSC'21 [5] solves the K2000 MAXCUT problem with energy consumption of 3.0 mJ. On the other hand, the proposed DSSA processor consumes 0.86 mJ for solving the K2000 MAXCUT problems. Therefore, the DSSA processor achieves 3.5 times greater energy efficiency for K2000 than [5].

6. Conclusions

In this paper, we present the DSSA algorithm for the efficient implementation of the fully-connected annealing hardware with the large number of spins. The DSSA method obtains the best known solutions for K2000 and G27, which are the 2K-spin MAX-CUT problems, within 15.4 times and 42.1 times faster annealing times, respectively. Based on the DSSA method, the fully-connected 2,048-spin annealing

processor is demonstrated. Its energy efficiency for K2000 is 3.5 times greater than that of the recent annealing chip. For future research, the designed DSSA processor will be fabricated and evaluated its performances, such as the power consumption and the annealing speed. Moreover, the COPs, that involve integer weights, are the next object for assessing the effectiveness of the proposed processor for the real-world applications.

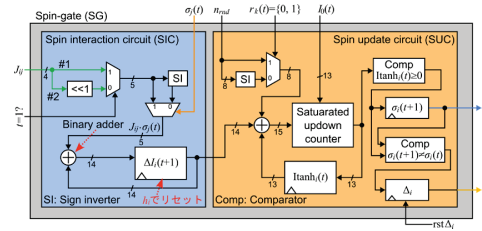


Fig. 5 Design of the spin-gate circuit for the DSSA processor.

Table 2 Comparisons the DSSA processor with state-of-the-art annealing processor.

	JSSC'21 [5]	ISSCC'23 [6]	DSSA
# of spins	512	512	2,048
Freq. [MHz]	320	134-336	500
Power per spin [mW]	1.27	0.29-0.93	0.15
Energy [mJ] ¹	3.0 ²	N/A	0.86

¹ Energy for the K2000 MAXCUT problem.

² Estimated results in [5].

Acknowledgment

This work was supported by the JSPS Grant-in-Aid for Scientific Research (B) (grant number JP21H03404), the JST CREST (grant number JPMJCR19K3) and Doctoral Program for WISE Program for AI Electronics, Tohoku University.

References

- [1] S. Kirkpatrick, et al., Science, Vol. 220, No. 4598, pp. 671–680, 1983.
- [2] N. Onizawa, et al., IEEE TNNLS, pp. 1–7, 2022.
- [3] K. Katsuki, et al., IEEE ICECS, pp. 1–4, 2022.
- [4] H. Gyoten, et al., ICCAD, p. 1–8, 2018.
- [5] K. Yamamoto, et al., IEEE JSSC, Vol. 56, No. 1, pp. 165–178, 2021.
- [6] K. Kawamura, et al., IEEE ISSCC, pp. 42–44, 2023.

博士学位論文要約（令和6年3月）

3M技術によるデジタルコヒーレント伝送システムの大容量化に関する研究

別府 翔平

指導教員：廣岡 俊彦

Study on Large-Capacity Digital Coherent Transmission Systems with 3M Technologies

Shohei BEPPU

Supervisor: Toshihiko HIROOKA

3M technology, i.e. multi-core, multi-mode control and multi-level modulation, is a promising technology for future high-capacity transmission systems. In multi-level modulation, multi-level quadrature amplitude modulation (QAM) formats are used to improve spectral efficiency (SE), although there is a trade-off between SE and sensitivity. Recently, probabilistically shaped QAM (PS-QAM) formats, which are advanced QAM formats to improve the trade-off, have been actively studied. Space division multiplexing (SDM) with Multi-core fibers (MCFs) and Multi-mode fibers (MMFs), can achieve ultrahigh transmission capacity proportional to the number of cores and modes. Recently, coupled SDM transmission technology has attracted attention, which increases the number of cores and modes beyond the crosstalk limit by compensating for crosstalk using a multiple-input multiple-output (MIMO) digital signal processor (DSP). However, huge computational complexity of MIMO DSP makes it difficult to implement in real-time circuits. In addition to increasing the transmission capacity per fiber using coupled SDM technologies, high-speed modulation techniques to improve electrical power efficiency are also important. Optical Time Division Multiplexing (OTDM) with coherent optical Nyquist pulses is a promising technology to increase the modulation speed without major degradation of signal quality. Recently, ultra-high-speed transmission using 1 Tbaud OTDM 64 QAM coherent optical Nyquist pulses with SE as high as 8.3 bit/s/Hz has been reported, although the transmission distance was 150 km.

This thesis presents the feasibility of high-capacity 3M optical transmission systems. First, high-capacity offline coupled SDM transmission experiments using PS-QAM formats optimized for short reach weakly coupled MMF and long-haul coupled-core MCF transmission systems are studied. In addition, I proposed a new algorithm and hardware configuration suitable for the implementation of real-time MIMO DSP. Using these techniques, I demonstrated real-time coupled SDM transmission using weakly coupled 10MF and coupled core 4CF for the first time. Moreover, I introduced PS-QAM formats for the first time in energy-efficient high-speed coherent optical Nyquist pulse OTDM transmission systems to achieve the transmission distance of more than 1,000 km. By using optimized 1-Tbit/s/λ PS-QAM signals, high-capacity (>10 Tbit/s) and long-distance (>1,000 km) transmission using 1-Tbit/s/λ signals is achieved for the first time.

1. はじめに

オンライン会議や4G、5Gモバイルネットワークなどの通信サービスの発展に伴って増加するトラフィック需要に対応するためには、基幹網である光ファイバ伝送システムの伝送容量を持続的に増大させる必要がある。従来のシングルモードファイバを用いた伝送システムにおける容量限界(100 Tbit/s)を打破して伝送容量を向上させるために、マルチコア(Multi-core)技術、マルチモード制御(Multi-mode control)技術、多値変調(Multi-level modulation)技術から成る3M技術が提案されている¹⁾。多値変調技術では、多値の直交振幅変調(Quadrature Amplitude Modulation: QAM)方式を用いて、周波数利用効率(Spectral

Efficiency: SE)を向上させる。特に、高度なQAM方式である確率整形QAM(Probabilistically Shaped QAM: PS-QAM)方式は、従来のQAMより良好なSEと所要信号対雑音比(Signal to Noise Ratio: SNR)のトレードオフを実現できるため、高い関心が寄せられている²⁾。マルチコアおよびマルチモード制御技術は、複数のコアを持つマルチコアファイバ(Multi-Core Fiber: MCF)または複数の伝搬モードを持つマルチモードファイバ(Multi-Mode Fiber: MMF)を用いて、複数の信号を並列伝送することにより、大容量化を実現する技術である。マルチコアおよびマルチモード制御技術は、空間分割多重(Space Division Multiplexing: SDM)と総称される。しかし、SDM

では、コア数やモード数が増加するにつれ、コア間やモード間のクロストークが無視できなくなり、信号品質が劣化してしまう。近年、多入力多出力デジタル信号処理 (Multiple-input Multiple-output Digital Signal Processor: MIMO DSP) を用いてクロストークを補償することにより、従来の限界を超えたコア数やモード数を実現可能な結合型 SDM 伝送技術が注目されている。しかし、MIMO DSP の計算量は非常に大きいため、リアルタイム回路への実装が課題となっている。

本論文では、まず、PS-QAM 信号を併用したオフライン結合型 SDM による伝送実験を行い、3M 技術による大容量化の有効性を示すとともに、MIMO DSP の計算量を考慮したリアルタイム結合型 SDM 伝送システムの設計指針を確立した。続いて、リアルタイム伝送に向けて、リアルタイム実装に適した新しい MIMO アルゴリズムとハードウェア構成を提案した。これらの技術を用いてリアルタイム MIMO DSP を実装し、MMF と MCF を用いたリアルタイム結合型 SDM 伝送を実証した。

結合型 SDM 技術によるファイバ 1 本当たりの伝送容量の増大に加えて、光伝送システムの効率化のためには、電力効率を改善することも重要である。電力効率を改善するためには、変調速度の高速化(1 Tbit/s/λ級)によるデバイス点数の削減および集積化が有効である。コヒーレント光ナイキストパルスを用いた光時分割多重 (Optical Time Division Multiplexing: OTDM) は、複数の低速変調信号の多重化・分離を電気ではなく光領域で行うことで、信号品質を大きく劣化させることなく変調速度を向上させることができる技術である³⁾。近年、コヒーレント光ナイキストパルス⁴⁾を用いた、SE の高い超高速 OTDM 伝送(1.28 TBaud 64QAM)が報告されている⁵⁾。しかし、その伝送

距離は 150 km であった。実用的な陸上伝送システムを想定すると、SE をできるだけ高く保ちながらも、1,000 km 以上の伝送が必要である。伝送距離の延伸に向けては、SE を保ちながら所要 SNR を低減できる PS-QAM 方式の導入が有効と考えられる。

そこで本論文では、1,000 km 以上の伝送距離の達成を目指して、PS-QAM 方式を高速コヒーレント光ナイキストパルス OTDM 伝送システムに初めて導入し、1 Tbit/s/λ伝送の長距離化に取り組んだ。最適化された PS-QAM 信号を用いることで、1 Tbit/s/λ信号を用いた大容量 (> 10 Tbit/s) かつ長距離 (> 1,000 km) 伝送を初めて実現した。

2. オフライン MIMO を用いた結合型 SDM 大容量伝送

2.1 結合型 4 コア多重 85.2 Tbit/s 3,120 km 伝送

図 1 に実験系を示す。送信器では、C バンド全域に渡る 152 波長分割多重(Wavelength Division Multiplexing: WDM) 偏波多重(Dual Polarization: DP)24 GBaud PS-16QAM 光信号を生成した。PS-16QAM の確率分布は正規分布とし、そのシェイピングパラメータは $\nu = 0.1, 0.15, 0.2$ の 3 通りから、波長毎に最適化なものを選択している。WDM 信号を、1 周 240 km の結合型 4 コアファイバ周回系によって 3,120 km 伝送した後に、オフラインの 8×8 MIMO DSP によりコアおよび偏波を分離・復調し、各波長およびコアの信号品質である NGMI (Normalized Generalized Mutual Information) を測定した。図 2(a)および(b)に、最適化された PS-16QAM 信号と NGMI を示す。全ての波長・コアで想定する前方誤り訂正符号 (Forward Error Correction: FEC) の訂正閾値を超える NGMI が得られた。この時の波長・コア合計の伝送容量は 85.2 Tbit/s に達しており、商用の海底

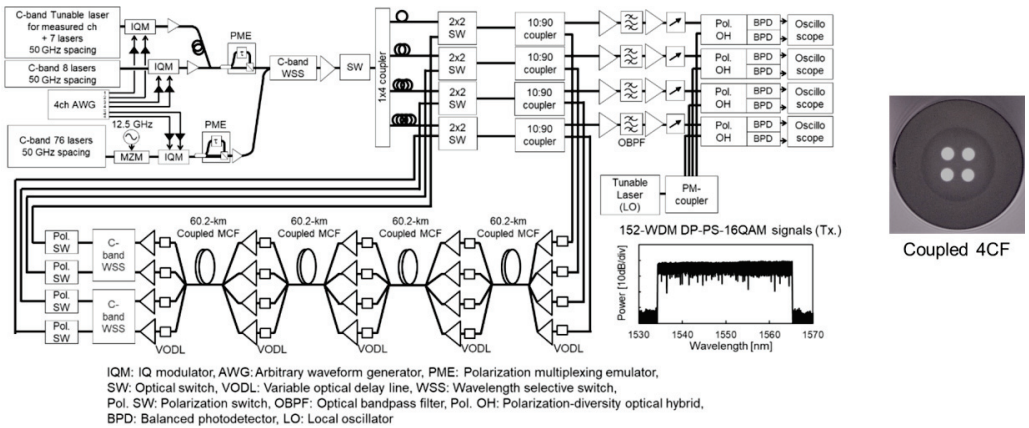


図 1 オフライン結合型 4 コアファイバ長距離周回伝送実験系

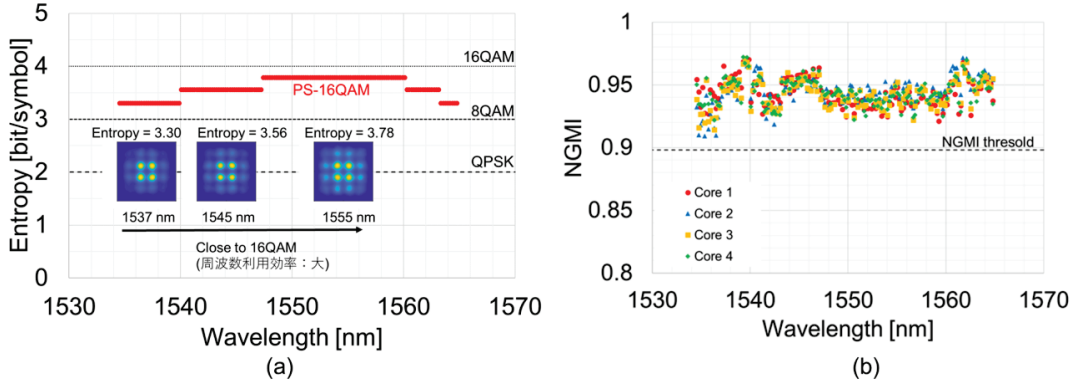


図 2 結合型 4 コアファイバ 3,120 km 伝送時における

(a) 波長毎に最適化された PS-16QAM 信号および(b)各波長・コアの NGMI

ケーブル伝送システムの伝送容量である約 10 Tbit/s を大きく上回る伝送容量を実現した。

2.2 弱結合型 10 モード多重 402.7 Tbit/s 48 km 伝送

続いて、モードを用いた大容量伝送実験を行った。本実験では、MIMO DSP の計算量を抑圧しながら多重数を 10 に拡大するために、異種モード間のクロストークを抑圧した弱結合型の 10 モードファイバを用いている。弱結合型とすることで、同種モード・偏波間の 4×4 MIMO のみで、全 10 モードを復調することができる⁶⁾。本実験では、C+L バンド全域に渡る 750-WDM 12 GBaud PS-16QAM 光信号を生成し、弱結合型 10 モードファイバで 48 km 伝送した後に、オフラインの 4×4 MIMO で復調を行った。結果を図 3 に示す。全ての波長・モードで想定する FEC の訂正閾値を超える NGMI が得られており、同種モード間の簡素な MIMO のみで、402.7 Tbit/s もの伝送容量を達成できることを示した。ただし、伝送距離が長くなると、わずかな残留クロストークが累積し、弱結合状態を維持することは難しくなる。従って、MIMO のリアルタイム実装に向けて、MIMO の計算量を抑圧しながら大容量化を行うためには、短距離伝送では弱結合型 MMF を用い、長距離伝送

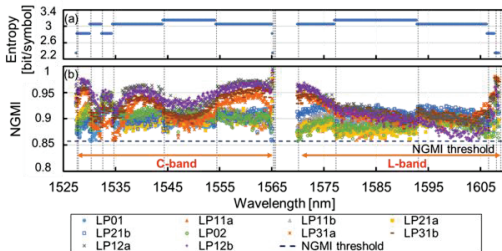


図 3 弱結合型 10 モード多重 48 km 伝送後の NGMI

では結合型 MCF を用いることが重要である。

3. 結合型 SDM 伝送用 MIMO のリアルタイム化

次に、コアまたはモードを用いたリアルタイム結合型 SDM 伝送に向けて、リアルタイム MIMO DSP の設計および実装を行った。リアルタイム処理では、並列化や演算遅延の影響による追従性能の劣化が課題となる。本論文では、追従性能を改善できる新たな MIMO アルゴリズムを提案した。提案アルゴリズムを用いることで、図 4 に示すように、位相雑音への追従性能が約 10 倍改善した。加えて、大規模な DSP をリアルタイム回路実装するために、複数の回路を高速なバスにより連結した大規模回路を構築した。これらの技術を用いて、最大 4 コアまたは 4 モード用のリアルタイム MIMO DSP の実装に成功した。図 5(a)および(b)に、結合型 4 コアファイバ 7,200 km 伝送後と弱結合型 10 モードファイバ 48 km リアルタイム伝送後の復調結果を示す。全ての波長・コアまたはモ

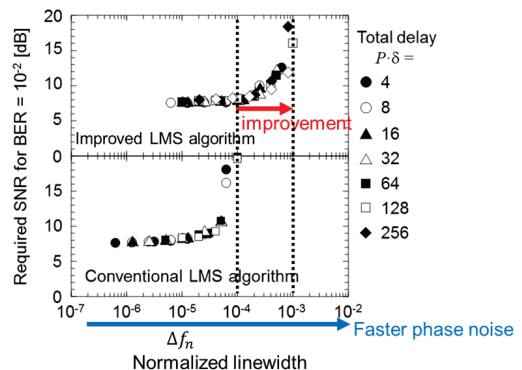


図 4 新規 MIMO アルゴリズムによる追従性能の改善

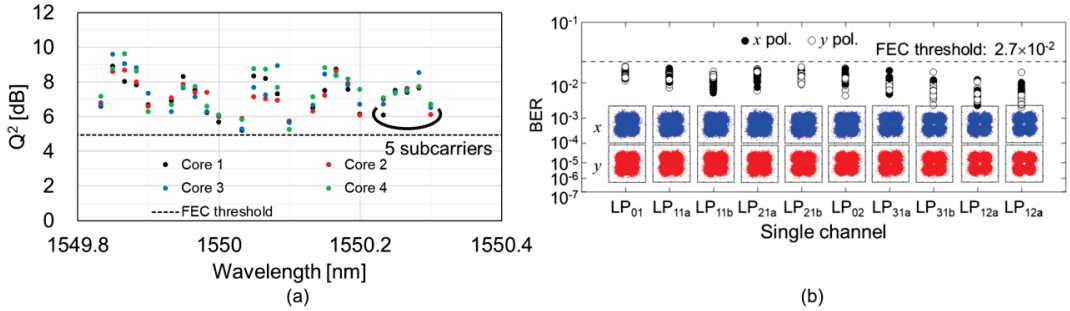


図 5 リアルタイム結合型 SDM 伝送実験結果 (a) 結合型 4 コア 7,200 km (b) 弱結合型 10 モード 48 km

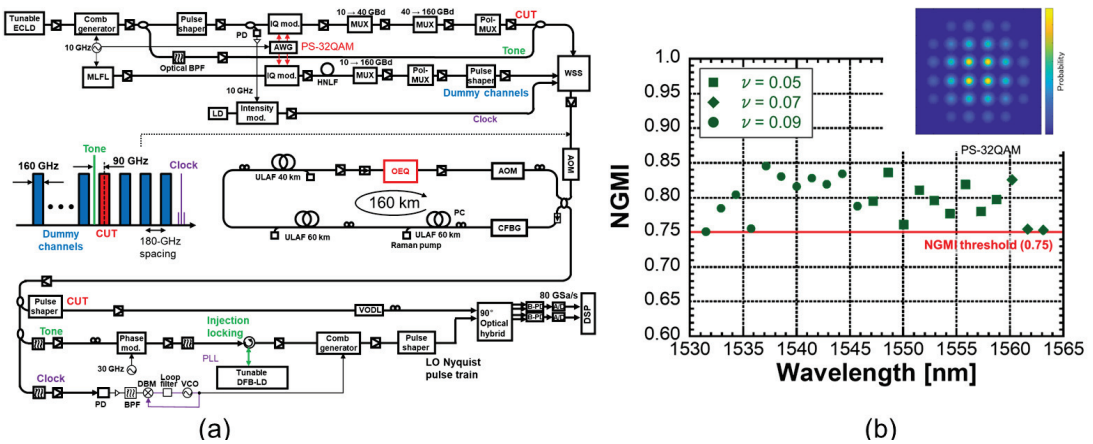


図 6 1-Tbit/s/λ PS-32QAM コヒーレントナイキストパルス信号の 1,600 km 伝送 (a)伝送実験系 (b)伝送結果

ードで、想定する FEC の訂正閾値を超える信号品質が得られている。本結果により、結合型 MCF を用いた長距離リアルタイム伝送と、弱結合型 MMF を用いた短距離の多モード(10 以上)リアルタイム伝送の実現性が初めて示された。

4. 確率整形による 1-Tbit/s/λ コヒーレントナイキスト OTDM 伝送システムの長距離化

最後に、光伝送システムの電力効率の改善に向けた高速変調技術として、コヒーレント光ナイキストパルス OTDM による 1-Tbit/s/λ信号の長距離伝送に取り組んだ。本論文では、SE を維持しながら伝送距離を 1,000 km 以上へ延伸するために、OTDM に PS-QAM 技術を新たに導入した。図 6(a)および(b)に 1-Tbit/s/λ PS-32QAM コヒーレントナイキストパルス信号の 1,600 km 伝送実験系および伝送実験結果を示す。全ての波長で想定する FEC の訂正閾値を超える NGMI が得られており、1-Tbit/s/λ信号を用いた大容量 (> 10 Tbit/s) かつ陸上系伝送システムに適用可能な長距離 (> 1,000 km) 伝送を初めて実現した。

5. まとめ

本論文では、次世代の大容量・長距離光伝送システムに向けた 3M 技術について取り組み、その有効性を伝送実験により明らかにした。また、SDM 伝送において不可欠な MIMO DSP をリアルタイム実装するために、伝送距離に応じた設計指針を確立し、リアルタイム結合型 SDM 伝送を世界に先駆けて実証した。さらに、陸上系伝送システムにおいては、コヒーレント光ナイキストパルス OTDM による高速伝送技術と 3M 技術により、高い電力効率で大容量伝送を実現できることを示した。

文献

- 1) 中沢正隆, 鈴木正敏, 盛岡敏夫, “光通信技術の飛躍的高度化,” オプトロニクス (2012).
- 2) F. Buchali et al., JLT, **34**(7), 1599, Apr. 2016.
- 3) H.-G. Weber et al., JLT, **24**(12), 4616, Dec. 2006.
- 4) M. Nakazawa et al., Opt. Express, **20**(2), 1129, Jan. 2012
- 5) M. Yoshida et al., Opt. Express, **27**(20), 28952, Sep. 2019.
- 6) C. Koebele et al., ECOC2011, Th.13.C.3.

博士学位論文要約（令和6年3月）

ロール・トゥ・ロール式成膜法により作製した CoPtCr グラニューラ型
スパッタ磁気テープの高記録密度化に関する研究

立花 淳一

指導教員：齊藤 伸

Study on High Recording Density of CoPtCr Granular Sputtered Magnetic Tape
Fabricated by Roll-to-Roll Deposition Method

Junichi TACHIBANA

Supervisor: Shin SAITO

A sputtered tape that uses a CoPt-based granular recording layer was investigated for practical application in the next-generation of large capacity magnetic tapes. 1) First, the optimal deposition speeds were investigated for the amorphous layer, *c*-axis oriented layer, initial nucleus control layer, and recording layer, which constitute the sputtered magnetic tape. As a result, it was confirmed that the optimal deposition rates were different for each functional layer of the granular magnetic film. The instantaneous deposition rate control method was devised as a method to obtain the desired characteristics of each layer under the condition of a constant substrate line speed. 2) Next, CoCr / CoCr-TiO₂ stacked phase-separation type underlayer without using precious metals was investigated in order to reduce the material cost of sputtered magnetic tapes. Thus, it was confirmed that the CoCr / CoCr-TiO₂ underlayer has the functions of *c*-axis orientation and promoting granular structure formation, and that the magnetic layer with a clustered granular structure realizes magnetic properties equivalent to those of the Ru underlayer. 3) Furthermore, a method to form a target composition with excess oxygen by adding Co₃O₄ material powder to the CoPtCr-SiO₂ target of the magnetic layer was studied to compensate for the oxygen deficiency during the deposition of granular magnetic films so that the addition of 2.5 mol% Co₃O₄ completely compensates for the oxygen deficiency in the grain boundary oxide of the magnetic layer. 4) Finally, we have estimated the write/read characteristics of the sputtered magnetic tape with improved magnetic properties by adding Co₃O₄ using a noble metal-free base layer, leading to that a recording density equivalent to 165 Gb/in² can be achieved.

1. はじめに

デジタル社会の情報量の爆発的増大を背景としたアーカイブ階層データ用記憶デバイスとして大容量磁気テープに注目が集まっている。磁気テープでは針状 Fe 系磁性粉や板状フェライト磁性粉を塗布方式により形成した塗布テープが主流であり、今日まで磁性粉体積の微細化技術により高密度記録化が図られてきた。面記録密度 10 Gb/in² を超え 100 Gb/in² も視野に入ってきた現在、磁気テープにおいても磁性粉の体積が熱擾乱による磁化減衰の影響が無視できない領域に達しつつある。このような背景より、次世代大容量磁気テープとしては 1.0 × 10⁷ erg/cm³ を超える高い結晶磁気異方性エネルギーを有する CoPt 基強磁性金属合金と酸化物より成る複合グラニューラ磁性膜をスパッタ法により形成したスパッタ磁気テープが期待されている。しかしながら、スパッタ磁気テープの実現については、ロール・トゥ・ロール式スパッタリング成膜法によるプロセス技術、材料コスト、磁性層の粒界酸化物の酸化 制御法といった多くの課題が存在する。

そこで本研究ではロール・トゥ・ロール式成膜法による多層膜形成法の確立、貴金属を使用しない下地層、および磁性膜作製時の酸素欠損を補完する粒界酸化物の酸化制御法の開発を目的とした。さらに本研究において開発したスパッタ磁気テープの記録

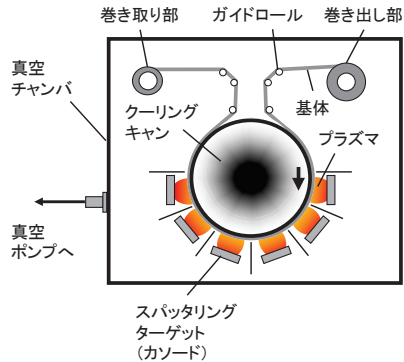


図 1 ロール・トゥ・ロール式スパッタリング装置の模式図

再生特性評価を行い高密度記録特性の検証を実施した。

2. ロール・トゥ・ロール式成膜法によるテープ基体への多層膜連続スパッタリング技術

スパッタ磁気テープは、各機能を担うアモルファス層、c軸配向層、初期核制御層および記録層より成る多層膜構造であり、各機能層において最適膜厚や最適成膜速度が異なる中で所望の磁気特性を達成することが求められる。スパッタ磁気テープの多層膜形成に用いられるロール・トゥ・ロール式スパッタリング装置の模式図を図1に示す。ロール・トゥ・ロール式成膜法では基体送り速度により各層共通の成膜時間が決定されるため、各層で異なる設定膜厚は投入電力による成膜速度により制御されるが、それらが各機能層の磁気特性に与える影響は不明であったことからその検証を行った。各層における成膜速度

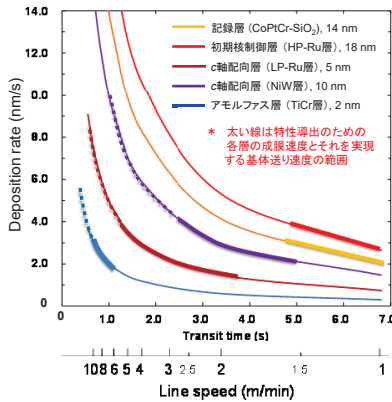


図2 ロール・トゥ・ロール式成膜法における各機能層毎の成膜時間と成膜速度の関係

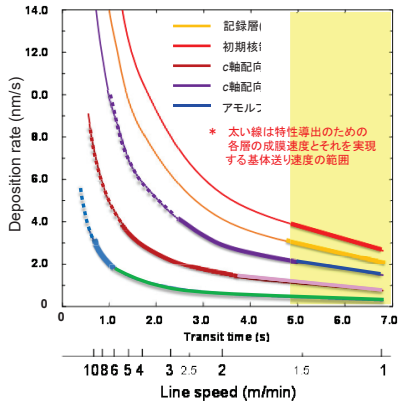


図3 瞬間成膜速度制御法により共通の基体送り速度にて各層で最適となる成膜速度を実現

に対する磁気特性の変化を振動試料磁力計 (VSM) により調べた結果、各機能層毎に好適となる成膜速度条件は異なることが明らかとなった。図2に各機能層の設定膜厚を成膜するのに要する成膜時間と成膜速度との関係を示す。横軸の副軸は基体送り速度である。図中の太い線は好適な特性導出のための各層の成膜速度とそれを実現する基体送り速度の範囲を示しているが、この図より好適な基体送り速度は各層毎に異なり共通の基体送り速度では最適な磁気特性を導出できないことがわかる。その解決策として、各層の成膜カソードに設けた遮蔽部の面積を制御することで最適な膜厚と成膜速度を両立可能な瞬間成膜速度制御法を開発した。c軸制御層であるNiW層に同手法を適用し62.5%の遮蔽を実施してCoPtCr-SiO₂グラニューラ磁性膜を作製した結果、共通の基体送り速度にて各層で最適となる成膜速度を実現できることを確認した(図3)。これは生産工程における成膜条件の制約を打破する有効な方法である。

3. c軸配向CoPtCrグラニューラ磁性層の組織制御のための貴金属フリー下地層の開発

磁気テープにて採用されるリングヘッド記録では厚い下地層でも記録分解能を維持できることに着目し、CoPt合金-酸化物グラニューラ磁性膜へのc軸ヘテロエピタキシャル成長促進が期待でき、かつ、貴金属を用いない下地層材料としてCo₆₀Cr₄₀に注目した¹⁾。課題となるグラニューラ組織形成促進策として、

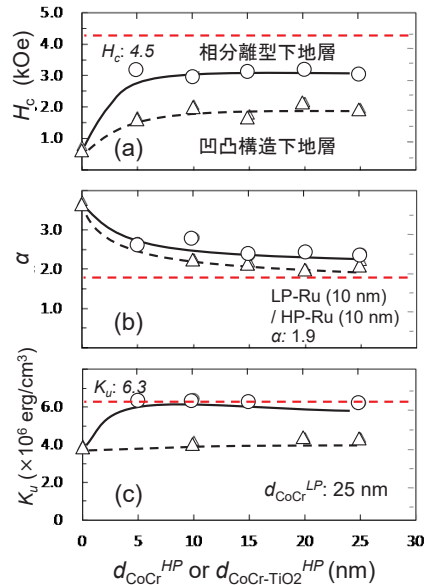


図4 相分離型下地層および凹凸構造下地層における磁気特性の膜厚依存性

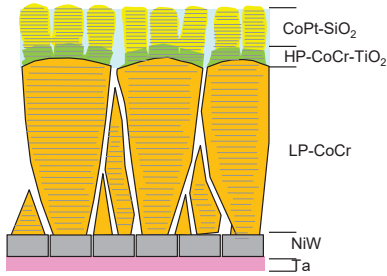


図 5 相分離型下地層の組織構造モデル

1) 低 Ar ガス圧 (Low Pressure: LP) CoCr / 高 Ar ガス圧 (High Pressure: HP) CoCr 積層構造である「凹凸構造下地層」、2) HP-CoCr 層に TiO₂ を添加して金属相島状分離構造を形成する「相分離型下地層」を検討した結果、後者の CoCr/CoCr-TiO₂ 積層相分離型下地層が有効であることを見出した。図 4 に、VSM および高感度トルク磁力計にて測定した、静止対向スパッタリング成膜法で作製した相分離型下地層試料における、(a) 保磁力 H_c 、(b) H_c 近傍の $M-H$ ループの傾きであり磁氣的孤立性の指標となる α ($= 4\pi \times dM/dH$) および (c) 磁気異方性エネルギー一定数 K_u 、それぞれについての HP-CoCr-TiO₂ 層膜厚 ($d_{\text{CoCr-TiO}_2}^{\text{HP}}$) 依存性を示す。LP-CoCr 層の膜厚は 25 nm で固定である。比較として、凹凸構造下地層の HP-CoCr 層膜厚 ($d_{\text{CoCr}}^{\text{HP}}$) 依存性の結果も併せて示した。凹凸構造下地層では HP-CoCr 層膜厚に依らず K_u は 4.0×10^6 erg/cm³ であったが、相分離型下地層では 5 nm 以上の HP-CoCr-TiO₂ 層付与により K_u は大きく増大し、LP-Ru/HP-Ru 積層下地層と同等となる 6.3×10^6 erg/cm³ を示した。また H_c は 3.2 kOe に増大し、 α は 2.3 に減少した。相分離型下地層において CoCr 層と CoCr-TiO₂ 層の膜厚比を CoCr 層 45 nm / CoCr-TiO₂ 層 5 nm とすることで磁氣的孤立性は更に向上し、 H_c は LP-Ru / HP-Ru 積層下地層と同等である 4.3 kOe となることを確認した。図 5 に透過型電子顕微鏡 (TEM) による断面方向組織観察より明らかとなった同膜組織の構造モデルを示す。粗大化した下地 CoCr 結晶粒上で複数の CoPt 磁性結晶粒が成長 初期部で接触した状態で形成され、かつ、各磁性結晶粒間では高い磁氣的分離が実現されているクラスタ状グラニューラ構造となっている。

ロール・トゥ・ロール式成膜法により作製した積層相分離型下地層試料においても CoPtCr-SiO₂ 磁性膜の c 軸配向およびクラスタ状グラニューラ構造を確認している。この結果は従来の貴金属 Ru 下地層が不要となることを示しており、スパッタ磁気テープの材料

費の大幅な低減により実用化への道を拓く有用な成果である。

4. CoPtCr グラニューラ磁性層における磁氣的孤立化促進のための粒界酸化相の酸化制御法

CoPt 合金-酸化物グラニューラ磁性膜ではスパッタリングの過程において酸素が欠損することが知られており²⁾、その補填を目的としてプロセスガスに酸素ガスを添加したスパッタリングが実施されている。しかしながらロール・トゥ・ロール式成膜法では、磁性層以外の層への酸素の混入を回避するため成膜雰囲気中に酸素ガスを導入できない。そこで磁性層の CoPtCr-SiO₂ ターゲットへ Co₃O₄ 素材粉を添加してターゲット組成を酸素過多に形成する方法を考案した。図 6 に、(a) 飽和磁化 M_s 、(b) 異方性磁界 H_k 、(c) H_c 、(d) α の Co₃O₄ 添加量依存性を示す。Co₃O₄ の添加に対しいずれの値も 2.5 mol% を超えると傾向が大きく変化し、2.5 mol% の Co₃O₄ 添加で、 H_k が 19 kOe と高く、 α が 1.3 と磁氣的孤立性に優れたグラニューラ磁性層が得られることを見出した。Co₃O₄ 添加量

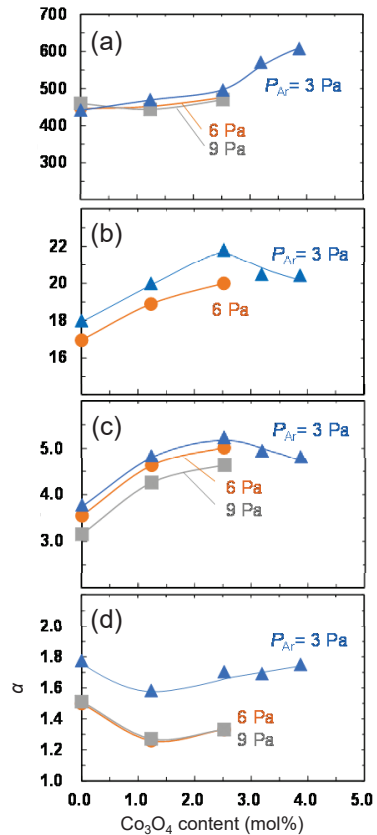


図 6 酸素補填型磁性層における磁気特性の Co₃O₄ 添加量依存性

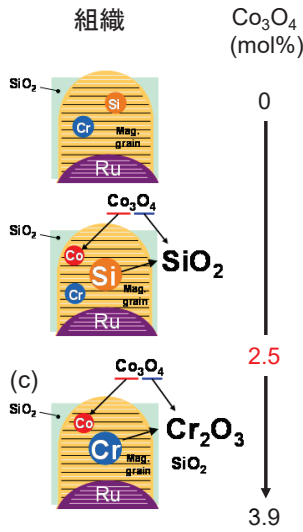


図7 Co_3O_4 の添加による粒界酸化相における酸化メカニズム

に対するこの磁気特性の変化について、金属酸化物の Gibbs の自由エネルギーおよび CoPt 金属相への金属元素の固溶による飽和磁化や磁気異方性の変化を考慮して、粒界酸化相における酸化のメカニズムを以下のように考察した。ターゲット中の Co_3O_4 素材粉量を 増加させると、まず磁性結晶粒中に固溶していた Si が Co_3O_4 より供給される酸素と酸化反応し SiO_2 として酸化物粒界に析出する(図 7 (a))。 Co_3O_4 添加 2.5 mol%において酸素欠損が完全に補完される(図 7 (b))。さらに、 Co_3O_4 添加量が 2.5 mol%を超えると磁性結晶粒中の Cr が酸化され Cr_2O_3 酸化物粒界へ析出される(図 7 (c))。

以上の結果より、ロール・トゥ・ロール式スパッタ法において磁性膜のグラニューラ組織を制御する上で極めて重要な知見が得られた。

5. リング記録ヘッド/磁気抵抗再生ヘッドによる CoPtCr グラニューラ型スパッタ磁気テープの記録再生特性

上記の手法により作製したスパッタ磁気テープについて、リング記録ヘッド/磁気抵抗型再生ヘッドにより記録再生特性を検証した。貴金属フリー下地層を用いたテープ試料について、ストレージ用磁気テープの代表的フォーマットである Linear Tape-Open (LTO) 規格の第 8 世代の製品である LTO8 テープとの比較を行い、LTO8 テープに対して+35%の高密度記録化が可能であり、クラスタ状グラニューラ構造の記録層であっても磁気テープフォーマットの記録密度領域において高い特性を期待できることを実証し

た。酸素欠損を完全補完した 記録層を有するテープ試料については、 Co_3O_4 の添加によりノイズで電圧が 39 %低下し、従来の作製法により作製したテープ試料に対して Broadband Signal-to-Noise Ratio (BB-SNR) が +1.8 dB 向上することを確認した。また、この記録層上に交換結合の高い膜をヘテロエピタキシャル成長させて付与する Cap 層による記録補助を検討し、Cap 層を 3 nm 付与することで BB-SNR は +0.5 dB 高くなり、従来の作製法により作製したテープ試料に対して BB-SNR が +2.3 dB 向上することを確認した。更に、貴金属フリー下地層を用い Co_3O_4 添加により磁気特性を向上させた磁気テープの記録再生特性を見積もった結果、165 Gb/in² 相当の記録密度を達成できることを確認した。これは現行製品である塗布型磁気テープを用いた場合の記録密度に対して 10 倍以上の記録密度に相当する。

6. まとめ

ロール・トゥ・ロール式成膜法におけるグラニューラ磁性膜の各機能層の機能発現条件を明らかとし、一定の基体送り速度の条件下で各層所望の特性を得る方法として瞬間成膜速度制御法を考案した。次にスパッタ磁気テープの材料費の抑制を目的として、貴金属を用いない $\text{CoCr}/\text{CoCr}-\text{TiO}_2$ 積層相分離型下地層について検討を行った。その結果、同下地層が c 軸配向およびグラニューラ構造形成促進効果の機能を有しており、クラスタ状グラニューラ構造の磁性層により Ru 下地層同等の磁気特性を実現することを確認した。さらに、グラニューラ磁性膜の成膜時の酸素欠損を補填する酸化制御法として磁性層の $\text{CoPtCr}-\text{SiO}_2$ ターゲットへ Co_3O_4 素材粉を添加してターゲット組成を酸素過多に形成する方法を考案した。その結果 2.5 mol%の Co_3O_4 添加により、磁性層の粒界酸化物の酸素欠損が完全に補完され、高い異方性磁界と磁氣的孤立性に優れたグラニューラ磁性層を得られることを見出した。最後に、本研究にて開発したスパッタ磁気テープの記録再生特性の検証として、貴金属フリー下地層を用い Co_3O_4 添加により磁気特性を向上させた磁気テープの記録再生特性を見積もった結果、165 Gb/in² 相当の記録密度を達成できることを確認した。

文献

- 1) Y. Hirayama, M. Futamoto, K. Ito, Y. Honda, and Y. Murayama, IEEE Trans. Magn., **33** (1997) 996.
- 2) S. Sasaki, S. Saito, and M. Takahashi, IEEE Trans. Magn., **49** (2013) 5603.

博士学位論文要約（令和6年3月）

新生児指紋認証に関する研究

幸田 芳紀

指導教員：青木 孝文

Newborn Fingerprint Authentication

Yoshinori KODA

Supervisor: Takafumi AOKI

With the innovation of deep learning, various technological problems at biometric technologies such as fingerprint authentication and face authentication have been solved, and the areas where biometric technologies can be applied are widely expanded. On the other hand, there are still areas of biometric technologies that have not been addressed even with deep learning. It is the authentication of newborn babies. When using biometric technologies to confirm the identity of a newborns, the biometric characteristics must be fully formed and usable soon after birth and must not change over the rest of their lives. Fingerprint authentication satisfies this requirement. This paper is to report the research on the fingerprint authentication for newborns, which contributes to the United Nations' sustainable development goals of creating a world in which all newborns can prove their identity by cutting edge technology to make the unmet areas minimize.

1. はじめに

我々が身分証明時に利用する運転免許証などの公文書は、公的発行機関が申請時に本籍（国籍）が記載された書類を確認し、交付時に公文書の顔写真と受取人が同一と確認されていることを前提として、本人確認で利用されている。これは、我々が生涯で自身の身分を証明するには、出生時に「出生登録」を行い、本籍（国籍）を取得することが前提となるあることを示している。一方で、国連児童基金は、後発開発途上国の5歳未満の出生登録率が47%であり、未登録の子供は、医療や教育といった生活に必要な支援を受けられないことを報告している¹⁾。低い出生登録率の背景には、保護者や居住地域の習慣や低い教育水準により出生登録の必要性を理解できない場合や、貧困により出生登録費や出生登録所に行く交通費が捻出できない場合など、様々な背景がある。そこで国連は、「Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development」の Sustainable Development Goals の Goal 16 Target 9 で、“By 2030, provide legal identity for all, including birth registration.”（2030年までに、すべての人々に出生登録を含む法的な身分証明を提供する）としている²⁾。

出生登録は、出生証明書と、登録に必要な名前や性別などの個人情報、新生児の本人確認で完了となるが、出生証明書や母子手帳を持たない保護者の場合、

眼前の新生児が本当に出生登録の対象者かを確認できない場合がある。そこで、新生児の本人認証手段として生体認証の利用が検討されており、その中でも、生涯を通じて変化しない「終生不変」³⁾と、ある指紋が別の人の指紋と一致する確率が640億分の1である「万人不同」⁴⁾の特長を持つ指紋認証に期待が寄せられている。一方で、指紋認証は、犯罪捜査での利用を前提に研究開発が進んできた。そのため、成人を対象に関連技術が標準化されており、成人以外の研究開発は未着手の状態であった。事実、2023年でも、新生児など、成人以外を対象とした指紋認証技術の研究はほとんどない。

本研究は、終生不変、万人不同の特長を持ち、出生時点で形成される指紋を用いた新生児認証の実現により、新生児を含むすべての子供たちに法的人格を与え、自身の存在で本人認証できる世界を築き国際課題の解決へ寄与することを目指すものである。

2. 新生児指紋の撮像と理解

新生児指紋認証の研究では、まず新生児指紋の撮像手法の研究と、撮像された指紋画像から、既存の指紋認証技術で利用する端点と分岐点からなる特徴点（Minutiae）を抽出可能かを確認した。

(I) 市販の指紋撮像機と新生児指紋専用撮像試作機

市場で入手可能な光学式（プリズム）の512dpi（dot per inch）の成人用指紋撮像機（DigitalPersona4500）

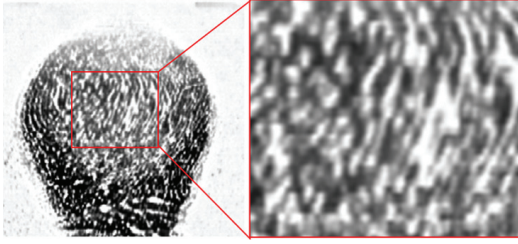


図1 512dpiで撮像した生後4か月の乳児指紋画像

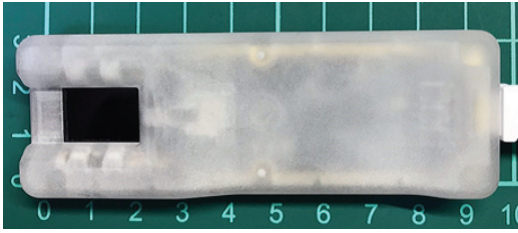


図2 2,674dpiのCMOSを搭載した指紋撮像試作機

で幼児の指紋を撮像評価した。図.1は、生後4か月の乳児の指紋画像であり、512dpiでは隆線が明瞭に描画できないことが確認できる。

この結果は、新生児指紋の撮像には高解像度化が求められることを示した。本研究では、世界で初めて生後6時間の新生児の指紋撮像に成功した1,270dpiの試作機⁵⁾や、生後2時間の新生児の指紋撮像に成功した2,400dpiの試作機⁶⁾などの試作をへて、Fiber Optic Plate (FOP)と2,674dpiのCMOSイメージセンサ(以下CMOS)を組み合わせる指内散乱光直接読取方式を用いた、図.2の撮像機を試作した⁷⁾。図.3は、新生児指紋の谷線を疑似的に表現した20 μm と30 μm の線と、隆線を疑似的に表現した200 μm の線、また、汗孔を模倣した10 μm から80 μm まで、10 μm ずつ段階的に直径が大きくなる穴で構成されている治具を、512dpi、1,270dpi、2,674dpiのCMOSを搭載した指紋撮像試作機で撮像した結果であり、2,674dpiの画像が最も精緻であることが確認できる。

(II) 指内散乱光直接読取方式

本研究の指紋撮像試作機では、図.4に示す指内散乱光直接読取方式を採用した。本手法では、まずFOPの読取側に指を置くくと周辺に配置したLEDが指に近赤外光を照射する。次に、指に照射され内部で散乱した近赤外光はFOPと接触する指紋の隆線部と、FOPと非接触の谷線部の皮膚表面に到達する。この際、FOPと接触する隆線部がもつ屈折量による出射角で透過した光のみをFOPを構成するグラスファイ

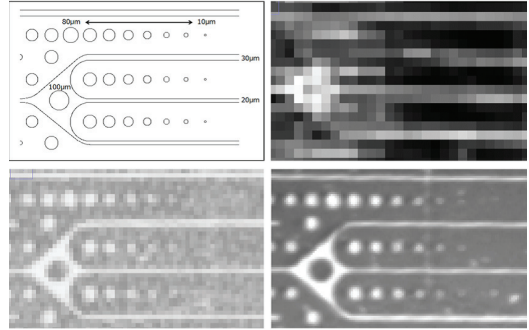


図3 左上: 治具のパターン, 右上: 512dpiの撮像結果, 左下: 1,270dpiの撮像結果, 右下: 2,674dpiの撮像結果

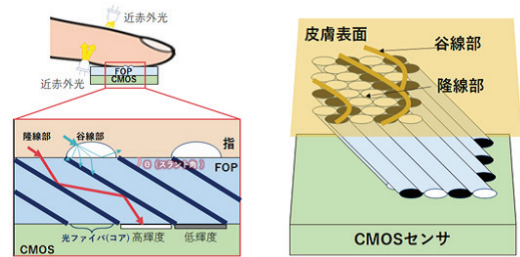


図4 指内散乱光直接読取方式

バのコアに入力し、反対の出力面に全反射で到達し高い輝度で出力された光をFOPに直接貼付したCMOSで読み取る手法である。

(III) 新生児の指紋に固有の特徴

新生児専用の指紋撮像機で撮像した生後2時間を含む新生児の指紋を評価し、肥大化した汗孔による隆線の分割、弾性変形、付着皮脂による損失、早産による低品質画像、生活環境による低品質画像の5点の新生児の指紋に固有の特徴を確認した⁶⁾⁷⁾。図.5は、上の課題のうち、肥大化した汗孔を谷線と誤判定し、1本の隆線を2本の隆線に描画した新生児の指紋画像である。この誤判定は、Minutiae情報を全く別の情報と判定するため、既存の指紋認証技術では特徴抽出と認証処理が行えない。図.6は、指の中央に皮脂が付着し画像の一部に欠損が発生している。この欠損は、皮脂に新生児を感染症から守る効果があり、沐浴と皮脂を拭うことを禁止する産後ケアがCOVID-19以降に広がったことに起因しており、皮脂に覆われた部位からの適切な特徴抽出を阻害している。

これらの新生児の指紋に固有の特徴は、その存在を受け入れつつ、新生児の指紋認証の実現を検討す

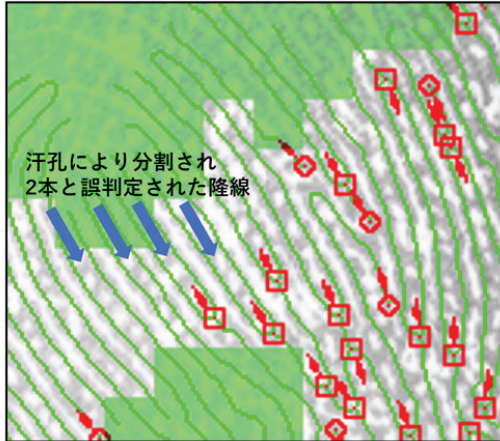


図 5 汗孔により 1 本の隆線を 2 本と誤判定した画像

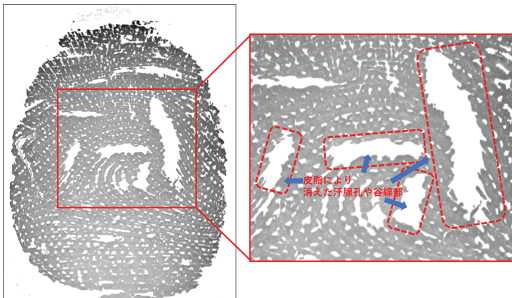


図 6 産後ケアにより皮脂が付着した指紋画像

る必要性を示した。

3. 新生児指紋を用いた認証手法

新生児の指紋に固有の特徴は、画像処理を実施できない状況では、既存の指紋認証技術の認証精度に大きな影響を与えた。特に、表 1 に示す通り、生後 4 週を境に認証精度に開きが生じており、新生児期の指紋に固有の課題が存在していると考え、収集した新生児指紋の画像を分析した結果、前述の課題と、課題の出現には共通性がなく汎用フィルタの適用による対処が難しいことを確認した。結果、新生児指紋を画像処理し、既存の指紋認証技術で利用することを断念した。指紋認証では、指紋紋様に現れる特徴を、指紋上に出現する全体的な紋様の流れを Level-1、指紋紋様の隆線から得られる Minutiae を Level-2、隆線の線上に現れる汗孔や隆線の形状に現れる特徴を Level-3 と定義している⁸⁾。新生児指紋に固有の、汗孔の肥大化による隆線分割や、付着した皮脂による情報の欠損を含む新生児指紋の分析において、既存の指

表 1 本人認証 (1:1) の結果

生後週数	TAR (%)	FAR (%)
≤ 4 週	43.43	0.1
> 4 週	79.72	0.1
≤ 4 週	54.55	1
> 4 週	83.55	1

表 2 紋様分類の精度評価結果

ネットワーク名	本人正答率	紋様判定精度
ResNet-18	45.50%	78.40%
ABN	69.70%	92.69%
VGG16-Vanilla	83.33%	95.68%
VGG16 4Class	93.94%	98.67%
VGG16 2Class	95.10%	98.78%

紋認証技術で利用する Level-2 の抽出は難しい指紋でも、指紋に出現する紋様の流れの Level-1 情報が取得できることを確認したことから、Level-2 の Minutiae ではなく、Level-1 の紋様の流れを用いた認証方法を検討した。なお、新生児指紋を対象とした既存の指紋認証技術が持つ紋様分類機能では、分類精度が安定しないため、深層学習を利用した紋様分類手法の検討とした。

深層学習を用いた紋様分類器は、深層学習で新生児の指紋紋様判定ができるかを確認するための ResNet-18、紋様判定の難しい紋様の判定精度を改善させる注意機構の効果を確認した Attention Branch Network、システム実装を目的に C 言語化した VGG16-Vanilla、難判定の紋様に特化して学習した VGG16-4Class、Unknown を排除せずに指定した紋様の有無で判定する VGG16-2Class5 種のネットワークを評価した。表 2 は、深層学習を利用した紋様判定の評価結果のまとめである。難判定の画像で学習を強化した VGG-16 を用いた評価で、紋様判定精度で 98% 超を達成し、本人正答率で、4 指を 4 種 256 通りに分類可能な 4Class で約 94% を、4 指を 2 種 16 通りに分類可能な 2Class で約 95% を達成した。

4. 実証研究

実証研究に向けて、新生児専用の指紋撮像機と新生児認証を実現する新手法である深層学習ベースの紋様分類を用いた認証器を搭載し、ワクチン接種の履歴管理と健康管理機能を含むワクチン接種管理システムを開発し、実際の医療機関で新生児と乳児を指紋で認証する評価と、ワクチン接種の履歴と計画の管理の効果を検証した。図 7 は、実証研究を実施

Kinango-SCHで出生した新生児（224名）の追跡調査

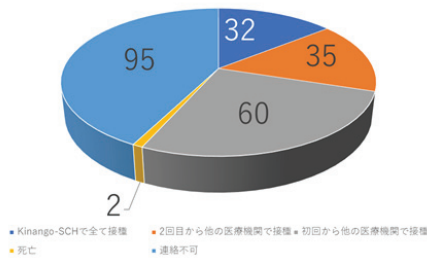


図7 Kinango-Sub County Hospital で出生した新生児 224 名の追跡調査

した Kinango-Sub County Hospital で出産した新生児 224 例のワクチン接種状況を追跡調査した結果である。全体の 42.4% の 95 名は、追跡調査で保護者に連絡できなかった。追跡調査が可能な 129 名の保護者に子供の存在を確認し、新生児の死亡を 2 例（死因不明 1 例，マラリア 1 例）確認した。一方で，上記死因は，ワクチン接種で防げる病気ではないことから，生後 28 日未満にワクチン接種で予防可能な死因による死亡例が 0 例と確認した。また，すべての新生児・乳児に必要な出生直後，6 週目，10 週目，14 週目までのワクチンを接種及び，次回予約も実施しており，本システムで接種履歴と計画が確実に管理できていることを確認した。

なお，本研究は，実証研究の実施に先立ち，ケニア中央医学研究所の科学倫理審査ユニット（Scientific Ethics Review Unit: SERU）によって承認を受けて実施されていることを記す。

5. まとめ

本博士学位論文は，新生児指紋認証に関する基礎的考察，新生児指紋を理解するために試作した新生児指紋撮像機，既存の指紋認証技術で特徴抽出，認証が出来ない新生児指紋を用いて本人認証を実施するために試作した深層学習を用いた紋様分類エンジン，新生児指紋専用撮像機，紋様分類を用いた認証器を実装したワクチン接種管理システムと，本システムを利用し，ケニアの Kinango-Sub County Hospital で実施した実証研究について述べたものである。この新生児指紋認証に関する研究は，だれ一人残さない世界を作るために必要な，確実な出生登録を実現し，出生直後の新生児にも法的人格を付与するとともに，すべての人々が生涯を通じて自分自身を証明することが可能になり，様々な公共サービスや社会サービスを利用することができる新しい世界の実現に寄与す

るものとなる。国際社会の一員として，国際課題を解決し，新しい世界を作る一助となるよう，新生児指紋認証の実用化に向けた歩みを進める。

文献

- 1) United Nations Children’s Fund, “Birth registration,” <https://www.unicef.org/protection/birth-registration/>. Accessed on 1 September, 2023.
- 2) United Nations, General assembly 15-15900 (E), United Nations, Sept. 2015.
- 3) J.B. William, “Embryologic development of epidermal ridges and their configurations,” *Birth Defects*, vol.27, pp.95–112, Feb. 1991.
- 4) Division of Criminal Justice Services New York State, “The fingerprint system,” https://www.criminaljustice.ny.gov/ojis/history/fp_sys.htm. Accessed on 29 Sep, 2023.
- 5) Y. Koda, T. Higuchi, and A.K. Jain, “Advances in capturing child fingerprints: A high resolution CMOS image sensor with SLDR method,” *Proc. 15th Int’l Conf. Biometrics Special Interest Group*, pp.329–336, Sept. 2016.
- 6) Y. Koda, A. Takahashi, K. Ito, T. Aoki, S. Kaneko, and S.M. Nzou, “Development of 2,400ppi fingerprint sensor for capturing neonate fingerprint within 24 hours after birth,” *Proc. 18th Int’l Conf. Biometrics Special Interest Group*, pp.95–106, Sept. 2019.
- 7) Y. Koda, H. Imai, N. Sasuga, K. Ito, T. Aoki, S. Kaneko, and S.M. Nzou, “Fundamental study of neonate fingerprint recognition using fingerprint classification,” *Proc. 21st Int’l Conf. Biometrics Special Interest Group*, pp.162–172, Sept. 2022.
- 8) D. Maltoni, D. Maio, A.K. Jain, and S. Prabhakar, *Handbook of Fingerprint Recognition Second Edition*, Springer, 2009.

博士学位論文要約（令和 6 年 3 月）

深層学習に基づく医療用超音波画像処理に関する研究

三浦 幹太

指導教員：青木 孝文

Medical Ultrasound Image Processing Based on Deep Learning

Kanta MIURA

Supervisor: Takafumi AOKI

Diagnostic ultrasound systems are widely used in clinical practice since ultrasound is non-invasive to the human body, the systems themselves are small and simple, and images can be acquired in real time. However, high-quality images cannot be acquired at high frame rates due to the trade-off between frame rate and image quality during image acquisition. In addition, 2D array probes and dedicated equipment are required for 3D data acquisition. This paper investigates two methods to improve the usefulness of ultrasound images and extend their range of applications: (i) a method for acquiring high-quality images at high frame rates, and (ii) a method for acquiring 3D data with a standard, simple diagnostic system. For these two research topics, we propose novel methods based on deep learning and construct large-scale ultrasound image datasets.

1. はじめに

超音波診断装置は、超音波が人体に対して非侵襲であり、装置自体が小型・簡便でリアルタイムに画像取得が可能であるなどの理由から、広く医療現場に普及している^{1) 2)}。一方、既存の超音波診断装置では、一般に、多数の（通常 100 を超える）超音波ビームを送信する必要があるため、フレームレートは 30fps 程度に制限された診断装置が多い。より高いフレームレートで画像取得を必要とする場合には、集束超音波ビームの代わりに少数の平面波を送信して画像を生成する平面波イメージング³⁾が用いられているが、画像取得時のフレームレートと画質の間にはトレードオフの関係があるため、高フレームレートで高品質な画像を生成することができない。また、CT や MRI のような 3 次元データを取得するためには、2D アレイプローブと専用装置が必要である^{4) 5)}。これらの課題に対して、本論文では、超音波画像の有用性の向上と適用範囲の拡大を目的として、第一にリアルタイム性を損わずに高品質な画像を取得する方法と、第二に通常の簡易な診断装置で 3 次元データを取得する方法について検討する。これら 2 つの研究課題について深層学習に基づく新たな手法を提案するとともに、その研究開発で不可欠となる大規模な超音波データセットを構築する^{6) 7) 8) 9)}。

第一の研究課題である、高フレームレートで取得された超音波画像の品質改善では、単一平面波を送信

して取得された信号から深層学習によって画像を品質改善する手法を提案する。提案手法では、8 ビット程度に圧縮された画像データを用いるのではなく、その原信号である高周波エコー（RF 信号）の IQ データそのものを用いることで品質を改善する。単一平面波 IQ データ（低品質）とコンパウンド後の IQ データ（高品質）のペアからなるデータセットを構築し、深層学習によって品質改善過程をモデル化する。第二の研究課題である、通常の簡易な超音波診断装置で利用可能な 3 次元超音波画像の再構成では、超音波画像のみから超音波プローブの位置姿勢を推定する手法を提案する。超音波画像とその取得時のプローブの正確な位置姿勢パラメータのペアからなるデータセットを構築し、位置姿勢推定ネットワークにより画像から位置姿勢を推定する過程をモデル化する。構築したそれぞれのデータセットを用いた性能評価実験を通して、提案手法が高フレームレートで取得された超音波画像の品質改善および通常の簡易な超音波診断装置で利用可能な 3 次元超音波画像の再構成において有効であることを実証する。

2. 高フレームレートで取得された超音波画像の品質改善

集束超音波ビームの代わりに平面波を送信する平面波イメージングを使用することで、高いフレームレートでの画像取得が可能である³⁾。平面波の送信回数を少なくするほどフレームレートが向上するが、

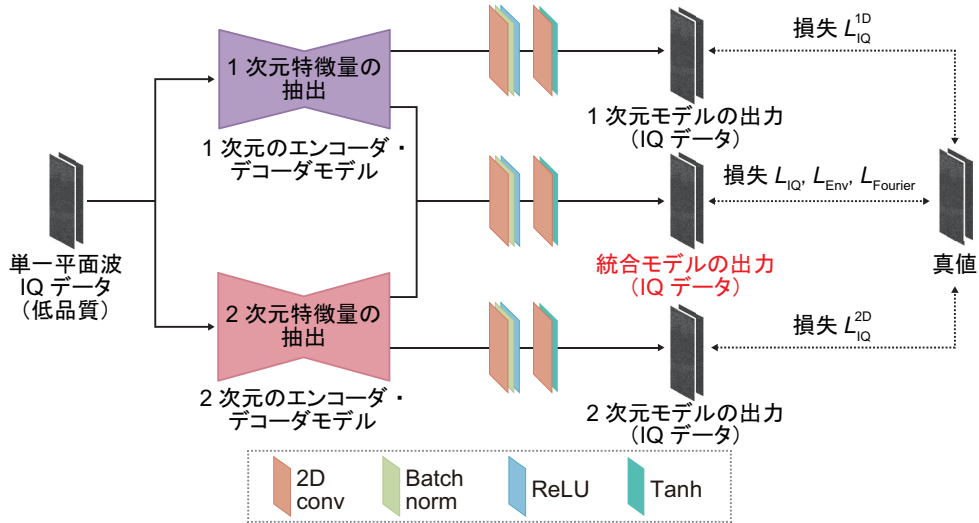


図1 提案する品質改善手法の概要

取得される画像の方位分解能やコントラストが低下する^{10) 11)}。この問題を解決するために、深層学習を用いて単一平面波を送信して取得された信号から高品質な画像を生成する手法が提案されているが、必ずしも十分な品質改善が達成できていない¹²⁾。さらに、モデルの学習と評価を行うために十分な規模のデータセットが公開されていないという課題がある。そこで、本論文では、研究用の超音波送受信装置を用いて画質改善の研究に特化した体系的なデータセットを構築するとともに、これに基づき単一平面波を送信して取得された信号から深層学習によって画像の品質改善を行う手法を提案する。

提案手法の概要を図1に示す。提案手法では、単一平面波 IQ データから深層学習によるエンコーダ・デコーダモデルを用いて高品質 IQ データを生成する。超音波の透過距離（深度）に応じて IQ データの振幅（エンベロープ信号）の水平方向の点広がり効果が増大する。そこで、エンベロープ信号の点広がり効果を考慮するために、水平方向から 1 次元特徴量を抽出する 1 次元のエンコーダ・デコーダモデルを使用するとともに、計測対象の形状を考慮するために、2 次元特徴量を抽出する 2 次元エンコーダ・デコーダモデルを使用する。1 次元と 2 次元のエンコーダ・デコーダモデルを組み合わせることで両者の特性を考慮して IQ データを生成することが可能である。エンコーダ・デコーダモデルの学習のために、平面波コンパウンド法で取得される IQ データを真値とするとともに、IQ データに基づく損失、エンベロープ信号

に基づく損失、周波数特性に基づく損失を定義する。IQ データに基づく損失を使用することで真値に近い IQ データを生成する。さらに、エンベロープ信号に基づく損失を使用することで真値のエンベロープ信号に近い点広がり効果を、周波数特性に基づく損失を使用することで真値の RF 信号に近い周波数スペクトルを実現する。

学習と評価のために構築したデータセットは、単一平面波を送信して取得されたビームフォーミング後の RF 信号と平面波コンパウンド法により取得されたビームフォーミング後の RF 信号からなる 6,400 ペアで構成される。構築したデータセットを用いた性能評価実験を通して、提案手法が従来手法よりも高品質な超音波画像を生成できることを示す。各手法により生成された超音波画像を図2に示す。従来の品質改善手法である Li らの手法¹²⁾は、品質改善が不十分であるのに対して、提案手法は、高性能な品質改善を達成している。

3. 超音波画像を用いた 3 次元再構成

超音波画像から超音波プローブの位置・姿勢を推定し、その位置・姿勢に基づいて超音波画像を並べることで通常の簡易な診断装置で 3 次元データを取得することができる¹³⁾。超音波プローブの位置・姿勢を高精度に推定するために、Convolutional Neural Network (CNN) を用いて超音波画像から超音波プローブの位置・姿勢を推定する手法が提案されているが、推定精度が不十分であるという問題がある^{14) 15)}。そこで、本論文では、超音波診断装置と光学式モーショント

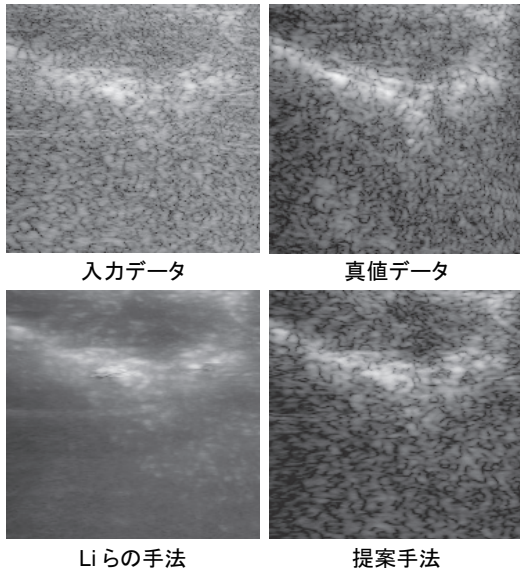


図2 各手法により生成された超音波画像

ラッキングシステムを用いて超音波画像データセットを構築するとともに、超音波画像から超音波プローブの位置・姿勢を高精度に推定する手法を提案する。

提案手法の概要を図3に示す。提案手法では、超音波プローブを移動させて取得した時系列超音波画像に対して、隣接画像間の対応関係をCNNによって抽出するとともに、その得られた画像間特徴量の時系列変化をRecurrent Neural Network (RNN)によって抽出することで超音波プローブの位置姿勢の時系列変化を推定する。位置姿勢推定モデルの学習のために、モーショントラッキングシステムにより計測した超音波プローブの位置姿勢のパラメータを真値として、以下の5つの損失関数を学習に使用する。第一に、真値のパラメータと推定されたパラメータの間のユークリッド距離を損失として使用する。第二に、隣接する3枚の超音波画像から推定される2つのパラメータが幾何学的な一貫性を持つように学習を行うForward consistency lossを使用する。第三に、隣接する2つのフレームの間の変換と逆変換の間で整合性のあるパラメータを推定するように学習を行うBackward consistency lossを使用する。第四に、隣接する3枚の超音波画像のうち、最初と最後の超音波画像をエンコーダ・デコーダモデルへ入力し、中間の超音波画像を出力するように学習を行う画像再構成損失を使用する。第五に、3次元再構成を行う際に生じる累積誤差を補正するために、最初のフレーム

と各フレームの間の超音波プローブの位置・姿勢のパラメータを推定し、真値のパラメータと推定されたパラメータの間のユークリッド距離を損失として使用する。

学習と評価のために構築するデータセットは、超音波プローブの走査位置が記録された720,000枚の画像で構成される。超音波プローブの位置姿勢推定の精度を評価するために、構築したデータセットに基づく5つの評価プロトコルを定義する。評価プロトコルに基づく性能評価実験を通して、提案手法が従来手法と比較して高精度に超音波プローブの位置姿勢を推定し、高品質な3次元超音波画像を再構成できることを示す。各手法により再構成された3次元超音波画像を図4に示す。従来の位置姿勢推定手法であるPrevostらの手法¹⁴⁾やGuoらの手法¹⁵⁾と比較して、提案手法は、高精度な位置姿勢推定を達成しており、真値に近い3次元超音波画像を再構成できている。

4. まとめ

本論文では、高フレームレートで取得された超音波画像の品質改善および既存の超音波診断装置で利用可能な3次元超音波画像の再構成について深層学習に基づく新たな手法を提案するとともに、その研究開発で不可欠となる大規模な超音波データセットを構築した。構築したデータセットを用いた性能評価実験を通して、提案手法が超音波画像の品質改善および既存の超音波診断装置で利用可能な3次元超音波画像の再構成の性能向上に有効であることを実証した。今後の展望としては、深層学習に基づく高精度な超音波画像処理技術の検討や、本論文で提案した超音波画像処理手法を使用して取得された高品質な超音波画像や3次元超音波画像の超音波画像診断への応用などが挙げられる。

文献

- 1) 日本医用画像工学会, 医用画像工学ハンドブック, 日本医用画像工学会, 2012.
- 2) P. Hoskins, K. Martin, and A. Thrush, Diagnostic Ultrasound: Physics and Equipment, CRC Press, 2019.
- 3) O. Coutere, M. Fink, and M. Tanter, "Ultrasound contrast plane wave imaging," IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol.59, no.12, pp.2676-2683, Dec. 2012.
- 4) G. Frey and R. Chiao, 4Z1c real-time volume imaging transducer, White Paper, Siemens Healthcare Sector, 2008.
- 5) X. Deán-Bean, S.J. Ford, and D. Razansky, "High-frame rate four dimensional optoacoustic tomography enables visualization of cardiovascular dynamics and mouse heart perfusion," Scientific Reports, vol.5, p.10133, July 2015.

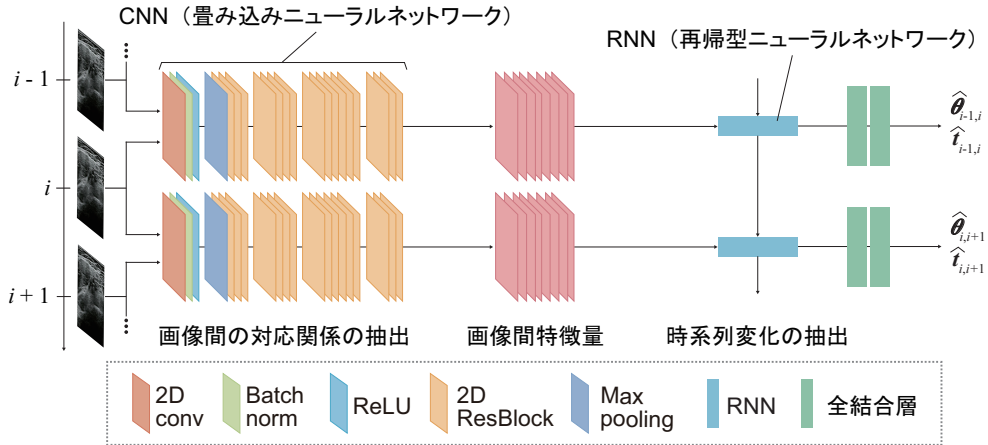


図 3 提案する位置姿勢推定手法の概要

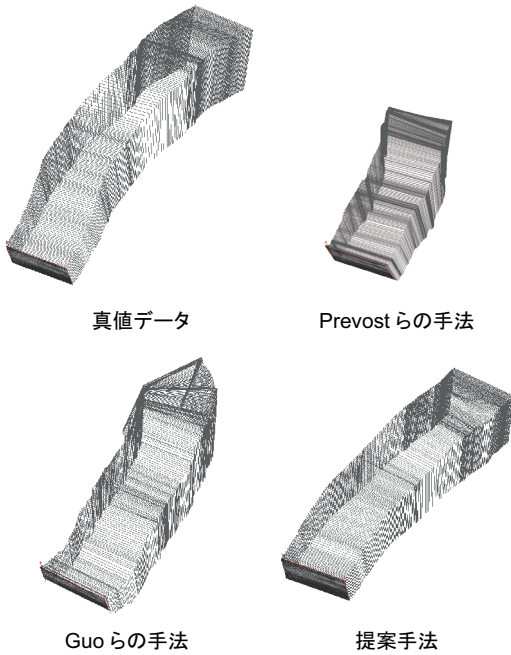


図 4 各手法により再構成された 3 次元超音波画像

Kondo, “Pose estimation of 2D ultrasound probe from ultrasound image sequences using CNN and RNN,” Proc. Int’l Workshop on Advances in Simplifying Medical Ultrasound, vol.12967, pp.96–105, Sept. 2021.

- 6) 三浦幹太, 設楽裕海, 石井琢郎, 伊藤康一, 青木孝文, 西條芳文, 大宮淳, “深層学習を用いた単一平面波イメージングの高画質化に関する検討,” 日本超音波医学会第 96 回学術集会, vol.50, p.S 711, May 2023.
- 7) 設楽裕海, 三浦幹太, 石井琢郎, 伊藤康一, 青木孝文, 西條芳文, 大宮淳, “1D+2D U-Net を用いた単一平面波イメージングの高画質化に関する検討,” 電子情報通信学会技術報告, vol.123, no.214, pp.24–28, Oct. 2023.
- 8) K. Miura, K. Ito, T. Aoki, J. Ohmiya, and S.

- 9) K. Miura, K. Ito, T. Aoki, and J. Ohmiya, “Pose estimation of ultrasound probe using CNN and RNN with image reconstruction loss,” Annual Int’l Conf. the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp.1–4, July 2023.
- 10) G. Montaldo, M. Tanter, J. Bercoff, N. Benech, and M. Fink, “Coherent plane-wave compounding for very high frame rate ultrasonography and transient elastography,” IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol.56, no.3, pp.489–506, March 2009.
- 11) M. Tanter and M. Fink, “Ultrafast imaging in biomedical ultrasound,” IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol.61, no.1, pp.102–119, Jan. 2014.
- 12) Z. Li, A. Wiacek, and M.A.L. Bell, “Beamforming with deep learning from single plane wave RF data,” Proc. IEEE Int’l Ultrasonics Symp., pp.1–4, Sept. 2020.
- 13) T.R. Nelson and D.H. Pretorius, “Three-dimensional ultrasound imaging,” Ultrasound in Medicine & Biology, vol.24, no.9, pp.1243–1270, Dec. 1998.
- 14) R. Prevost, M. Salehi, J. Sprung, A. Ladikos, R. Bauer, and W. Wein, “Deep learning for sensorless 3D freehand ultrasound imaging,” Proc. Int’l Conf. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, vol.10434, pp.628–636, Sept. 2017.
- 15) H. Guo, S. Xu, B. Wood, and P. Yan, “Sensorless freehand 3D ultrasound reconstruction via deep contextual learning,” Proc. Int’l Conf. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, vol.12263, pp.463–472, Oct. 2020.

博士学位論文要約（令和6年3月）

虚血性心疾患の定量診断を目指した 心筋収縮特性の超音波局所計測に関する研究

小原 優

指導教員：金井 浩， 研究指導教員：荒川 元孝

Ultrasound Local Measurement of Myocardial Contractile Property for Quantitative Diagnosis of Ischemic Heart Diseases

Yu OBARA

Supervisor: Hiroshi KANAI, Research Advisor: Mototaka ARAKAWA

Ultrasound measurements of myocardial contractile property have been developed for evaluating myocardial function and detecting myocardial ischemia. In this study, the locality of these measurements was improved to locally evaluate the myocardial function in the transmural direction of the heart wall for quantitative diagnosis of ischemic heart diseases. The strain rate (SR) measurement using the multifrequency phased-tracking method was used for the local measurement of the myocardial contractile property. The SR was calculated using the power-weighted center of the window function. The reliability of the estimated SR was quantified based on the multifrequency phase differences using the law of error propagation. The myocardial SR was locally measured in the transmural direction of the interventricular septum for healthy volunteers. The multilayer of contraction and relaxation was observed in the SR distribution around the pre-ejection phase, which suggested the transmural difference of the contractile property depending on the myocardial sheet angle. The myocardial contractile function was locally evaluated in the transmural direction based on the peak SR in the ejection phase for normal and ischemic hearts. The contractile dysfunction owing to ischemia was detected by this local evaluation. The proposed method may be useful to locally measure the contractile property and evaluate the transmural extent of ischemia.

1. はじめに

心筋梗塞や狭心症などの虚血性心疾患は、心筋に血液を供給する冠動脈の狭窄や攣縮により、心筋が虚血状態に陥る病態を指す。虚血状態の心筋は機能不全に陥り、やがて壊死へと至る。図1のように、心筋虚血は冠動脈抹消の心内膜側で発生し、心外膜側へと貫壁方向に拡がるため、心筋機能の貫壁方向局所評価は虚血性心疾患の診断において重要である。

超音波検査は非侵襲的で繰り返し適用可能かつ手軽な検査法であるため、虚血性心疾患の診断に広く用いられている。虚血性心疾患の超音波定量診断を目指し、心筋の収縮性を反映した厚み変化速度を定量化するため、心筋ストレインレート(SR)の計測法が開発されてきた。先行研究では、虚血状態において収縮期の心筋SRの最大値が低下すると報告されており、心筋機能が低下した虚血領域を心筋SR計測によって検出可能と考えられる。一方で、従来の計測法では計測値のばらつきが大きく、臨床応用には心筋SRの空間的な平均操作が必要であり²⁾、貫壁方向における局所計測は困難であった。そのため、現状の虚血性心疾患の超音波定量診断では、

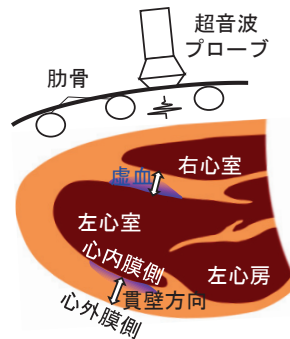


図1 心筋虚血領域の拡がりと心臓超音波計測の模式図

主に心臓全体の収縮機能が評価されており、心筋機能の貫壁方向局所評価は行われていない。

心筋SR計測による心筋機能の貫壁方向局所評価の実現には、従来の計測法の計測精度と局所性を向上させる必要がある。本研究の目的は、受信超音波信号のフレーム間における位相差を用いた従来法を改善し、心筋SRの貫壁方向局所計測が可能な提案法による *in vivo* 実験を行い、その臨床的有効性を検討することである。

2. 心筋 SR の超音波局所計測の原理

心筋 SR 計測における計測精度と局所性の向上が可能な、複数の周波数における超音波位相差を用いた心筋変位速度推定法を提案した。

従来法では、受信超音波信号の中心周波数における位相差からフレーム間における心筋変位速度を推定していた²⁾。しかし、心臓超音波計測における、超音波が生体組織内を伝播する際の周波数依存の減衰、多数の心筋線維からの散乱波どうしの干渉、心筋の瞬時厚み変化による散乱波どうしの干渉状態の変化により、単一の周波数における位相差からでは心筋変位速度を高精度に推定できない場合がある。そのため、従来法では、ある深さからの受信信号のフレーム間における位相差を深さ方向に平均化することで、上記の影響による推定誤差を低減していた。一方で、この深さ方向の平均操作により、心筋変位速度の局所推定が困難であった。

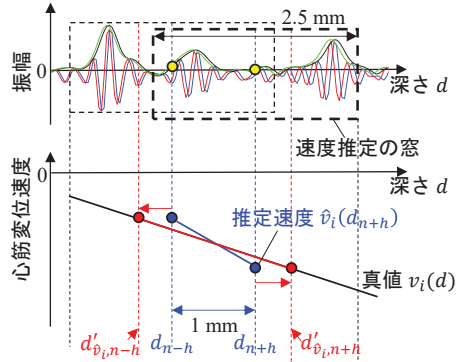
そこで、深さ方向の平均操作を行わずに上記の減衰、干渉、干渉状態の変化の影響を低減するため、受信超音波信号の複数の周波数における位相差を用いた心筋変位速度推定法を提案した³⁾。減衰、干渉、干渉状態の変化が位相差に与える影響は、周波数によって一定の傾向を持たないと考えられるため、中心周波数における位相差から心筋変位速度を高精度に推定することが困難な場合でも、他の周波数における位相差を用いることで上記の影響による推定誤差を低減できる。そのため、提案法によって深さ方向の平均操作を行わずに心筋変位速度の推定が可能となった。

さらに、心筋変位速度から SR を算出する際の従来法における仮定を、実際の心筋動態に近い仮定に拡張した高精度な心筋 SR 計測法を提案した⁴⁾。

心筋 SR は変位速度分布の深さ方向における傾きとして求められる。従来法では、異なる 2 点を中心とした 2 つの窓関数を設定し、それぞれの窓関数内において推定された変位速度の差を窓関数の中心間の距離で除することにより、SR を推定していた。しかし、窓関数内で変位速度分布が均一と仮定していたため、2 点間の距離が短い SR の局所計測では仮定が成り立たず、窓関数内の心筋の瞬時厚み変化による推定誤差が生じていた。

そこで、実際の心筋では瞬時厚み変化が深さ方向に連続と考え、窓関数内で SR 分布が均一とする仮定に置き換え、窓関数内の心筋の瞬時厚み変化を考慮した SR 計測法を提案した。複数の周波数における位相差を用いて得られる推定速度を上記の仮定に基づいて定式化すると、ある深さを中心とした窓関数内における受信信号から推定された速度は、必ずしもその中心深さにおける速度の真値と一致せず、窓関数内の受信信号パワーを重みとした中心深さに

受信超音波信号 at the i th and $(i + 1)$ th frames
包絡線 $|z_i(n)|$ and $|z_{i+1}(n)|$



d_{n-h} and d_{n+h} : 窓関数の中心深さ

$d'_{v_i, n-h}$ and $d'_{v_i, n+h}$: 受信信号パワーの重み付き中心深さ

図 2 受信超音波信号を用いた心筋 SR の局所計測の模式図

における真値として近似できる。そのため、図 2 のように、異なる 2 点における推定速度の差を窓関数内の受信信号パワーを重みとした中心間の距離で除することにより、窓関数内の心筋の瞬時厚み変化による推定誤差を低減した SR の推定が可能である。

提案法では、複数の周波数における超音波位相差を用い、窓関数内の心筋の瞬時厚み変化を考慮することで、特に局所計測において従来法より高精度に SR を推定可能となった。

3. 心筋 SR の局所計測における心筋変位速度推定の窓関数の決定

前節に示した提案法による局所計測に適した窓関数とその決定方法を提案した。受信超音波信号に含まれる複数の周波数成分の位相差を用いる提案法では、帯域内における隣り合う周波数成分からのスペクトル漏れの影響を低減するため、高い周波数分解能を持つ窓関数が求められる。窓関数の周波数分解能は窓長が短いほど低くなるため、これにより提案法の局所性は制限される。一方で、窓関数の周波数特性はその形状によって異なるため、提案法に適した窓関数を用い、周波数分解能を維持したまま局所性を向上させることができる。

心臓壁運動の超音波計測を模擬したシミュレーションにおいて提案法に適した窓関数を決定した。in vivo 計測における多数の心筋線維からの散乱波の重ね合わせによって生じる干渉波形と超音波の伝播方向と直交する方向の心筋の瞬時変位による波形の変化を模擬した受信信号を用いた。スペクトル漏れの影響が大きいとき、エイリアシング誤差と呼ばれる受信信号の波長に相当する大きな推定誤差が生じるため、心筋の最大変位速度の推定におけるエイ

リアシング誤差の発生確率を窓関数の評価指標とした⁵⁾。この指標に基づいて決定された窓関数は、全長 2.5 mm でテーパ比 0.3 の Tukey 窓であった。この窓関数は、高い周波数分解能を持ちつつ、受信信号を切り取る際の両端における不連続性によって生じるスペクトル漏れも低減できるため、提案法による局所計測に適していたと考えられる。

4. 心筋 SR の局所計測における推定値の信頼性の定量評価

提案法においても、超音波の伝播方向と直交する方向の心筋の瞬時変位の影響による推定誤差を完全に抑制することは困難である。そのため、推定された SR の信頼性を定量評価する手法を提案した。

従来の心筋 SR 計測では、推定された SR の絶対値に基づいてその信頼性が評価されていた²⁾。しかし、SR の推定精度が一定でない場合、この方法では推定値の信頼性を正しく評価できない。

そこで、SR の推定精度を考慮して推定値の信頼性を定量評価する手法を提案した。心筋 SR は変位速度から算出されるため、誤差伝播の法則を用いて、変位速度の推定精度から SR の推定精度を求めた。提案法では、周波数領域における位相差の傾きから心筋変位速度を推定するため、心筋の瞬時変位によって生じる周波数に線形な位相差以外の成分が大きいほど推定精度が低下する。心臓超音波計測のシミュレーションにおいて、位相差の線形性と変位速度の推定精度との関係を求め、実際の計測ではこの関係を参照することで変位速度の推定精度を推定した。変位速度の推定誤差が正規分布に従うと仮定し、SR の推定値とその推定精度を用いて、推定値が実際の心筋の瞬時厚み変化を反映している確率として、推定値の信頼性を定量評価した。

5. 心筋収縮特性の *in vivo* 計測

健常者の心室中隔壁において提案法による心筋 SR の貫壁方向局所計測を行い、SR 分布から信頼性が高い部分を抽出することで、貫壁方向各心筋層における心筋収縮特性の解明を試みた。収縮

末期には各心筋層が一様に厚くなっていたが、図 3 のように拡張末期から前駆期にかけての心電図 R 波近傍の時相では深さ方向（貫壁方向）において厚くなる部分と薄くなる部分の多層の分布がみられた⁶⁾。この多層の分布は、6 名の健常者の連続 3 心拍における提案法による計測結果でみられたが、深さ方向（貫壁方向）における平均操作が必要な従来法²⁾による計測結果ではみられなかった。これは、拡張末期において各心筋層では心筋シート角度によって収縮特性が異なり、貫壁方向局所計測が可能な提案法では各心筋層の収縮特性の違いを捉えられたことを示していると考えられる。

健常者および虚血性心疾患患者に対し、収縮期において貫壁方向に局所計測した心筋 SR の最大値に基づく収縮機能評価を行った。図 4(a)のように、患者の心内膜側において、提案法により計測された SR の最大値は健常者の値よりも低く、心筋虚血による収縮機能の低下がみられた。また、病態が進行した患者（▲）では心外膜側においても収縮機能の低下がみられた。これは、貫壁方向における虚血領域の広がりを反映していると考えられる。一方、従来法による結果はばらつきが大きく、収縮機能の貫壁方向局所評価は困難であった。開胸ブタ心臓を用いた急性虚血性心疾患モデルにおいても、同様の収縮機能評価を行った。図 4(b)のように、冠動脈の駆血開始から数秒後に、心内膜側において収縮機能の低下がみられた。提案法による結果は、従来法²⁾に比べ、ばらつきが小さかったため、高精度な評価が可能と考えられる。

健常者の心室中隔壁における電氣的興奮に呼応する心筋収縮応答の伝播速度を、提案法により貫壁方向に局所計測した。心電図 R 波近傍で心筋 SR が負から正に変わる時刻を収縮応答時刻として、心臓縦方向に並ぶ多数点において検出し、この方向の伝播速度を推定した。図 5 のように、左

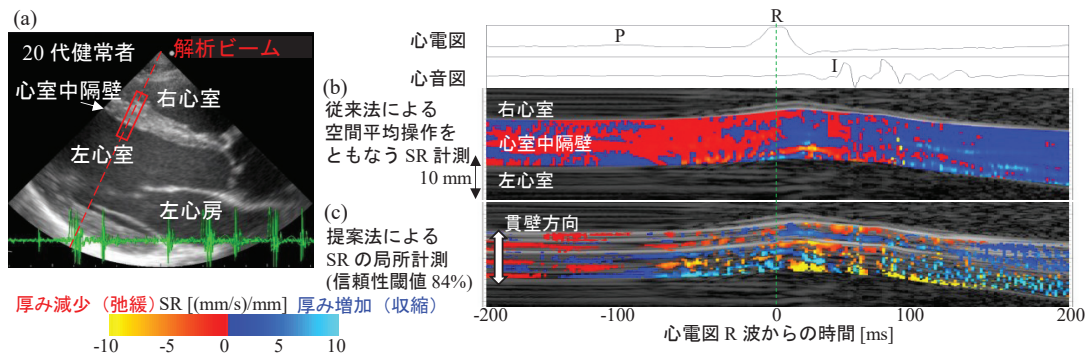


図 3 (a)健常者の心臓超音波断層像および(b)従来法と(c)提案法によって計測した心電図 R 波近傍の時相における心室中隔壁の SR 分布

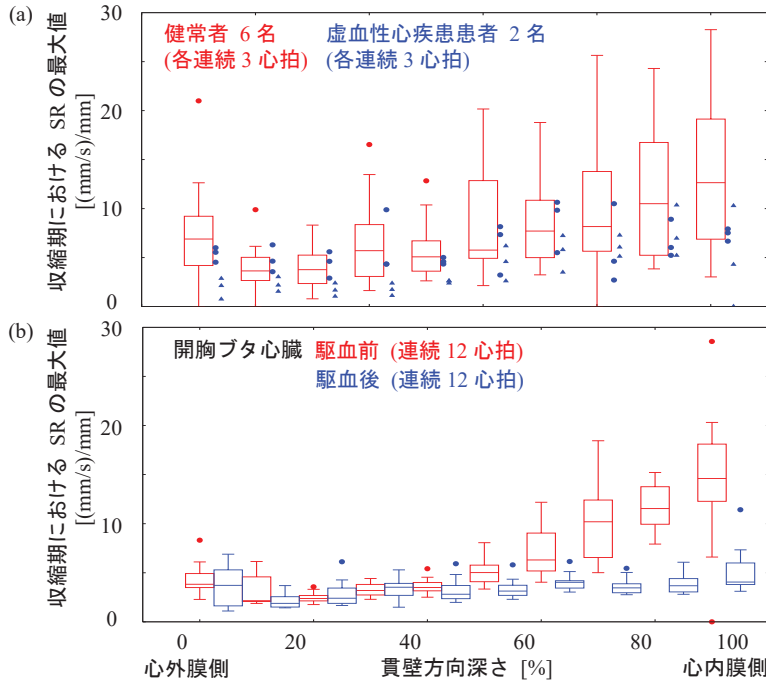


図4 (a)健康者および虚血性心疾患患者と(b)開胸ブタ心臓の駆血前後における心室中隔壁の各貫壁方向深さでの収縮期のSRの最大値

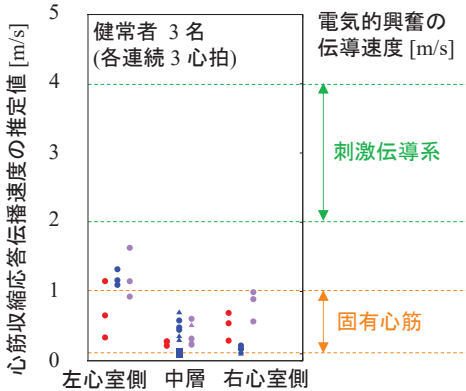


図5 健康者の心室中隔壁における電氣的興奮に呼応する心筋収縮応答の伝播速度

心室側において速い伝播がみられたが、中層および右心室側では遅い伝播がみられた。これは、左心室側では刺激伝導系内の電氣的興奮の伝導が支配的であるのに対し、中層および右心室側では固有心筋内の伝導が支配的であるためと考えられる。虚血性心疾患の診断を目指した心筋の電氣生理学的機能評価では、固有心筋内の電氣的興奮の伝導にともなう収縮応答の伝播速度を計測する必要があるため、提案法による貫壁方向局所計測は上記の評価に有用と考えられる。

6. まとめ

本研究では、心筋SRの超音波計測におけるデジタル信号処理を改善し、貫壁方向局所計測を実現した。心筋の収縮機能や電氣生理学的機能の貫壁方向局所評価が可能な提案法により、虚血性心疾患の定量診断において重要な虚血領域の拡がりを捉えられる可能性が示された。

文献

- 1) J. D'hooge, A. Heimdal, F. Jamal, *et al.*, *Eur. Heart J. Cardiovascular Imag.*, **1** (2000) 154.
- 2) H. Kanai, H. Hasegawa, N. Chubachi, *et al.*, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **44** (1997) 752.
- 3) Y. Obara, S. Mori, M. Arakawa, and H. Kanai, *Ultrasound Med. Biol.*, **47** (2021) 1077.
- 4) Y. Obara, S. Mori, M. Iwai-Takano, M. Arakawa, and H. Kanai, *Ultrasound Med. Biol.*, (2024, in press).
- 5) Y. Obara, S. Mori, M. Arakawa, and H. Kanai, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **69** (2021) 1353.
- 6) Y. Obara, S. Mori, M. Arakawa, and H. Kanai, *Ultrasound Med. Biol.*, **47** (2021) 2768.

修士学位論文要約（令和6年3月）

軟磁性化した負磁歪材料を用いた
バイモルフ型振動発電デバイスの開発に関する研究

阿部 宏恒

指導教員：石山 和志， 研究指導教員：後藤 太一

Research on the Development of Bimorph-Type Power Generation Devices
Using Soft Magnetized Negative Magnetostrictive Materials

Hirohisa ABE

Supervisor: Kazushi ISHIYAMA, Research Advisor: Taichi GOTO

This paper describes the development of a negative magnetostrictive soft magnetic film and its application as a bimorph-type power generation device based on electromagnetic induction. The authors focused on amorphous Sm-Fe films combining soft magnetic properties and a large negative magnetostriction constant λ with in-plane rotating field annealing in particular, a Sm content of 14 at.% enabled us to obtain a minimum coercivity and high negative λ by in-plane rotating field annealing. To fabricate a cantilever for the bimorph-type device, negative magnetostrictive $\text{Sm}_{14}\text{Fe}_{86}$ film and polycrystalline $\text{Fe}_{27}\text{Co}_{73}$ film (positive magnetostrictive) were deposited on the front and back of thin glass substrate, respectively. The cantilever demonstrated a larger output voltage than a unimorph-type device using one side of $\text{Fe}_{27}\text{Co}_{73}$ film. We believe that by increasing the cross-sectional area and the number of coil turns, intermittent operation of small devices is feasible.

1. はじめに

近年、インターネットの発展に伴い IoT(Internet of Things)の普及が進んでいる。IoT デバイスは、駆動時に電源からセンサまでの長い配線が必要であり、電池駆動の場合は交換に手間がかかるというように、電力供給に問題を抱えている。そこで、環境の中に薄く広く存在するエネルギーから微小な電力を収穫する環境発電技術を、IoT デバイス用の電源として応用する検討が進んでいる¹⁾。環境発電の中でも本研究では、逆磁歪式振動発電に着目している。逆磁歪式振動発電デバイスの構造は、非磁性のフレームへ正磁歪材料を接合したユニモルフ型カンチレバーが主流である。これに対し、本研究で提案する発電デバイスは、正磁歪材料の裏面へ負磁歪材料を接合したバイモルフ型カンチレバーである。バイモルフ構造にすることで、正磁歪材料の磁化の増減に伴い負磁歪材料の磁化も増減し、より大きな磁化変化量を得ることが可能である。負磁歪材料を開発することで、ユニモルフ型カンチレバーのフレーム部分の置き換えや、体積の非常に小さな薄膜型デバイスの基板裏面の活用が可能になり発電量が増加するため、逆磁歪式発電デバイスの実用化に近づくと考える。しかし、負磁歪材料は磁歪定数が小さく軟磁気特性の優れない材料が多く、応用例は少ない。そこで、我々は負磁歪材料の中では比較的大きな電気機械結合

係数と、 -10^3 ppm を超える超磁歪を有する Sm-Fe²⁾に着目した。Sm-Fe は非常に大きな結晶磁気異方性により磁化回転が困難であるため、多結晶バルク体での逆磁歪式振動発電への応用は向いていない。しかし、Sm-Fe はスパッタ法により非晶質化し結晶磁気異方性を除去することが可能であるため、微小な応力で磁化が回転する負磁歪軟磁性材料を実現できると考える。そこで本研究では、保磁力・軟磁気特性に着目し開発した負磁歪軟磁性材料の特性と、開発した材料をバイモルフ型発電デバイスへ適用し発電実験を行うことで、バイモルフ型発電デバイスの有用性を検討した結果を述べる。

2. 負磁歪軟磁性材料の開発

Sm-Fe の成膜には、高周波マグネトロンスパッタ装置を使用した。Fe ターゲット上に Sm チップを配置した複合ターゲットの Sm チップ数を変え、Sm 組成を 7~67 at.% の範囲で変化させた。基板には、膜組成、結晶構造、磁化特性の評価用として $6 \times 6 \times 0.15 \text{ mm}^3$ のガラス基板(松浪硝子工業)を用い、試料の膜厚は全て $1 \pm 0.01 \text{ nm}$ とした。スパッタ条件は、投入電力を 200 W、Ar ガス圧を 2.1 Pa、成膜時の基板は水冷とした。膜の表面には、酸化防止を目的として Si_3N_4 を $0.1 \mu\text{m}$ 成膜した。さらに、回転磁界中熱処理により、成膜時に誘導された不均一な異方性や残留応力を除去し、静磁界中熱処理により、一軸磁気異方性の誘導を

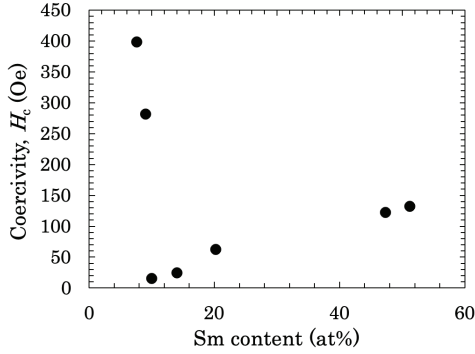


図1 H_c のSm組成依存性

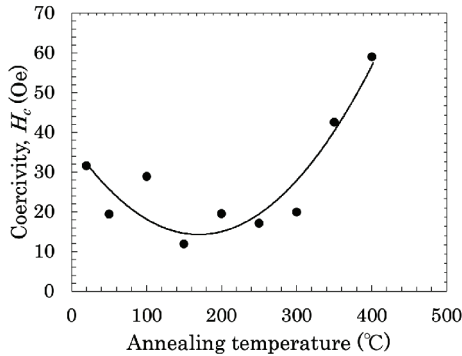


図2 $\text{Sm}_{14}\text{Fe}_{86}$ の H_c の熱処理温度依存性

行った。回転磁界中熱処理、静磁界中熱処理は、3 kOe の磁界中で 50~400 °Cまで各 2 時間ずつ施した。膜の特性評価は、膜組成を走査型電子顕微鏡のエネルギー分散型 X 線分光法により測定し、結晶構造を X 線回折法(XRD)により解析した。磁化および保磁力 H_c は、振動試料型磁力型(VSM)により測定した磁化曲線から評価した。図1に H_c の組成依存性を示す。XRDの回折パターンにて結晶化を確認したSm組成が9 at.%以下の試料では、結晶磁気異方性により H_c は200 Oe以上の大きな値を確認した。Sm組成が11 at.%以上の試料では、非晶質化・微結晶化による低保磁力化に成功した。この結果から、保磁力が小さく飽和磁化が大きなSm組成が14 at.%のSm-Feを最適な組成と断定した。さらに、図2へSm組成が14 at.%の試料の H_c の熱処理温度依存性を示す。 H_c は150 °Cの低温磁界中熱処理時に最小の12 Oeを示し、成膜時に誘導された不均一な異方性の緩和に成功した。その後は結晶化温度に近づくにつれて微細な結晶化が始まり、結晶磁気異方性の影響により H_c が増加していく傾向が見られた。よって、Sm組成が14 at.%の試料に対する150 °Cの低温磁界中熱処理は、軟磁気特性の改善に有効である。

3. バイモルフ型発電デバイスの発電特性

バイモルフ型発電デバイスは、基板片面へ負磁歪軟磁性材料、逆側の面へ正磁歪材料を成膜し構成

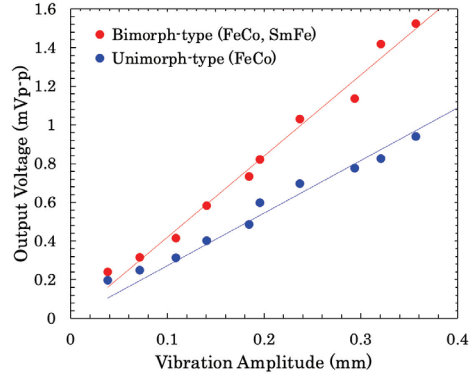


図3 コイル出力の振動振幅依存性

した。本稿では、正磁歪素子に $\text{Fe}_{27}\text{Co}_{73}$ を用いた。10 × 20 × 0.5 mm³ の短冊形状のガラス基板を用い、膜厚は $\text{Sm}_{14}\text{Fe}_{86}$ 、 $\text{Fe}_{27}\text{Co}_{73}$ ともに1 μmに制御した。成膜後、3 kOe、150 °Cの低温で、回転磁界中熱処理と長手方向に対し静磁界中熱処理を、各 2 時間ずつ施した。発電実験は、検出コイルとして全長 12 mm の 1000 ターンコイルを使用した。また、カンチレバーの先端へ 15 g の真鍮を配置し、振動周波数を機械的共振周波数の 81 Hz に制御した。さらに、デバイスへ対し4 Oe のバイアス磁界を印加した。図3にコイル出力の振動振幅依存性を示す。バイモルフ型デバイスのコイル出力はユニモルフ型デバイスよりも大きなコイル出力を示し、最大で 1.6 mV_{P-P} のコイル出力を確認した。この実測結果から見積もった発電量は 2.4 mW/cc であり、小型デバイスの間欠的動作が可能な発電量である。より大きな発電量を得るためには、ガラス基板よりもヤング率の低い基板を選定し、磁歪膜へ対しより大きなひずみを与える必要がある。

4. まとめ

軟磁性化した負磁歪材料を用いたバイモルフ型振動発電デバイスの開発に関する研究を行い、 $\text{Sm}_{14}\text{Fe}_{86}$ に対し 150 °Cの低温磁界中熱処理を施すことで、微小な応力で磁化が回転する負磁歪材料軟磁性材料の開発に成功した。さらに、 $\text{Sm}_{14}\text{Fe}_{86}$ を 1 μm 成膜した裏面へ $\text{Fe}_{27}\text{Co}_{73}$ を 1 μm 成膜したバイモルフ型発電デバイスのコイル出力は、 $\text{Fe}_{27}\text{Co}_{73}$ のみを 1 μm 成膜したユニモルフ型発電デバイスよりも大きなコイル出力を示した。

以上より、軟磁性化した負磁歪軟磁性材料を用いたバイモルフ型発電デバイスの逆磁歪式振動発電への有用性を明らかにした。

文献

- 1) K. Takeuchi: J. Surf. Finish. Soc. Jpn., 67, 334 (2016).
- 2) A. E. Clark and H. Eda: "Giant magnetostrictive material", p.262 (Nikkan kougyou shinbunsha, Tokyo, 1995)

修士学位論文要約（令和6年3月）

ACDC コンバーターにおける交流電圧変動および負荷変動に対する ロバスト性向上技術に関する研究

石川 慧亮

指導教員：遠藤哲郎

A Study on Technology to Improve Robustness of ACDC Converters against AC Voltage Fluctuations and Load Fluctuations

Keisuke ISHIKAWA

Supervisor: Tetsuo ENDOH

This study examines a control method to suppress overcurrent during grid accidents in a circuit system with power supply and demand. In addition, we confirm the grid point voltage fluctuation against load fluctuation, which has been handled by the conventional control method. Using the circuit simulation software PLECS, a comparison was made between the proposed control and the studied control in the event of a grid accident and load fluctuation. The proposed control was able to suppress the AC overcurrent in the case of a grid accident, and the proposed control was able to suppress the interconnection point voltage fluctuation in the case of load fluctuation. In addition, a small-scale experiment was conducted to study the PoC measurement environment, and an actual measurement environment was constructed.

1. はじめに

地球温暖化抑制のため、2050年カーボンニュートラル決定された。これまで、電力需給バランス維持の中心的役割を担ってきた火力発電が全廃となるため、バッテリーなどを活用した需給バランス維持が重要となる。しかし、それに関わる社会コストが膨大となるため、データセンタが有する電力変換器とバッテリーを活用して需給バランス維持に活用する動きがはじまりつつある。現在、データセンタの電源はダイオード整流であるが、コンバータ化すると、再生可能エネルギーPCSと同様に系統事故時の交流過電流が問題となる。¹⁾

そこで、本研究では、電力需給の双方向性を持つ回路方式において、系統事故時の過電流を抑制する制御方式を検討する。また、従来制御方式において対処できていた負荷変動に対して連系点電圧変動を確認する。

2. 双方向電力供給回路のロバスト性向上を目指した提案制御のコンセプト

現在、系統に連系するコンバーターの制御方式として広く活用されているのはベクトル制御である。²⁾

図1に系統に連系するコンバーターの典型的な制御方式である、ベクトル制御の制御ブロックを示す。

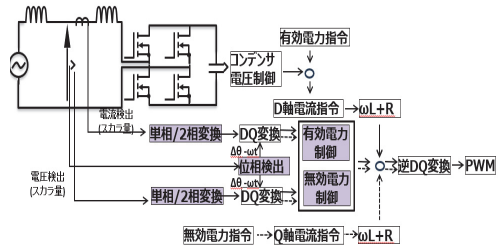


図1 従来制御方式(ベクトル制御)の制御ブロック

ベクトル制御は回転行列を用いた座標変換により有効電力/無効電力独立制御を実現するが、単相ACDCコンバーターではスカラー量からベクトル量の座標変換のために5msの制御遅れが発生するため、それが過電流の原因であると考えた。

ここで本研究ではこの5msの遅れ時間を要する座標変換と同じく遅れ時間を要する位相検出を排除した簡易有効無効電力制御を提案する。

3. シミュレーションでの提案制御方式の検討

回路シミュレーションソフト PLECS を用いて、系統事故発生時と負荷変動時における提案制御と検討制御の比較を行った。

系統事故は背後電圧の瞬時電圧低下と位相跳躍に絞り検討を行った。瞬時電圧低下の中でも近傍事故である瞬停発生時の交流過電流を比較した。また、瞬停の発生位相が異なることにより交流過電流が変化すると考えられるため、瞬停の開始位相を背後電

圧を基準に0度から350度まで10度刻みでシミュレーションを行った。

シミュレーション結果としては、提案制御で交流過電流の抑制が確認でき、当初目標通りの抑制が確認できた。

次に位相跳躍についてのシミュレーション結果を示す。また、瞬停と同様に、位相跳躍の発生位相が異なることにより交流過電流が変化すると考えられるため、瞬停の開始位相を交流電圧を基準に0度から350度まで10度刻みでシミュレーションを行った。

シミュレーション結果としては、提案制御で交流過電流の抑制が確認でき、当初目標通りの抑制が確認できた。

次に負荷変動についてのシミュレーション結果を示す。負荷変動発生時の連系点電圧変動要因は連系インピーダンスの電圧変動であるため、本研究では負荷変動時の連系インピーダンス電圧変動により連系点電圧変動を評価する。

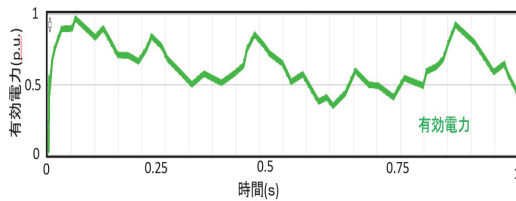


図2 負荷変動時の有効電力変動³⁾

図2に示すように従来制御、提案制御で負荷変動を発生させた。図2の有効電力変動は先行研究である文献³⁾中で用いられている有効電力変動をトレースし、時間を千分の一に圧縮したものである。シミュレーション結果としては、提案制御方式で連系点電圧変動が抑制できていることが確認でき、当初目標通りの抑制が確認できた。

4. 小規模実験によるPoCでの測定環境の検討

実測に向けて小規模実験によるPoCでの測定環境の構築を検討し、実測環境の電圧を決定した。また、利用機器や測定装置を考慮した。

実測環境は図3のように構築した。

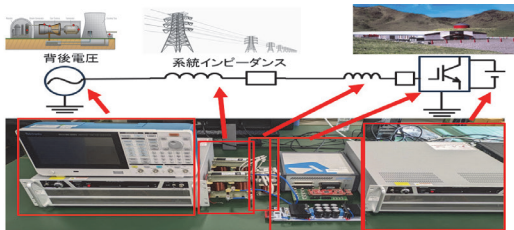


図3 小規模実験によるPoCの構築環境
実測時の測定条件は図4に示す。

交流電圧	1.0p.u.	交流電圧	10Vrms
交流電流	1.0p.u.	交流電流	2.66Arms
リアクトル	0.1p.u.	リアクトル	1.2mH
		直流電圧	16V

図4 小規模実験によるPoCでの構築環境の実電圧

今後、以上の条件下で実測を予定している。

5. まとめ

双方向電力供給回路における従来制御方式における問題点である制御遅れを排除した簡易有効無効電力制御を提案し、系統事故と負荷変動発生時での比較をシミュレーション上で行った。

系統事故時では提案制御で交流過電流の抑制を確認でき、負荷変動発生時では提案制御で連系点電圧変動の抑制を確認できた。

小規模実験によるPoCでの測定環境の検討を行い、実測環境の構築を行った。

文献

- 1) 第55回調整力及び需給バランス評価等に関する委員会：「再エネ主力電源化」に向けた技術的課題及びその対応策の検討について(2020)
- 2) 直井伸也 他, ”インバータ電源で電力供給する自立マイクログリッドインバータ電源の制御方式”, IEEE Transactions on Power and Energy., Vol. 137, No.6, pp426-433(2016)
- 3) Shuji Katoh, Shinya Ohara and Tomomichi Itoh “Technologies for Mitigating Fluctuation Caused by Renewable Energy Sources”, The 2014 International Power Electronics Conference

修士学位論文要約（令和 6 年 3 月）

電力設備の部分放電監視用 TEV センサの現場環境下での適用性評価に関する研究

梅村 竜吾

指導教員：斎藤 浩海， 研究指導教員：八島 政史

Study on Evaluation of Applicability of TEV Sensor for Monitoring Partial Discharge of Electric Power Facilities under Field Environment

Ryugo UMEMURA

Supervisor: Hiroumi SAITOH, Research Advisor: Masafumi YASHIMA

Many of Japan's electric power distribution facilities are aging. Thus, there are high expectations for a deterioration diagnosis method using TEV sensors. In this study, we aimed to evaluate the field applicability of TEV sensors and proposed the optimal placement of TEV sensors and the basis for a partial discharge (PD) diagnostic algorithm. To this end, we examined the ability of multiple TEV sensors to estimate the location of the PD source when placed in actual facilities, and to identify the PD signal in a field environment where electromagnetic noise is present. As a result, we evaluated the applicability of the TEV sensors in the field environment and summarized their usefulness.

1. はじめに

現在の日本では、多くの電力流通設備が高齢化しており、絶縁性能の劣化による事故等の諸問題が顕在化することが懸念されている¹⁾。本研究では、設備の劣化状態を定量的かつ効率的に把握できる新たな劣化診断手法として TEV (Transient Earth Voltage) センサによる部分放電 (Partial Discharge, PD) 測定の実用化を目指している^{2), 3)}。本研究では、現場環境下を想定した実験を行い、TEV センサの最適配置、部分放電診断アルゴリズムの基礎を提案することで現場環境下の適用性を評価したので報告する。

2. TEV センサの部分放電信号の検出成分の解明

先行研究で PD 信号の検出成分には電磁波、面電流、接地線電流が含有されることが分かっている⁴⁾。今回の検討では、それに加え高周波度軸ケーブル成分も TEV センサが検出することを確認し、その周波数成分について考察を行った。その結果、各周波数成分を伝搬形態ごとに大別し、実設備における TEV センサの検出概念 (図 1) を推測した。

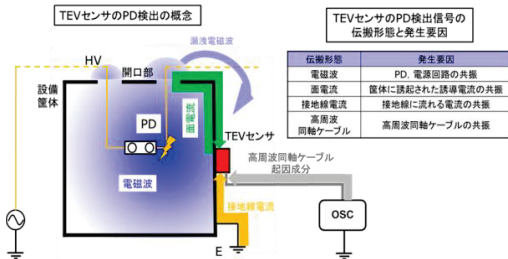


図 1 実設備における TEV センサの PD 検出概念

3. 実設備を想定した部分放電源の発生箇所推定

複数の TEV センサを活用して、実設備を想定した PD 源の発生箇所推定を検討した。TEV センサの PD 検出信号の検出時間、検出強度、周波数成分の構成比に着目して、その検出信号の差異を PD 源の発生箇所推定への活用を試みた。PD 源の発生箇所推定として、PD 源の内外判定、PD 源が内部の場合の位置推定、PD 源が外部の場合の到来方向推定の 3 つの検証実験を行った。

その結果、PD 源の内外判定は可能、PD 源が内部の場合の位置推定は、PD 源に近い開口部を推定する程度は可能、PD 源が外部の場合の到来方向推定は、今回水平方向のみを検討した場合に PD 源に近い方向を推定可能であると推測した。また、検出信号の差異を比較することの有用性を確認した。表 1 に各判定内容と、TEV センサの PD 信号の着眼点における特徴を示す。また、これらの実験を踏まえて PD 源の発生箇所推定手法の提案を行った。

表 1 PD 検出信号の各着眼点における特徴

		検出時間	検出強度	周波数成分の構成比
筐体 内外判定	外部	PD源に近い TEVセンサが早い	PD源に近い TEVセンサが強い	面電流成分の強度高い
	内部	開口部に近い TEVセンサが早い	開口部に近い TEVセンサが強い	開口部近傍のTEVセンサで 電磁波成分の強度高い
PD源が内部の場合の 位置推定		PD源に近い 開口部近傍の TEVセンサが早い	PD源に近い 開口部近傍の TEVセンサが強い	PD源が筐体の下部にあるほど 電磁波成分の強度高い
PD源が外部の場合の 到来方向推定		PD源に近い TEVセンサが早い	PD源に近い TEVセンサが強い	PD源に近いTEVセンサほど 高周波の電磁波成分の強度高い

4. 現場環境ノイズ下の部分放電識別

TEV センサは現場における電磁ノイズ (現場環境ノイズ) をも検出する可能性があるため、筐体内部で

検出した PD 信号の識別を行う必要がある。今回は実現環境で測定を行った現場環境ノイズと実験室内で針-平板電極にて人工的に発生させた PD 信号を比較することで現場環境下において PD 信号の検出の可否を検討した。

その結果、現場環境ノイズと PD 信号の周期性と周波数成分に大きな違いを確認した。また周期性と周波数成分の違いを活用して、PD 信号と現場環境ノイズのピーク強度を考慮した現場環境下の PD 信号識別手法(図 2)を提案した。また、現場環境ノイズに対応したパスフィルターを適用することで PD 信号の識別の可能性を広げることが可能であることを確認した。

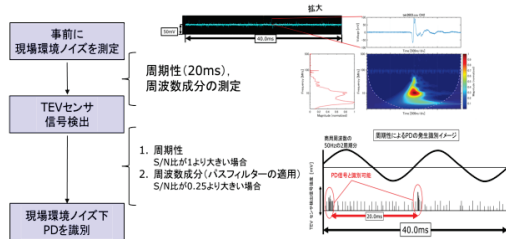


図 2 現場環境下の PD 信号識別手法

5. 実設備への適用手法の提案

<5.1> センサの配置方法

3 章より得られた知見より、TEV センサの判定内容、個数、配置箇所について表 2 に示す。PD の発生の判定時には、TEV センサを 1 つ以上用いて強度が大きい場所に配置することが望ましい。また、PD 源の筐体内外判定時には、TEV センサを 2 つ以上用いて、開口部近傍と他のいずれかの面上に配置することで検出信号を比較することが望ましい。PD 源が筐体内部にある場合の位置推定時には、TEV センサを 2 つ以上用いて、各開口部近傍に配置することで PD 源に近い開口部の特定することが望ましい。最後に、PD 源が筐体外部にある場合の到来方向推定時には、TEV センサを面上に 3 次元的に配置することが望ましい。

表 2 判定内容、個数、配置箇所の関係

		TEV センサの数			最適配置
		1	2	3	
判定内容	PD の発生	○	○	○	
	筐体内外判定	×	○	○	
	位置推定 (PD源内部)	×	○	○	
	到来方向推定 (PD源外部)	×	△	○	

○: 1回の測定で判定可能
 △: 複数回の測定で判定可能
 ×: 測定不可能

<5.2> 部分放電診断アルゴリズムの提案

図 3 にこれまでの知見を基に作成した現場環境下での TEV センサによる PD 診断アルゴリズムを示す。まず、TEV センサが現場環境下の信号を検出し、現場環境ノイズのみ、もしくは PD が含まれているかを、周期性、周波数成分の差異とパスフィルターを用いて識別する。PD が含まれている場合は、TEV センサの PD 検出信号の特徴を活用して PD 源の発生箇所推定を行うために、筐体の内外判定、到来方向推定、位置推定を行う。このようなアルゴリズムでの現場環境下の TEV センサの適用手法を提案した。

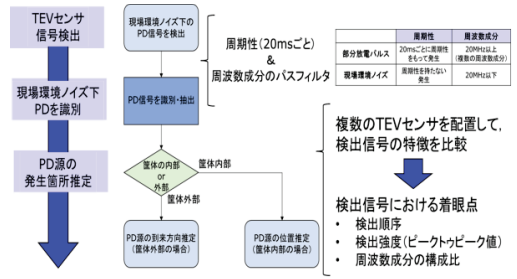


図 3 部分放電診断アルゴリズム

6. まとめ

本検討では、TEV センサの現場適用性を評価するために、TEV センサの信号の検出の解明、PD 源の発生箇所推定、現場環境下の PD 信号の識別手法について検討を行った。その結果、現場環境ノイズ下での PD 信号の識別手法、PD 源の発生箇所推定手法を検討することで、センサの最適配置、PD 診断アルゴリズムの基礎の提案を行った。このことより、TEV センサの現場適用性を評価し、その有用性について整理できたと考えられる。

文献

- 1) 東北電力：「託送供給等収支の平成 28 年度事後評価について」、p.23 (2018). (https://www.emsc.meti.go.jp/activity/emsc_electricity/pdf/028_04_00.pdf)
- 2) 吉積弘将, 古賀嵩章, 小迫雅裕, 匹田政幸, 藤井祐樹, 中村勇介, 長 広明: 「部分放電に起因する過渡接地電圧信号の低周波成分のメカニズムの基礎的検討」, 平成 30 年度電気学会全国大会, 6-054, pp.70-71 (2018)
- 3) 吉積弘将, 小迫雅裕, 匹田政幸, 藤井祐樹, 中村勇介, 長 広明: 「過渡接地電圧法による部分放電信号の低周波成分伝搬メカニズムの考察」, 電学論 A, Vol.139, No.3, pp.154-160 (2019)
- 4) 三浦拓朗, 白石幸範, 八島政史: 「過渡接地電圧法による部分放電信号の低周波成分伝搬メカニズムの考察」, 誘電絶縁材料/電線・ケーブル合同研究会, DEI-21-082, EWC-21-020, pp.13-18 (2021)

修士学位論文要約（令和 6 年 3 月）

低電力デジタル CIM を用いた BCNN アクセラレーターのための差動 STT-MRAM に関する研究

王 勇成

指導教員：遠藤 哲郎

Research on Differential-pair-type STT-MRAMs for BCNN Accelerator Based on Low-power Digital CiM Architecture

WANG Yongcheng

Supervisor: T. Endoh

Recent deep learning artificial neural networks technology makes mobile devices become more and more intelligent. However, the tremendous amount of data and frequent data transfer between memories and processing elements during processing bring high power consumption to chips. To solve this problem, using Computing in Memory (CiM) architecture to design chips is an effective way. In many kinds of memories, STT-MRAM is one of the most promising emerging memories because of its non-volatile characteristic compared with SRAM and DRAM and high speed, high density and high reliability compared to other non-volatile memories. However, most designs of STT-MRAM based CiM architecture are using analog computing, which faces many challenges. This thesis proposes CiM cells using differential type STT-MRAM, which can be used for digital computing of BCNN. Through the Spice simulation, the proposed CiM cells' function is verified and the power is calculated. What's more, the power gating time is also investigated to find when the STT-MRAM based CiM cells' power can be lower than that of SRAM based CiM cell.

1. Introduction

In recent years, intelligent mobile devices using AI technology have begun to be widely used on a large scale. However, the massive amount of data also brings power consumption challenges to mobile devices, which has become a developing obstacle of mobile devices' AI chips. To decrease the power consumption of AI chips, one effective solution is the Computing in Memory (CiM) architecture, which greatly reduces the data transfer that frequently seen in conventional von Neumann architecture, and thus improving the energy efficiency of the hardware system.

Performance index	FeRAM	PCRAM	ReRAM	STT-MRAM	NAND flash
Cell size (SLC*)	15 ~ 35F ²	4 ~ 19F ²	6 ~ 10F ²	6 ~ 14F ²	4F ²
Operation voltage	~ 1.8 V	1.5 ~ 1.8 V	3.3 ~ 6.5 V	0.8 ~ 1.8 V	~ 20 V
Write current	~ 10 ⁻⁶ A**	~ 10 ⁻⁴ A	~ 10 ⁻⁴ A	~ 10 ⁻⁵ A	~ 10 ⁻⁷ A
Write time	< 10 ns	~ 100 ns	~ 50 ns	< 10 ns	~ 1 ms
Read time	< 5 ns	< 5 ns	< 5 ns	< 5 ns	~ 100 μs
Retention	> 10 yrs	> 10 yrs	> 10 yrs	> 10 yrs	> 10 yrs
Endurance	10 ¹³	10 ⁹ ~ 10 ¹²	~ 10 ⁶	10 ¹⁵	~ 10 ⁵

Fig.1 Benchmarking of non-volatile memories. [1]

As for the memories, the non-volatile memories are a useful type to eliminate the static current when devices are standby. Among the non-volatile memories, Spin-Transfer-Torque Magnetic Random Access Memory (STT-MRAM) has many good performances compared with other non-volatile memories, as shown in Fig. 1.[1] Therefore this thesis uses STT-MRAM to design the CiM cells and research their power performance.

2. Challenges of STT-MRAM based CiM design

From the computation mode, CiM technology can be divided into analog CiM (ACiM) and digital CiM (DCiM), Fig. 2 shows the common structures of ACiM and DCiM.[2] ACiM utilizes the analog characteristics and signal modulation capability of the device, combined with the structural characteristics of the device array, to realize basic arithmetic operations such as multiplication, addition, etc., so as to complete the analog operations on the CiM cell array. DCiM is a circuit that integrates digital devices with logic functions such as XNOR gates, full adders, etc. in memory, thus implementing logic computation within the memory. ACiM exhibits excellent density, energy-efficiency, speed performance as well as

adaptability to neural network computation. However, ACiM also faces many challenges, including ADC/DAC overhead, problems made by memory device characteristics, low precision, which make ACiM architecture-based hardware hard to be massively produced. While DCiM do not need the data conversion, meanwhile has a higher reliability and precision than ACiM, therefore DCiM has been widely researched in recent two years' CiM research.

For the STT-MRAM based CiM design, there are some challenges including limited Tunnel Magnetic Resistance Ratio (TMRR), Processing Voltage Temperature Variations (PVT) and nonlinear effects from peripheral readout circuits. As can be seen, these challenges are particularly serious in ACiM that uses STT-MRAM device features for logic operations or peripheral circuits for analog computation. DCiM, on the other hand, can avoid to a certain extent the impact on the circuits caused by the variation of MTJ device parameters. Therefore, it is valuable to research the STT-MRAM based CiM cell using digital computation mode.

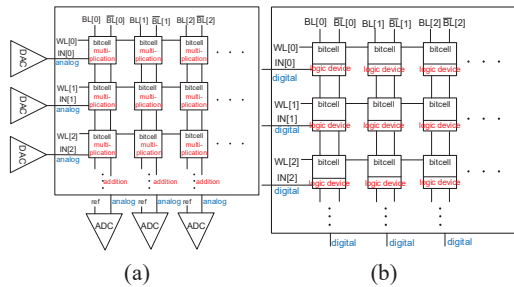


Fig. 2. Basic structure of (a) ACiM and (b) DCiM. [2]

3. Structure analysis of DCiM STT-MRAM cell

To design a DCiM structure cell, it is important to make the data stably stored in the cell. One way to realize this is making the cell bistable structure to form a latch, like that of SRAM. In the LSI design of STT-MRAM, there is one type whose structure is bistable, named differential type STT-MRAM. Fig.3 shows a common 4 Transistors 2 MTJ (4T2M) differential type STT-MRAM cell. [3] It has the same writing and readout process with SRAM, while the

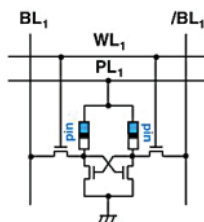


Fig. 3. Schematic of 4T2M cell. [3]

written data can be stored in MTJ so that the power supply can be shut off to eliminate the static power in standby. Using the differential type STT-MRAM, the cell can realize digital computing.

One common way to realize digital computing is putting the logic gate into the cell. It is found that for a binarized Convolutional Neural Network (BCNN) whose weight and input data are binarized as -1 and +1, the multiplication is the same as XNOR logic operation in the hardware because -1 is indicated as 0 in the circuit. Therefore, if the memory cell synthesizes with a XNOR operation part as a new cell, it is possible to realize BCNN's multiplication of weight and input data. As shown in Fig. 4, the weight data will be written into the cell and stored in the MTJ in advance, when the input data is going to be input to the cell, weight will be restored from the MTJ to the storage nodes and multiply with input, the output will be output outside. According to the former analysis, this thesis proposes differential type STT-MRAM based CiM cells, verifies their function and calculates their power through Spice simulation.

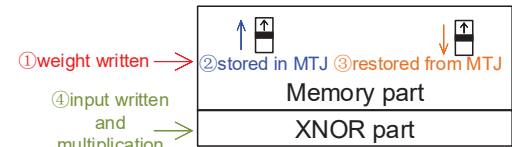


Fig. 4. Structure and working steps of proposed differential type STT-MRAM based CiM cell.

4. Conclusion

This thesis proposes differential type STT-MRAM based CiM cells. Through the Spice simulation, the function of proposed cells is verified, and the estimation of array level power shows that they can realize lower power than SRAM based CiM if doing power gating during standby.

References

- [1] T. Endoh, et.al., "An Overview of Nonvolatile Emerging Memories— Spintronics for Working Memories," in IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, vol. 6, no. 2, pp. 109-119, June 2016.
- [2] Zhou Zheng, Huang Peng, Kang Jin-Feng. Non-volatile memory based in-memory computing technology. Acta Phys. Sin., 2022, 71(14): 148507. doi: 10.7498/aps.71.20220397
- [3] Ohsawa T., Iga F., Ikeda S., Hanyu T., Ohno H. and Endohh T. Ext. Abstr. Int. Conf. Solid State Devices and Materials, 2011 959

修士学位論文要約（令和 6 年 3 月）

広帯域低振幅振動に対応した振動発電機構に関する研究

上倉 拓郎

指導教員：石山 和志

Vibration power generation system for low-amplitude broadband vibration

Takuo KAMIKURA

Supervisor: Kazushi ISHIYAMA

We propose a novel system for generating vibration power using tubular structures as an alternative to cantilevers. While the cantilever is effective for narrowband vibration, the structure of this system is effective for broadband vibration. To prove the effectiveness of this structure, we measured the change in magnetic properties of the composite amorphous ribbon with and without compressive stress applied and the power generation properties under vibration with a low amplitude and several frequencies. In the measurement of the magnetic properties, the change in magnetic flux density tended to increase as the strain increased. In the measurement of the power generation characteristics confirmed that power was generated even at a vibration of 500-1000 Hz controlled by a small strain of 45 ppm, and the change in magnetic flux density was independent of frequency. The theoretical and experimental values from the two experiments were consistent, confirming that the inverse magnetostriction effect was responsible for the power generation. Therefore, we conclude that the novel structure for generating vibration power using composite amorphous ribbons is effective for low-amplitude broadband vibration.

1. はじめに

近年、Society 5.0 に向けて IoT デバイスが急速に普及している。それに伴い、IoT デバイスの動力源である電池の交換や廃棄に関する諸問題がネットワーク社会における大きな課題とされている¹⁾。そこで、エネルギーハーベスティング技術²⁾は、日常に存在する希薄なエネルギーを収穫して電力に変換できるとして期待されている。中でも振動発電は汎用性が高く、片持ち梁構造等を用いた方式が提案されてきた。しかし、片持ち梁構造は小さな加振力からも発電することができる一方で、発電可能な周波数帯域は狭い。そこで、本研究では広帯域低振幅振動に対応した筒構造を提案し、その有用性を示す。

2. 広帯域低振幅振動に対応した筒構造の提案

本研究では片持ち梁構造に代わる新しい振動発電機構として図 1 に示すような筒構造を提案する。筒状に巻いた磁歪材料の周りを樹脂でコーティングした試料で、中心部には逆磁歪式振動発電で必須となるバイアス磁界を印加するための磁石を挿入している。発電する際は、周囲にコイルを巻いた試料に対して軸方向に応力が印加・除荷されるような振動を加える。振動による応力が加わると逆磁歪効果によりコイル内の磁束が時間変化し、ファラデーの電磁誘導の法則により電圧が出力される。

また、筒構造を構成する材料として 2605HB1M(プロテリアル製)と紫外線硬化樹脂を採用し、それらの複合

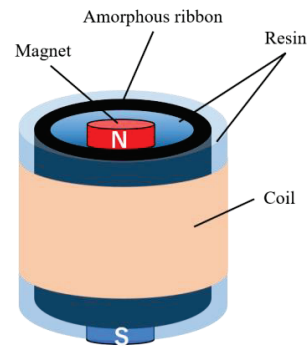


図 1 筒構造模式図

材料を用いて発電を行った。

3. 筒状試料の磁気特性

磁気特性の測定は、BH ループトレーサーを用いて行い、試料の軸方向に圧縮応力を印加した状態で測定できるようにした。圧縮応力が印加された状態の試料に正弦波交流磁界を印加すると、磁束の時間変化に伴い、検出コイルには電圧が発生する。この電圧から磁束密度を算出し、図 2 に示すような BH 曲線を得た。歪量はアモルファスリボンと樹脂のヤング率と断面積から算出している。歪量が増えていくにつれて BH 曲線が緩やかになっていく様子がわか

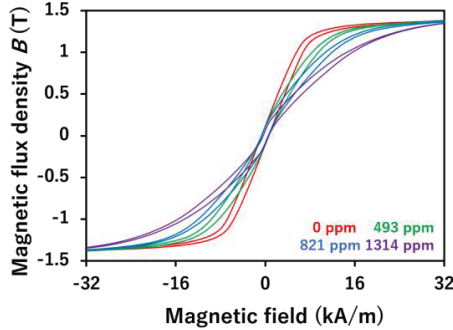


図2 圧縮応力印加時のBH曲線

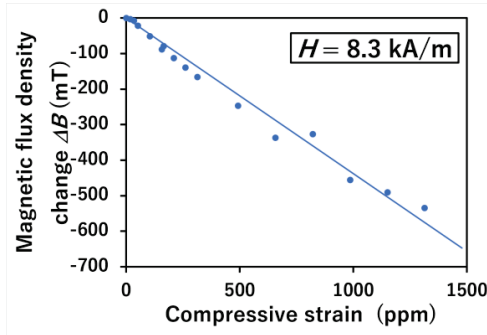


図3 歪量と磁束密度変化量

る。

また、最も磁束密度変化量が大きくなる 8.3 kA/m に注目して歪量と磁束密度変化量の関係性を示すと図3のようになる。歪量が増えるにつれて磁束密度変化量が線形に増加していく様子がわかり、1314 ppm では 534 mT の磁束密度変化量となった。

4. 発電特性評価

発電実験では図4の装置構成を用いて、治具と加振機の間を試料を挟み、軸方向に圧縮応力がかかるように 500-1000 Hz の振動を加えた。その際、レーザードップラー変位計(LDV)を用いて試料の歪量を 45 ppm に制御した。また、試料中心の磁石によりBH曲線から求めた最適なバイアス磁界 8.3 kA/m をアモルファスリボンに印加した。

測定結果は図5のようになり、700 Hz の振動下で 45 ppm の歪量に加わった際 260 mV_{rms} の電圧が出力された。また、出力電圧を積分すると 18 mT の磁束密度変化の磁束密度変化量と算出された。この値は磁気特性から求める理論値と一致しており、静的な磁気特性から動的な発電量を推定できるとわかった。さらに、歪量を一定に制御した場合、磁束密度変化量は周波数を変動させてもほぼ同様の値を取っており、発電可能な周波数の広帯域化を確認した。

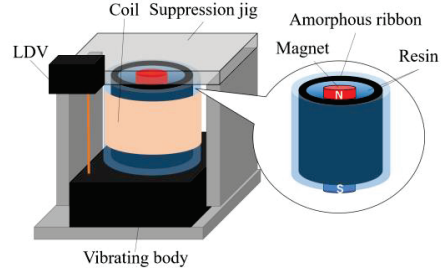


図4 発電実験系

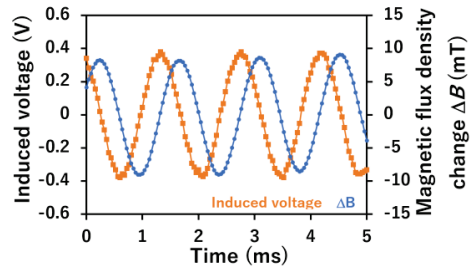


図5 出力電圧と磁束密度変化量

5. 結論

本論文では、IoT デバイスの動力源として振動発電に注目し、従来手法では活用されてこなかった広帯域低振幅振動に対応した新しい振動発電機構を提案した。その有効性を示すために、筒状試料の磁気特性と発電特性の測定を行った。磁気特性では、圧縮応力を加えたときに磁束密度の減少が見られ、圧縮歪量との関係性が示された。発電特性では、700 Hz の振動下で 45 ppm の圧縮歪量を加えられた際に 19.2 μW とセンサなどのデバイスを運用可能な電力を得た³⁾。2つの実験から磁気特性より求める理論値と発電実験の結果が一致したことから逆磁歪効果により発電されたと結論付け、今後は静的な磁気特性から動的な発電量を推定できるようになったといえる。また、磁束密度変化量が周波数に依存しないことを確認し、発電可能な周波数の広帯域化を達成した。

文献

- 1) T. Ueno: *J. Appl. Phys.*, **89**, 82, (2020).
- 2) K. Takeuchi: *J. Surf. Finish. Soc. Jpn.*, **67**, 334, (2016).
- 3) T. Higashino, A. Uchiyama, S. Saruwatari, H. Yamaguchi and T. Watanabe: *Proc. of 39th IEEE Int. Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS 2019)*, 1787, (2019).

修士学位論文要約（令和6年3月）

DCDC コンバータの小型化・高耐圧化に関する研究

工藤啓介

指導教員：遠藤哲郎

Study on miniaturization and high breakdown voltage of DCDC converters for electric vehicles

Keisuke Kudo

Supervisor: Tetsuo ENDOH

In recent years, the power consumption of 14V system equipment in automobiles has increased significantly due to the increasing performance of automobiles and the rapid spread of electric vehicles (EVs) in society. In addition, the voltage of on-board batteries is becoming higher in order to reduce wiring size and charging time. Therefore, there is a strong demand for smaller size and higher voltage for the isolated DC-DC converters that are installed to supply power to these devices and are responsible for bucking down the voltage from the high-voltage battery. In this study, GaN on Si power devices, which have recently become available with higher breakdown voltages and excel in high-speed switching performance, were applied to DC-DC converters to significantly increase the operating frequency to 2 MHz and to achieve an input voltage of 800 V.

1. はじめに

近年、自動車の高性能化や電気自動車(EV)の急激な社会への普及に伴い、自動車の14V系統の機器の消費電力が大幅に増加している。また、配線の小型化と充電時間の短縮のため、車載バッテリーの電圧がより高電圧になっている。このため、これらの機器に電力を供給するために搭載される、高電圧バッテリーからの降圧を担う絶縁型DC-DCコンバータに対して、小型化・高電圧化が強く求められている。現在のDC-DCコンバータの体積は受動素子やノイズ抑制フィルタの体積が大きく、これらの小型化のためには高周波動作化が有効となる。しかし周波数を増加させるとスイッチング損失が増加してしまうことに加え、従来使用されていたSiパワーデバイスでは材料特性の限界から動作周波数が100kHz程度までに限られていた¹⁾。そこで本研究では、近年高耐圧化も進んでおり、高速スイッチング性能に優れたGaN on SiパワーデバイスをDC-DCコンバータに適用し、動作周波数を2MHzまで大幅に引き上げ、入力電圧の800V化を検討した。これによりパワーデバイスや受動素子の小型化に加え、AMラジオ周波数帯域を超えることによるラジオノイズフィルタを削減することができ、回路全体の大幅な小型化と高耐圧化の両立が可能である。一方でGaN on Siパワーデバイスは近年開発されたデバイスであることから、DC-DCコンバータにおいては2MHzでの自動車向け定格動作と、GaN on Siパワーデバイスを用いた800V入力の降圧動作はこれまで報告されていなか

った。

従って本研究では、GaN on Siパワーデバイスを適用した絶縁DC-DCコンバータを試作して2MHz動作の検証を実機にて行い、2MHzという高周波動作化に必要な回路・磁気技術に関する課題を抽出し、GaN on Siパワーデバイスを用いたDCDCコンバータにおける800V入力時の動作検証を行った。

2. GaN on Si 適用 DC-DC コンバータの製作及び 2MHz 動作評価

出力密度を現在製品の2倍程度である4.2W/ccを目標とした、2MHz動作可能と考えられるGaN on Si適用の絶縁DC-DCコンバータを試作し、2MHz動作評価を行った。図1に試作した絶縁DC-DCコンバータの主回路図を示す。動作評価の結果、試作した絶縁DC-DCコンバータにおいて、2MHzにおける降圧動作を実証することが出来た。一方で目標としていた動作条件を全て満たすことが出来ず、これらの原因として昇圧リアクトルのキュリー温度以上の発熱、負荷電流に比例した出力電圧の低下といった課題が抽出された。

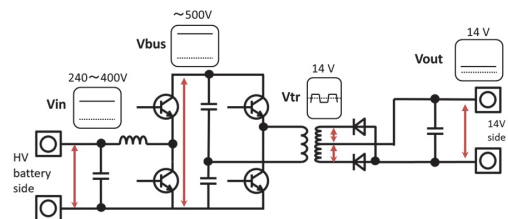


図1 製作した絶縁DC-DCコンバータ回路図

3. 2MHz 動作時に生じる課題に対する検討及び対策技術の開発

動作評価によって抽出された、2MHz 動作時に生じる課題に対する検討及び対策技術の開発を行った。

昇圧リアクトルのキュリー温度以上の発熱に対しては、昇圧リアクトルの再選定を行った。リアクトル部品において交流抵抗と直流抵抗はトレードオフの関係であるため、交流抵抗と直流抵抗を低くすることが可能な巻き線一体型リアクトルの適応を行った。これを測定したところより、温度が抑えることを確認した。

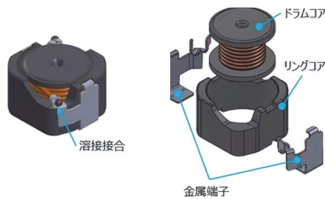


図2 本研究適応巻き線一体型リアクトル²⁾

負荷電流に比例した出力電圧の低下に対しては、トランス漏れインダクタンス及び整流回路配線インダクタンスによって整流回路の電流経路の切り替わりに遅延が生じることで出力電圧が低下してしまうことをシミュレーションにおいて確認した。これに対してトランス漏れインダクタンス及び整流回路配線インダクタンスは先行研究で最適化を行っており、これ以上の削減が困難であることから、本研究で採用していた巻き線比を 12:1 から 9:1 に変更することを検討した。

4. 800V 入力 DCDC コンバータの製作及び動作試験

図 3 に示す 1200V 耐圧 GaN on Si パワーデバイスを適応した 800V 入力可能な DCDC コンバータの製作を行い、スイッチング試験を行った。



図 3 本研究適応 1200V 耐圧 GaN on Si パワーデバイス³⁾

図 4 に示す 800V 入力 DCDC コンバータにおいてスイッチング特性を調べる試験であるダブルパルス試験を行った。その結果、本研究適応 GaN on Si パワーデバイスは 800V でのスイッチングが可能であることが分かった。

5. まとめ

本研究では、試作した高速高周波動作可能な GaN on Si パワーデバイスを適用した DC-DC コンバータの 2MHz 動作評価を行い、2MHz 動作における昇圧リアクトルのキュリー温度以上の発熱、負荷電流に比例した出力電圧の低下の課題を抽出した。これら課題に対する対策として、巻き線一体型リアクトルとトランスの巻き線比変更の検討を行った。

また、800V 入力 DC-DC コンバータを製作し、スイッチング試験を行った。これにより、入力 800V 時のスイッチングが可能であることを確認した。

本研究により、今後の車載 DC-DC コンバータの小型化・高耐圧化に関する技術的なブレークスルーに貢献するものと考えられる。

文献

- 1) 引田正洋 他, “GaN パワーデバイス”, Panasonic Technical Journal Vol.55 No.2, Jul. 2009
- 2) https://product.tdk.com/ja/search/inductor/inductor/smd/info?part_no=CLF12577NIT-150M-D
- 3) GaNPower “GaNPower Demonstrates Industry’s First 1200 V Single-Die E-Mode GaN Power Devices”

修士学位論文要約（令和 6 年 3 月）

物体検出応用に向けた低電力・高速 エッジ AI プロセッサの構成に関する基礎研究

小林 陸

指導教員：遠藤 哲郎

Basic Research on Low-Power and High-Speed Edge AI Processor Configuration for Object Detection Applications

Riku KOBAYASHI

Supervisor: Tetsuo ENDOH

Demand for AI object detection technology, which is expected to be used in automated driving and other applications, has been increasing in recent years, requiring the development of low-power and high-speed edge AI processors for such applications. In this study, we analyzed object detection model generation and hardware implementation in order to improve object detection performance for automatic driving applications. First, a model was generated for the object detection algorithm YOLO by transition training on an image dataset for automated driving with quantized bounding box coordinate parameters. It was confirmed that this model satisfied the detection speed and accuracy requirements for stable real-time detection and showed improved performance compared to the conventional model. Next, the convolutional layer of the model was implemented in FPGA and analyzed for resource consumption. Finally, the operations per convolutional layer were designed in Verilog HDL, and RTL analysis confirmed that there were no problems with the operation. On the other hand, further reduction of the computational weight and efficiency of operations are required for hardware implementation of the entire inference process, and it is possible to combine parallel processing to improve the efficiency of the overall process.

1. はじめに

現在、仮想空間と現実空間の高度な融合により開かれる人間中心の未来社会「Society 5.0」の実現が目指されている。Society 5.0 では IoT (Internet of Things) を利活用して様々な知識・情報の共有を行い、これまでにない新たな価値が生まれる。その中で人工知能(AI: Artificial Intelligence)技術は情報処理、演算、データの記憶・分析において特に有用であり、仮想空間と現実空間を融合させたシステムを構築する上で中核を担う技術である。特にエッジデバイスに搭載されるエッジ AI による物体検出技術は自動運転等に応用される重要な役割を担う。一方でエッジ AI では供給できる電力や計算資源に限りがある場合が多く、演算性能の維持が課題となっている。また自動運転への応用ではリアルタイムでの検出が重要であり、処理の高速化も課題として挙げられる。

エッジ AI 向けの物体検出アルゴリズムとして、YOLO(You Only Look Once)¹⁾と呼ばれる軽量アルゴリズムがある。これは検出処理と分類処理を 1 ステージで行い、特に演算量の減少および高速化において利点がある。本研究では YOLO を物体検出アルゴリズムとして選定し、エッジ AI の応用先として自動

運転を想定したモデル生成を行い、低電力かつ高速なエッジ AI プロセッサの構成について検討した。

2. 学習処理と提案生成モデルの性能評価

自動運転に向けた画像データセットとして Waymo Open Dataset²⁾を用いて YOLO の転移学習を行い、物体検出モデルを生成した。従来の YOLO は汎用向けに 80 のクラスで分類が行われるが、このモデルでは自動運転において検出頻度の高い「車両」、「歩行者」、「標識」、「自転車」の 4 つのクラスに絞って分類を行った。また学習前にデータセットにおけるバウンディングボックスの座標パラメータの正規化を行い、加えて FP32 から INT8 への量子化を行った。従来の YOLO モデルと提案生成モデルで性能比較を実行し、改善効果を定量的に示した。検出テスト結果から、従来モデルと比較して誤検出が減少し、また画像内に多数の物体が存在する場合についてもそれぞれ検出可能であることが確かめられた。

3. FPGA を用いた提案生成モデルの性能評価

ハードウェア実装におけるリソース消費についての分析を行うため、提案生成モデルの畳み込み層を

FPGA(Field Programmable Gate Array)ボードに実装した。図1に使用したFPGAボード(Kria KV260)のブロック図を示す。Pythonによりプログラマブルロジック上のDPUアーキテクチャでハードウェア制御を行い、推論処理を実行した。その結果、提案生成モデルがエッジデバイスに実装可能なリソース範囲で推論処理を実行できることが確かめられた。

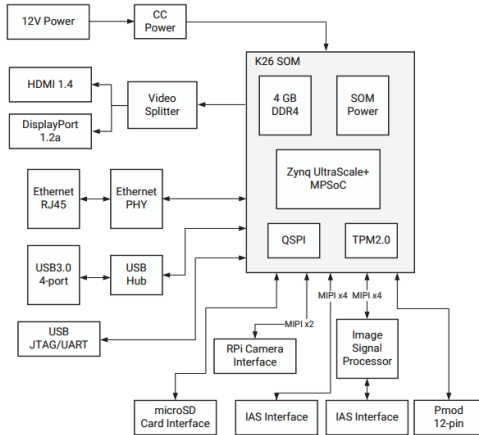


図1 使用したFPGAボードのブロック図³⁾

4. FPGAコンパイラで生成された「推論処理における畳み込み層」のRTL分析

YOLOのような畳み込みニューラルネットワークでは、「積和演算」、「活性化関数」、「Pooling」の3つの演算を1層とした畳み込み層が繰り返し実行されており、推論処理の大部分を占める基本要素である。ハードウェア設計に向けて、畳み込み層1層あたりの各演算についてVerilog HDLを用いて動作を記述し、テストベンチによってRTL(Register Transfer Level)分析を実行し動作波形を確認した。これにより、各演算についてクロックと同期したレジスタへの値の格納が行われており、RTLでの動作に問題がないことが確かめられた。

最後に、推論処理全体のハードウェア設計に向けての検討を行った。

5. まとめ

物体検出アルゴリズムYOLOに対し、入力画像データの座標パラメータの量子化を含めた転移学習を行いモデルを生成し、提案モデルが推論処理において低電力動作につながる軽量性と、精度、高速性において高い性能を発揮できることが確認できた。また畳み込み層の処理についてFPGA

上でのリソース消費が実装可能な範囲に抑えられていること、畳み込み層1層あたりの演算のRTL動作において問題がないことを確かめた。

推論処理全体のハードウェア設計を行うためには、計算量のさらなる軽量化や演算の効率化が求められる。これを実現するために、タスクやデータの並列化、またパイプライン処理の採用が考えられる。

文献

- 1) Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, and Ali Farhadi, You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection, The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.779-788, 2016.
- 2) <https://waymo.com/open/> (Available Online, Jan.2024).
- 3) <https://docs.xilinx.com/r/ja-JP/ug1089-kv260-start-kit/%E6%A6%82%E8%A6%81> (Available Online, Jan.2024).

修士学位論文要約（令和6年3月）

水素負イオンビーム用光中性化セルの数値解析

佐々木 悠介

指導教員：安藤 晃

Numerical analysis of photo-neutralization cell for negative hydrogen ion beam

Yusuke SASAKI

Supervisor: Akira ANDO

Numerical analysis was used to investigate the neutralization efficiency of a newly designed multiple-reflection photo-neutralization cell. The calculations show that a neutralization efficiency of more than 90% can be achieved by generating 20 laser planes with a 100 kW laser injection. The calculation of the neutralization efficiency of the multiple reflection photo-neutralization cell in the ITER-NBI shows that about 11 MW of negative ion beam can be reduced by using 5 units of 20 kW lasers. The time variation of the negative ion beam current could not be measured in the demonstration experiment. This was due to the short pulse width of the lasers, and it will be necessary to use new long-pulse lasers in future demonstration experiments of photo-neutralization.

1. はじめに

核融合プラズマの主要な加熱及び電流駆動方法として、中性粒子ビーム入射 (NBI) システムが開発され、様々な実験に利用されている。NBI 装置におけるビーム利用効率の改善が核融合炉における全体の電力効率を向上させることから、特に負イオンビームの中性化に用いられる光中性化セルが注目されている。

大型核融合装置での NBI では、重水素負イオンビームを MeV 級まで加速した後、中性粒子ビームに変換し閉じ込め装置に入射する。現在多くの NBI 装置で採用されているガス中性化セルでは、MeV 級ビームエネルギー領域において負イオンの中性化効率は約 60%程度である。一方、レーザー光を用いた光中性化セルでは、約 95% の中性化効率が期待され、さらに不要ビームの熱負荷の低減、ガス負荷の低減に伴う中性化セルの小型化やストリッピング損失の低減など様々な利点もあり、将来的な光中性化セルの実装が期待されている。

光中性化には MW 級のレーザー光強度が必要とされ、この光強度を得るためファブリペロー (FP) 型光共振器などが提案されているが、精密なミラーの位置制御や光路中での光増幅など困難な点も多い[1]。そこで本研究では新たな光中性化セルの方式として、多重反射型光中性化セルを提案する。本方式の動作原理を図 1 に示す。本方式は、四面を高反射率ミラーで囲んだ領域にレーザー光を多重反射させる方式である。横方向からレーザーを導入し、負イオンビーム

進行方向に角度を持たせて多重反射させることで、疑似的なレーザー光面を複数枚生成する。光中性化反応はそれぞれのレーザー光面で生じ、負イオンビームの進行に応じて段階的に中性化が行われる。

本研究では、多重反射型光中性化セルの実装により期待される中性化効率について、光中性化モデルを使用した数値解析により検討を行った。また、多重反射型光中性化セルを水素負イオン源実験設備に実装し、中性化の原理実証試験を行った。

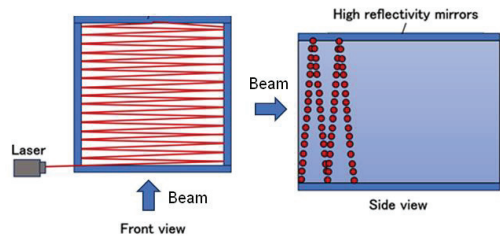


図 1 多重反射型光中性化セルの原理図

2. 数値解析

図 2 は、本研究で用意した光中性化セルを東北大実験装置に導入した場合の中性化効率の計算結果である。図より、100kW の入射レーザーパワーではレーザー光面を 20 枚ほど生成する事で、90%以上の中性化効率を達成可能である。また、レーザー光面生成数の増加に対して中性化効率の増加幅が減少していく事には 2 つの要因がある。1 つ目は、負イオンビームがレーザー光面

を通過しその一部が中性化されていく度に、負イオンの総数が減少していく事に起因する。もう一つは、レーザーがミラー面で反射する度に生じるレーザーパワーの減衰によるものである。

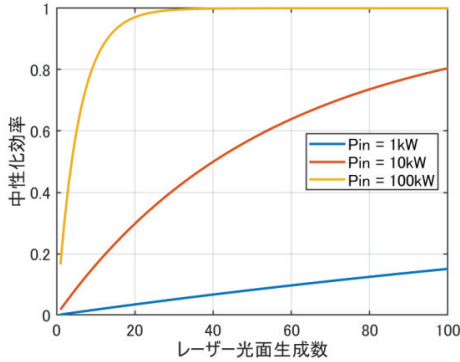


図2 東北大実験装置における中性化効率

図3は、多重反射型光中性化セルをITERで用いられるNBI構成に導入した場合の中性化効率について、計算を行ったものである。使用するレーザーには最大出力20kWのCWレーザーを用いる事を仮定し、横軸にレーザー台数をとり計算を行っている。図より、出力20kWのレーザーを5台用意する事で、約90%の中性化効率を得る事が可能である。ITER-NBIでは1台あたり16.5MWの中性粒子ビームを出力するため、現状のガス中性化セルでは約29.5MWのDビームが必要となる。一方多重反射型光中性化セルを導入し、中性化効率を90%まで上げる事で、必要なDビームは17.6MWまで低下する。これは0.1MWのレーザーを導入する事で約11MWの負イオンビームを削減可能であることを示しており、NBIの全体効率を大幅に改善する可能性を示唆している。

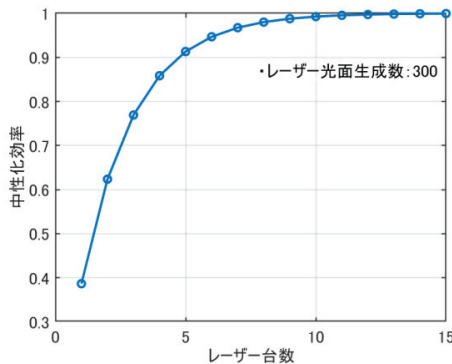


図3 中性化効率のレーザー台数依存性

3. 実証実験

図4は、高周波放電電力30kW、引き出し電圧3kV、加速電圧18kV、イオン源ガス圧0.7Paの条件で負イオンビームの引き出しを行い、Φ10mmおよび20mmNd:YAGレーザーを、レーザーパワー0.8MWで入射した場合の水素負イオンビーム電流の時間変化を示したものである。数値解析ではこの条件で光中性化を行う場合、約50%の中性化効率を得る事が出来る結果となったが、実際にレーザーの入射による負イオンビーム電流の変化を計測する事は出来なかった。この原因として、中性化反応発生地点からフレアデーカップまでの間に、中性化をキャンセルするような働きが生じている可能性が考えられる。レーザーは10nsの短パルス照射のため、21kVで加速された負イオンビームは、約15mmの領域のみ中性化されることになる。この時負イオンから脱離した電子が拡散すると、中性化領域には実効的に静電場が生じるため、周囲の負イオンが短時間でこの穴を埋める可能性がある。これはレーザーのパルス幅を延ばし、中性化領域を広げる事で問題の解決が可能であると考えられ、今後はロングパルスでの中性化実験を行っていく必要がある。

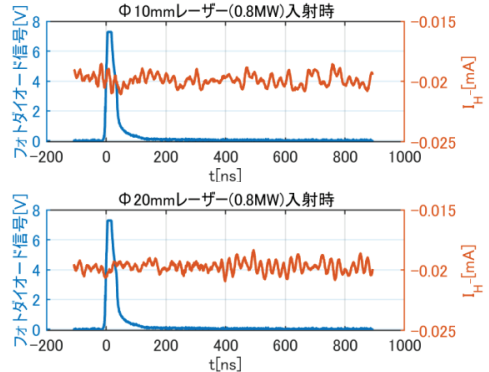


図4 Nd:YAGレーザー入射時の負イオンビーム電流の時間変化

5. まとめ

新たに考案した多重反射型光中性化セルについて、光中性化モデルを使用した数値解析により中性化効率の検討を行った。実証実験では光中性化に伴う負イオンビーム電流の時間変化を計測する事が出来なかったが、これはレーザーのパルス幅が短い事に起因していると考えられる。今後は新たにロングパルスレーザーを用い、光中性化の実証実験を行っていく必要がある。

文献

1) A.Simonin, et al: Nucl. Fusion 61, 046003(2021)

修士学位論文要約（令和6年3月）

水プラズマを用いたマグネトロンスパッタリングによる推力発生と 小型電気推進機の開発

清水 颯太

指導教員：安藤 晃, 研究指導教員：高橋 和貴

Thrust Generation Induced by Water-Fueled Magnetron Sputtering Source and Development of a Micro Electric Propulsion Device

Sota SHIMIZU

Supervisor: Akira ANDO, Research Advisor: Kazunori TAKAHASHI

The number of small satellites launched around low earth orbit (LEO) is increasing due to the demand for observation, communications and so on in the field of both industry and academic. Especially, CubeSat is a representative micro satellite, which is a cube of 10 cm on a side. To extend the area that CubeSat can be operated and prevent from being space debris after its mission, mounting an electric propulsion (EP) device on CubeSat has been studied. Several technological issues have remained in terms of size and electric power limitation. To approach the problems, a thrust generation induced by a magnetron sputtering source has been proposed. When the **ExB** plasma is produced, the ions in plasma impinge the cathode target and the electrically neutral atoms and clusters are ejected from the cathode surface. In this way, an electron source called neutralizer generally mounted on EP does not needed; that contributes to the size reduction. In this study, a gaseous water-fueled magnetron sputtering source is tested. Liquid and solid propellant have been proposed as alternatives of generally used gas propellants to minimize the size of fuel storage. Especially, water is one of the promising candidates in terms of the low cost, safety, abundance, and so on. In the present study, a thrust induced by a water-fueled magnetron source is investigated as a compact EP device which does not require both neutralizer and gas storage tank.

A magnetron sputtering source consisting of the 45-mm-diameter copper cathode and an annular anode is used here. Liquid water is in the tank and it changes into the gaseous state at the pressure lower than water vapor pressure. The gas flow rate is controlled by a mass flow controller or a solenoid pulsed valve. The mass flow controller that can be operated at low differential pressure stationarily controls the mass flow rate, where thrust measurement is conducted. The pulsed valve is used to discuss about the miniaturization of the gas feeding system. The thrust is measured by using a target pendulum technique which is commonly used in laboratory experiments. When an axial force is exerted on the target plate, the target displacement is detected by a light emitting diode (LED) sensor located downstream of the target. The correlation between the displacement of the target and force is calibrated before pumping down the chamber.

Water plasma production is verified by the optical emission spectroscopy (OES) measurement. The measured spectrum corresponds to that of other water plasma source reported in previous studies. Measurement of the target displacement induced by the water plasma production demonstrates the thrust of 200-400 μN and the specific impulse 150-350 sec. The results propose that a water-fueled magnetron sputtering source would be applicable for small EP without both a neutralizer and a high-pressure gas storage tank.

Subsequently, the mass flow controller is alternated by a single solenoid pulsed valve to reduce the size of the gas feeding system. The discharge with a pulsed valve contains two discharge modes due to the temporal change in the gas pressure. The impulse bit induced by the pulsed water-fueled magnetron source is assessed by the target technique described above. As a result, the thrust-to-power ratio and specific impulse decreases compared to the operation with the mass flow controller. To interpret the discrepancy between the mass flow controller and the pulsed valve, a temporal evolution of the force is measured by pulsing the discharge voltage, showing the lowered thrust-to-power ratio for the latter half on the discharge pulse. Furthermore, much gas flow rate at the first half of the discharge seems to reduce the specific impulse and thruster efficiency. To overcome this problem, a double

valve system is installed for the gas feeding system. By Operating the double valve system continuously, a similar performance with mass flow controller operation is successfully obtained. Since the gas feeding system is a common element for EP devices, the double valve system would be applicable to the other types of small thrusters as a compact and relatively less expensive gas feeding system.

A 3-D model of sputtering thruster for a 1U CubeSat is designed based on the above-mentioned results, where the fuel tank is mounted on the another 1U size. Water-fueled sputtering propulsion is expected as a small EP that can be mount on CubeSat, while some issues are remained such as power process unit (PPU), the effect of sputtered atoms and power optimization.

To expand the application field with sputtering propulsion, hydrogen and oxygen-fueled magnetron sputtering source is also inspected. Using a water electrolysis system is sometimes discussed in the field of electric propulsion. That enables the dual mode operation with chemical combustion thruster. The thrust generation for the mixture of hydrogen and oxygen is demonstrated as well while the thrust-to-power ratio is lower than that for the water operation. A possible interpretation of the thrust reduction is an unstable discharge due to the surface oxidation of copper cathode and generation of negative ions.

In conclusion, the thrust induced by water-fueled magnetron sputtering source is demonstrated, and the small EP device without neutralizer and gas storage tank is suggested. Subsequently, the gas feeding system using the pulsed valve is tested and optimized to minimize the size. Finally, the first CubeSat prototype which mounts on a sputtering propulsion is proposed. Furthermore, to expand the application of sputtering propulsion, the use of water electrolysis is suggested, and the hydrogen and oxygen-fueled sputtering source is tested. Improvement and detailed understanding of the discharge physics remains further issues to be solved in near future.

修士学位論文要約（令和6年3月）

近傍磁界計測によるノイズ伝搬の可視化に関する研究

菅原 祐介

指導教員：石山 和志

A Study on Visualization of Noise Propagation by Measuring Near Magnetic Field

Yusuke SUGAWARA

Supervisor: Kazushi ISHIYAMA

In recent years, as electronic devices have advanced, the component mounting density on electronic boards has grown, leading to circuit noise issues. Addressing this requires technology capable of precisely measuring high-frequency magnetic fields. We have been studying magneto-optical effects and high-frequency near-field measurements using pulsed lasers. In previous studies, we demonstrated the feasibility of measuring the magnetic field distributions across diverse electronic circuits, including actual circuits in commercial electronic devices. However, it is difficult to identify a noise source only by the intensity and frequency of the magnetic field obtained by magnetic field distribution measurement. This study proposes a visualization of noise propagation paths utilizing the phase information obtained by a magnetic field measurement system. For validation, we measured the magnetic field emitted by crosstalk noise, a typical type of noise in electronic circuits. We observed a time lag between the primary signal and the noise, as well as noise amplification over time. Our findings show the potential of our measurement method in pinpointing noise sources.

1. はじめに

近年、電子機器の高性能化に伴い電子基板における部品の実装密度が向上し、回路内のノイズによる問題が発生している¹⁾。ノイズ対策はノイズ源や伝搬方法に応じて、ノイズフィルタやシールドを施すことが効果的だが、そのためにはノイズ源の特定が必要である。従来のノイズ源特定方法である金属ループコイルを用いた近傍磁界測定は、測定対象の磁界分布を乱すことや、測定感度とループ径の間にトレードオフの関係があるため空間分解能に限界があることが問題となっている^{2) 3)}。また、実装密度が高い電子基板におけるノイズの種類や伝搬経路は様々であるため、ループコイルで得られる磁界の強度と周波数のみでノイズ源を特定することは困難である。

そこで本研究では、磁気工学結晶とパルスレーザを用いた位相情報を含んだ近傍磁界計測により、ノイズが作り出す磁界の特徴検出による伝搬経路の可視化が可能であることを検証する。

2. 観察対象とするノイズの検討

観察対象とするノイズは、回路内のノイズとして一般的かつ対策が難しいとされる遠端クロストークノイズに決定した。本研究で観察する遠端クロストークノイズの特徴は2つである。1つ目はノイズの立ち上がり加害者である入力信号の立ち上がりよりも遅れることである。クロストークノイズは誘導性・容量性結合によって発生するため、誘導性・容量性ノイズの合計

であるといえる。線路の実効誘電率の違いによって、誘導性ノイズは容量性ノイズよりも速く線路中を伝わる。したがって、図1に示すようにクロストークノイズは加害者である入力信号に比べて遅れることとなる。2つ目はノイズが遠端に伝搬するにつれて線形に増幅していくことである。図2に容量性結合のみを考えたノイズ増幅の様子を示す。高周波信号が流れる線路であるため分布定数線路として振る舞っており、容量性結合である浮遊静電容量が分布している。加害者線路に信号が流れると、浮遊静電容量を通じて被害者線路にノイズが伝搬する。さらに加害者線路の信号が進むと再び被害者線路にノイズが伝搬するが、このとき先ほど伝搬したノイズも進んでいるため、そこに新たなノイズが重なることになる。これを繰り返しながら進むことでノイズは雪だるま式に重畳することとなる。

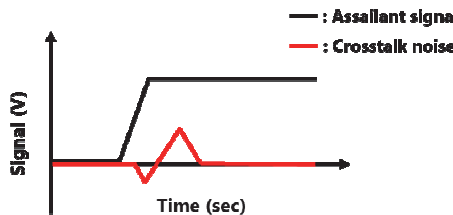


図1 クロストークノイズと入力信号の時間差

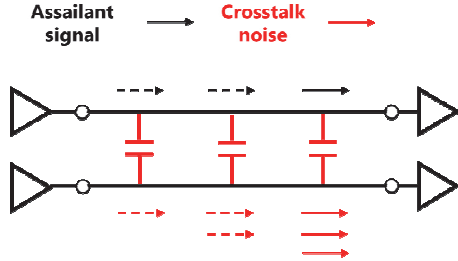


図 2 信号伝搬に伴う遠端クロストークノイズ増幅

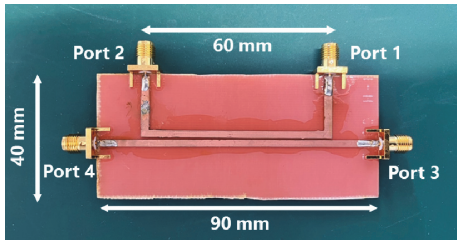


図 3 磁界計測に使用したマイクロストリップライン

3. クロストークノイズ観察用 MSL の作製

はじめに、磁界計測システムで計測可能なノイズの強度について検討し、5 dBm 程度のノイズを発生させる必要があると結論づけた。シミュレーションを用いて MSL の設計を行い、図 3 の MSL を作製した。作製後、ネットワークアナライザを用いて S パラメータ計測を行い、設計通りの特性を持っており磁界計測に十分なノイズが発生することを確認した。

4. 磁界計測による遠端クロストークノイズの特徴観察

1 つ目の特徴である入力信号とノイズの時間差を観察するため、位相ごとの磁界分布を測定した。図 4 中の黄線に磁界測定を行った範囲を、図 5 に測定した磁界分布を示す。入力信号の位相を 0 deg から 360 deg まで 20 deg 間隔で掃引したところ、加害者磁界に対してノイズ磁界が 45 deg 遅れていることが観察された。45 deg の位相差は 125 ps の時間差であるため妥当な時間差であり、ネットワークアナライザによる計測との整合性も確認された。

次に、2 つ目の特徴であるノイズ伝搬に伴う増幅を観察するため、磁界分布計測を行った。図 4 中の白線に磁界測定を行った範囲を、図 6 に計測位置による磁界波形の振幅の変化を示す。図 6 中の直線はプロットに基づく近似直線である。ノイズ強度が線形に増幅していることがわかる。

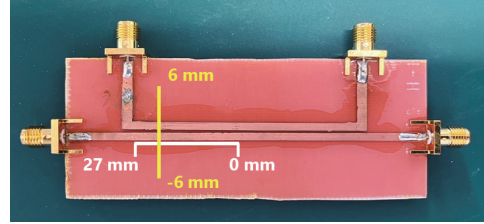


図 4 磁界分布計測位置

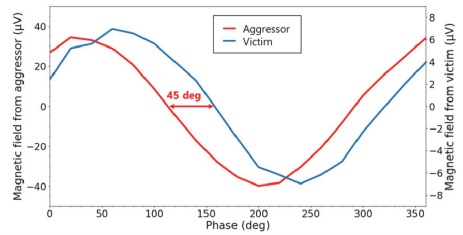


図 5 入力信号とノイズの磁界波形

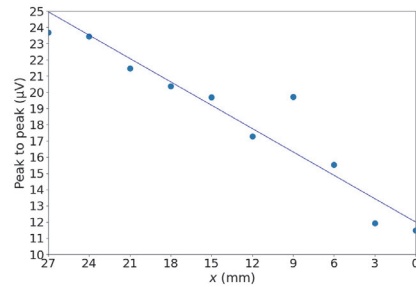


図 6 計測位置による磁界波形の振幅の変化

5. まとめ

本研究では、磁気光学結晶とパルスレーザを用いた位相情報を含んだ磁界計測によって遠端クロストークノイズが作り出す磁界の観察を行った。入力信号とノイズ間の時間差、ノイズ伝搬に伴う信号強度の増幅、の 2 つの特徴の観察に成功し、磁界の観察によってクロストークノイズを特定可能であると示した。スイッチングや反射など、他のノイズの特徴を判別できる可能性があり、ノイズ源特定手法として有効であると考えられる。

文献

- 1) M. Yamaguchi: J. Magn. Soc. Jpn., **28**, 686 (2004)
- 2) H. Funato, T. Suga: J. Jpn. Inst. Electro. Packaging, **14**, 195 (2011).
- 3) J. Shi, K. Slattery, M. Yamaguchi, K. I. Arai, and R. DuBroff: 2003 IEEE Int. Symp. Electromagn

修士学位論文要約（令和6年3月）

磁気ノズルと電子流体の相互作用による推力発生に関する室内実験

角川 颯哉

指導教員：安藤 晃， 研究指導教員：高橋 和貴

Laboratory experiments on the thrust generation due to the magnetic nozzle and the electron gas.

Soya SUMIKAWA

Supervisor: Akira ANDO, Research Advisor: Kazunori TAKAHASHI

In a magnetic nozzle (MN) radiofrequency plasma thruster, the Lorentz force arising from the electron diamagnetic drift current and the MN has a significant contribution to the total thrust. However, various effects such as the electric field and neutral depletion influence the internal azimuthal plasma current, resulting in unclear observation of the effect of the electron diamagnetism on the thrust generation. Here, direct thrust measurements are performed in the absence of the electric field and neutral depletion, where the pure electron diamagnetism can be clearly observed. The results clearly show that the electron diamagnetism can generate the thrust alone by interacting with the MN.

1. Introduction

In the last few decades, several space exploration missions have been successfully conducted with gridded ion and Hall effect thrusters. However, the lifetimes of the thrusters are limited since neutralizers and electrodes are directly exposed to the plasma and damaged by sputtering and erosion. A magnetic nozzle (MN) radiofrequency plasma thruster^{1,2)} typically consisting of a glass tube, back plate, rf antenna, and solenoid or permanent magnets is one of the candidates for a future high-power and long-lived electric propulsion device. The MN thruster has no electrodes and does not require neutralizers due to spontaneous neutralization by energetic electrons. Therefore, the MN thruster has a long lifetime even with high operating power. The thruster efficiency has been improved over the last decade by incorporating the physical insights obtained in fundamental studies on plasma dynamics and is now approaching about thirty percent³⁾; further improvement is an ongoing issue. It is found that the total thrust imparted to the MN thruster can be given by three forces⁴⁾: the electron pressure force T_s in the source, the axial force T_w lost to the radial wall, and the Lorentz force T_B arising from an azimuthal internal plasma current and the radial magnetic field. It has been proposed that T_B is mainly generated by the electron diamagnetism, however, the source of the thrust component T_B is still unclear due to the influence of the electric field on the plasma current⁵⁾.

2. Experimental Setup

Figure 1 shows the schematic diagram of a filamented electron beam plasma source. A filament is located at the throat of the MN and can reduce the plasma potential V_p close to zero by heating the filament and providing a large number of thermal electrons⁶⁾. A discharge voltage of $V_D = -80$ V is applied to the filament and the plasma is produced. The plasma parameters are calculated from electron energy probability functions measured by a cylindrical Langmuir probe (LP). Measurement of the azimuthal current in the previous experiment has clearly shown that the plasma is purely diamagnetic⁷⁾. To measure T_B , two solenoids are attached to a thrust balance⁸⁾. It is noted that the external discharge current flowing through wires and in the plasma would induce the additional force α due to the interference with the magnetic fields. Therefore, the actually measured force T_{B+} contains the additional force as given by $T_{B+} = T_B + \alpha$. When opposing the magnetic field direction, the direction of the additional force α is flipped since the direction of the external current is unchanged. On the other hand, the

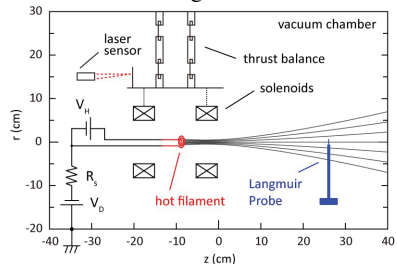


Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

direction of T_B is not changed by the magnetic field direction as the direction of the azimuthal plasma current is also opposed. Therefore, the measured force T_{B-} for the opposed magnetic field direction case is given by $T_{B-} = T_B - \alpha$. Therefore, the force T_B exerted on the MN by the internal plasma current can be obtained by $T_B = (T_{B+} + T_{B-})/2$.

3. Experimental Results

The radial and axial profile of V_p is estimated from the peak of the first derivative of the I-V characteristics of the LP; it is confirmed that V_p is almost constant at 5 V for both the radial and axial profiles, where the solenoid current of $I_B = 10$ A giving the maximum magnetic field of 550 G. The maximum axial ion energy gained by both the electric fields in the plasma and in the sheath is very weak and only about 5 eV. Therefore, the contribution of the ions to the thrust generation in the present setup is very weak. In terms of the momentum equation of the electrons with a negligible inertia term, the azimuthal plasma internal current is given by $j_\theta = j_{De} + j_{E \times B}$, where j_{De} and $j_{E \times B}$ are the electron diamagnetic current and $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift current. The solid and dashed lines in Fig.2 are j_{De} and $j_{E \times B}$ calculated from measured plasma parameters; the total current j_θ is drawn by the dotted-dashed line. j_{De} is the major component of j_θ and is much larger than $j_{E \times B}$, demonstrating the purely diamagnetic state. Direct thrust measurements are performed in the purely diamagnetic plasma. T_{B+} and T_{B-} are measured as functions of I_B as plotted in Fig.3(a) by open squares and open triangles, respectively. The force T_B is calculated from the above-mentioned equation and is plotted by open circles in Fig.3(a). Since the discharge power calculated from the discharge voltage and current is changed by I_B , the T_B normalized by the discharge power P_{in} is plotted in Fig.5(b), still showing the increase in the force with the increase in the field

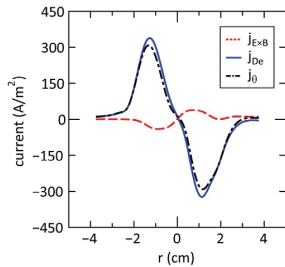


Fig.2 The radial profile of $j_{E \times B}$ (dashed line), j_{De} (solid line), and j_θ (dotted-dashed line) at $z = 10$ cm for $I_B = 10$ A.

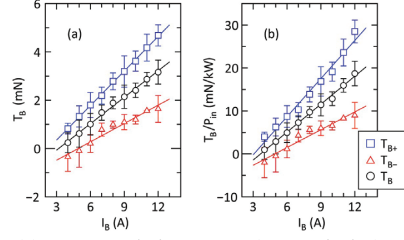


Fig.3 (a) Measured thrust T_B (open circles) and (b) the thrust-to-power ratio T_B/P_{in} (open circles) as a function of I_B . T_{B+} (open squares) and T_{B-} (open triangles) represent the cases that the magnetic field is in the downward and outward directions, respectively.

strength. These data demonstrate the thrust generation by the electron diamagnetism even if no ion acceleration mechanism exists in the MN. The increase in T_B with the increase in the field strength is consistent with the previous observation implying the cross-field diffusion effect on the T_B magnitude⁴.

4. Conclusion

The filamented electron beam plasma source is used to sustain the nearly zero potential plasma. The axial and radial profiles of the plasma potential show the negligible electric field, resulting in no contribution of ions to thrust generation. The internal plasma currents are calculated from plasma parameters; j_{De} is much larger than $j_{E \times B}$, indicating the purely diamagnetic state. Direct thrust measurement is performed in the purely diamagnetic plasma with the thrust balance which only the solenoids are mounted on. The results clearly demonstrate the presence of the force induced by the purely diamagnetic current, demonstrating the thrust generation only by the electrons in the MN.

References

- 1) C. Charles, J. Phys. D: Appl. Phys. **42**, 163001 (2009).
- 2) K. Takahashi, Rev. Mod. Plasma Phys. **3**, 3 (2019).
- 3) K. Takahashi, Sci. Rep. **12**, 18618 (2022).
- 4) K. Takahashi, et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 195003 (2013).
- 5) R. L. Stenzel and J. M. Urrutia, Phys. Plasmas **7**, 4450 (2000).
- 6) K. Takahashi, et al., Phys. Rev. Lett. **120**, 045001 (2018).
- 7) K. Takahashi, et al., Phys. Rev. Lett. **125**, 165001 (2020).
- 8) K. Takahashi, et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 235001 (2011).

修士学位論文要約（令和6年3月）

気象予測データに基づく配電用ポリマーがいしの
漏れ電流発生量の評価手法に関する研究

田中 庸介

指導教員：斎藤 浩海， 研究指導教員：八島 政史

Study on Evaluation Method of Leakage Current Generation of Polymeric
Insulators for Distribution Lines Based on Meteorological Forecast Data

Yosuke TANAKA

Supervisor: Hiroumi SAITOH, Research Advisor: Masafumi YASHIMA

Compared to conventional porcelain insulators, polymeric insulators are easier to work because of their lightness, and have better withstand voltage performance under discharge, rain, and polluting conditions due to their higher hydrophobicity. On the other hand, the use of polymeric materials for the outer coating raises concerns about their deterioration over time and clarifying the long-term performance in the polluting and humid environment unique to Japan is an important issue for practical application. In this study, based on the results of voltage applied exposure test for polymeric insulator, we developed prediction models of leakage current generation and analyzed meteorological conditions which affect leakage current generation.

1. はじめに

外被材にシリコンゴムを使用したポリマーがいしは、従来の磁器がいしと比較して、軽量で作業性に優れ、撥水性による耐汚損性能も良好であることなどから、電力流通設備への導入が国内でも進んでいる。一方で、外被にポリマー材料を使用しているため、その経年劣化が危惧されており、特に我が国特有の汚損湿潤環境における長期性能を明らかにすることが、実適用を図る上での重要課題となっている²⁾。

本研究では、ポリマーがいしにおける漏れ電流発生急増となる要因の分析を行い、これまで構築してきた漏れ電流発生量の予測手法にその要因を反映した漏れ電流評価手法の構築を行った。

2. 課電曝露試験の概要





がいしの課電曝露試験は、東北電力／東北電力ネットワーク管内の重塩害地区である、青森県五所川原市脇元地区および山形県鶴岡市加茂地区の2地点で、2006年12月より実施されている。この課電曝露試験では、ポリマーおよび磁器製の耐張型がいしとピン型がいしの4種類のがいしを使用している(表1)。

試験は6.6kV実配電線路の約1m下に設けた試験線路で行われており、漏れ電流計測データ(1分毎)および気象観測データ(10分毎)を取得している。

3. 予測モデルの概要

Neural Networkとは生物の神経細胞の信号伝達過程および学習過程を数学的にモデル化した非線形モデルであり、重回帰分析と比較して入力データ

表1 供試がいし

	ポリマーがいし		磁器がいし	
	耐張型	ピン型	耐張型	ピン型
外観形状				
表面漏れ距離	381 mm	390 mm	370 mm × 2	300 mm

セットに内在する相関(多重共線性)の影響を受けにくいという特徴がある³⁾。

本研究では、順伝播型3層Neural Network⁴⁾を使用しており、2007年1月～2020年12月の鶴岡地区における課電曝露試験のデータを用いて学習を行った(25%はバリデーションデータとした)。入力する気象データは、1時間単位の北方風速(北向き:正)、東方風速(東向き:正)、気温、湿度、気圧、降雨量を使用し、出力データには、ピン型ポリマーがいしの1時間単位の漏れ電流積算値を使用した。入出力データはそれぞれの平均値 μ と標準偏差 σ を用いて、次式に示すように標準化した値を学習に用いた。なお、北方風速、東方風速および降雨量に関しては、平均値 μ を0とおいて標準化を行った。ただし、 x は標準化前の値、 z は標準化後の値である。

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

4. 鶴岡地区におけるポリマーがいのし漏れ電流発生量予測

前節で説明したモデルを用いて、2021～2022年の鶴岡における、ピン型ポリマーがいのし漏れ電流発生量の予測を行った。その結果の中でも、課題として述べたように漏れ電流発生量が急増し、予測値が追従できていなかった場合を2ケースに分けて、図1に示す。

図1(a)は夏季・秋季によく見られ、漏れ電流発生量の急増が短期間で発生するケース(例:2021年10月)、図1(b)は冬季によく見られ、漏れ電流発生量の急増が長期間続くケース(例:2022年12月)を示している。それぞれ、漏れ電流発生量の増加・減少の概ねの傾向を予測できているが、前述の通り、漏れ電流発生量が急増する場合に予測値がうまく追従できていないことが確認できる。

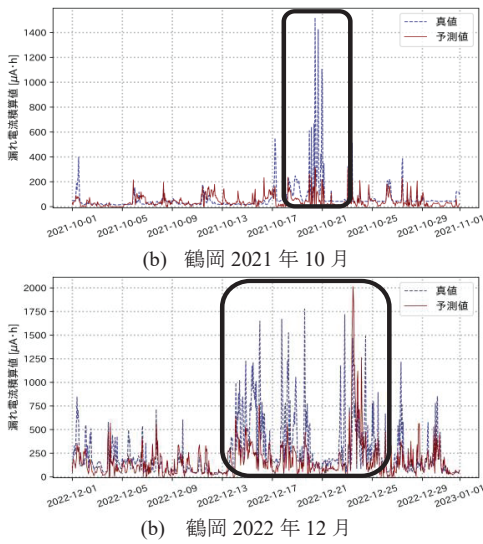


図1 漏れ電流発生量の推移と予測結果

図1のように漏れ電流発生量が急増した要因の分析を行った結果、2021年10月のような夏季・秋季においては塩水によるがいのし笠間を橋絡した電流経路の形成、2022年12月のような冬季においては塩雪によるがいのし笠間を橋絡した電流経路の形成がそれぞれ要因となったと考えられる。そして、これらの要因を検討するために気象警報・注意報の活用が有効であることが確認された。

漏れ電流発生量が急増する要因として考えられるこれらの事象を漏れ電流発生量予測手法へ反映する方法を検討した。今回は、それぞれのケースで見られた気象警報・注意報を考慮して、漏れ電流発生量の予測値に倍率がかかるように設定した。実際に予測を行った結果を図2に示す。

図2より、それぞれのケースでこれまで予測が追従

できていない、漏れ電流発生量が急増する場合における予測値が高くなっていることが確認できる。

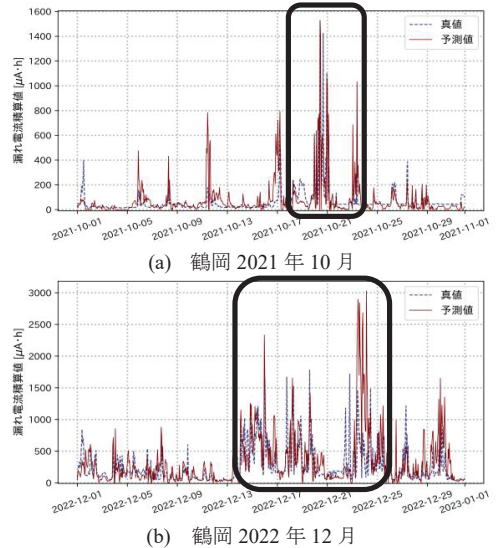


図2 警告・注意報を考慮した漏れ電流発生量の予測結果

5. まとめ

Neural Network を活用して、気象条件に基づくポリマーがいのし漏れ電流発生量の評価手法の構築を行った。今回、漏れ電流発生量の急増要因となるようながいのし物理的な要素を考慮することで、モデルの漏れ電流発生量の予測追従精度を改善できることが確認できた。

今回検討した要因は、がいのし笠間での橋絡といったがいのし表面外に着目したが、漏れ電流発生量の急増要因はがいのし表面状態(塩分付着量・表面撥水性)に着目した要因も考えられる。それらの要因も考慮することで、さらなる精度の向上を図ることができると考えられる。

文献

- 1) 電気学会:「屋外用ポリマー絶縁材料の性能評価・改善技術」, 電気学会技術報告, 1383号, pp.3-4, 6-7, 10-12, 18-19, 24(2016)
- 2) 本間 宏也, 畔柳 俊幸, 石野 隆一, 高橋 毅:「自然環境下における高分子がいのしおよび磁器がいのし漏れ電流特性比較」, 第35回電気電子絶縁材料システムシンポジウム, L-9, 芝浦工業大学(2004)
- 3) 中谷 祐介, 石崎 裕大, 西田 修三:「深層学習を用いた感潮河川の水質変動予測」, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 73, No. 4, I_1141-1146 (2017)
- 4) 岡谷 貴之:「深層学習」, 講談社, pp. 7-27 (2015)

修士学位論文要約（令和6年3月）

直交フラックスゲートセンサ方式によるひずみセンサに関する研究

千田 健太

指導教員：石山 和志， 研究指導教員：後藤 太一

Study on Strain Sensor Based on Orthogonal Fluxgate Sensor System

Kenta CHIDA

Supervisor: Kazushi ISHIYAMA, Research Advisor: Taichi GOTO

We propose a novel strain sensor utilizing an orthogonal fluxgate sensor system with bulk materials. This sensor obtains an output by changing the direction of magnetic moment that utilizes inverse-magnetostrictive effect when strain is applied. First, we verified that the strain sensor works according to its principle. As a result, the magnetic domain observation confirmed the change of anisotropy when strain is applied, and the strain-output characteristics at 250 kHz confirmed the change of output and a double-period component, indicating that the sensor works according to its principle. In addition, as a result of studying the carrier frequency for higher sensitivity, the peak sensitivity reached 6.72 mV/ppm with a carrier frequency of 250 kHz, 6720 times higher sensitivity than that of metal strain gauge. Further a highly sensitivity strain sensor is expected by improving sensor device.

1. はじめに

近年、橋梁の老朽化対策¹⁾などを目的にひずみセンサの需要が高まっている。本研究室では、磁気インピーダンス方式によるひずみセンサの研究を行ってきた²⁾。このセンサは薄膜のため小型化が可能である。しかし、センサは適材適所であるため、小型を必要としない対象物(橋梁など)を想定した場合、センサとして薄膜ではなく、僅かな歪で大きな磁化変化量を得られるバルク材が有利になると考えた。しかし、磁気インピーダンス方式はキャリア周波数が数百 MHz のため、実用化を想定した場合、大きな容量の高周波電源を必要とする問題などが少なからず残る。そこで、本研究では数百 kHz で動作可能な直交フラックスゲートセンサ方式を適用した新しいひずみセンサを提案する。

2. 直交フラックスゲート型ひずみセンサの提案

図1にセンサ内部の異方性の偏移と歪-出力特性のグラフを示す。印加されている歪が0の状態(c)で、磁性体の幅方向に磁気異方性が誘導された状態を基準にすると、引張歪が印加されるにつれて逆磁歪効果により長手方向を容易軸とする磁気異方性が誘導される。そのため、(a)、(b)に示すように印加引張歪が増えるにつれて、磁性体の異方性は見かけ上消失したのち、長手方向を向くようになる。このように磁気異方性が変化する事で、磁気モーメントの方向も変化するため、具体的に磁気モーメントの方向と出力について説明する。幅方向異方性である(c)、(d)では、磁気モーメントは幅方向を向く。この時、幅方向交流磁界と平行

するため長手方向の磁化変化が生じず、出力は観測されない。しかし、見かけ上の異方性が消失した状態(b)では、面内全てが容易軸方向となり、長手方向の磁化変化が最大となる事から出力も最大となる。長手方向異方性に誘導された状態(a)では、磁気モーメントを長手方向に拘束するエネルギーが増えることになるため、幅方向交流磁界への反応が低下し、出力が減少する。これらの変化の際、幅方向交流磁界1周期の間に、通電方向の磁化変化が2度生じるため倍周期成分が現れる。この検出方式は、直交フラックスゲートセンサに着想を得た新しい方式である。

3. 磁区観察と静特性測定に基づく動作検証

ひずみセンサが原理通りに動作する事を確認するために歪印加時の磁区観察と単一の周波数における歪-出力特性を測定した。センサの構造を図2に示す。幅方向に異方性を誘導したアモルファスリボン 2605SA1 (プロテリアル製)をアルミ基板上にエポキシ樹脂で貼り付けた。

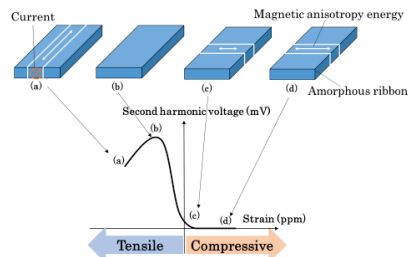


図1 異方性の偏移と歪-出力特性

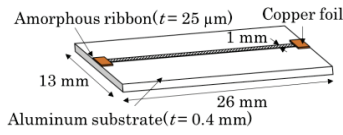


図2 センサ素子構造

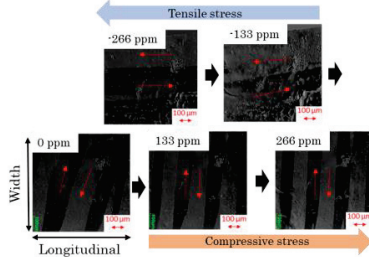


図3 歪印加時の磁区観察

3.1 歪印加時の磁区観察

センサの片側を治具で固定してカンチレバーとし、歪を印加した。先端から 12.5 mm の位置を磁気光学 Kerr 効果顕微鏡にて観察し、その結果を図 3 に示す。引張歪を印加する事で、長手方向に異方性が変化した。また、引張側、圧縮側ともに印加した歪量が大きいほど、それぞれ長手、幅方向の異方性が大きくなり、きれいなストライプドメインが観察された。したがって、引張歪印加により異方性が変化する事を確認した。

3.2 250 kHz 時の歪-出力特性

センサに対しカンチレバー方式にて歪を印加した。また、通電電流を正弦波(250 kHz、0.2 A_{RMS})とし、アモルファスリボン中の磁気モーメントを長手方向に揃えるためのバイアス磁界を 2 Oe 印加した。さらに、300 ターンコイルにて磁化変化を検出し、出力波形をオシロスコープにて確認した。歪-出力特性と出力波形を図 4 に示す。(各波形画像上部がセンサ印加電圧(1/100)、下部が出力電圧を表す。) 歪無印加状態から引張歪約 100 ppm まで出力は増加し、さらに引張歪印加により出力は低下した。また、出力に倍周期成分が現れ、その大きさは印加した歪に応じて変化した。以上から、歪印加による出力の変化、倍周期成分の出現を確認し、さらに磁区観察結果から直交フラックスゲート型歪センサが原理通りに動作することを確認した。

4. 静特性評価による高感度化への検討

高感度化を目的として通電周波数の検討を行った。通電周波数 100、200、250、300、400、500 kHz と変化した際の歪-出力特性を図 5 に示す。出力には周波数特性があり、通電周波数 250 kHz 付近で最大となった。250 kHz における最大変化量は 6.72 mV/ppm であり、金属ひずみゲージ (0.001 mV/ppm)

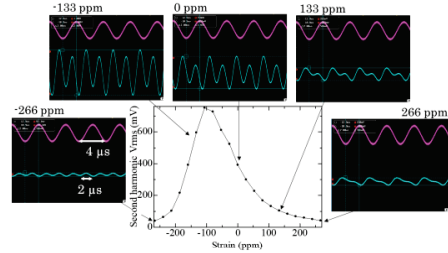


図4 250 kHz 時の歪-出力特性

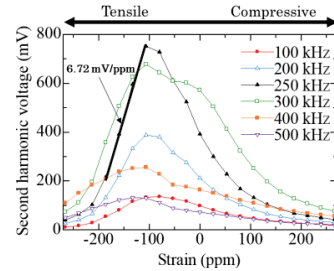


図5 通電周波数による歪-出力特性の変化

の 6720 倍の高感度を得た。出力電圧はファラデーの電磁誘導により磁化変化を時間微分しているため 250 kHz 以下では、周波数が上がるにつれ出力は増加したのに対し、250 kHz 以上ではコイルの浮遊容量に起因する自己共振により出力が低下したと考えられる。コイルでは倍周期成分を検出しているため、共振周波数を約 500 kHz とし共振が起こっていたと考えられる。そこで、コイルのインピーダンス特性を測定したところ 600 kHz 付近で共振していることがわかった。歪-出力特性測定時とインピーダンス特性測定時は動作条件を完全に揃える事ができないため、容量成分にずれがあったと考えられるが、概ね一致した。

5. まとめ

バルク材を用いたひずみセンサとして、直交フラックスゲートセンサ方式を適用した新しいひずみセンサの提案を行った。そこで、動作検証を行いひずみセンサが原理通りに動作することを明らかにした。また、高感度化に向けた検討を行い、通電周波数 250 kHz 時に最大変化量 6.72 mV/ppm を達成し、金属ひずみゲージの 6720 倍の高感度を得た。しかし、アモルファスリボンのサイズやコイルの巻き数、形状の検討は不十分であり、センサデバイスの改良を行うことで、更なる高感度化が期待できる。

文献

- 1) 国土交通省, 道路の老朽化対策の本格実施に関する提言 (2014).
- 2) K. Toyoda, T. Goto, K. Ishiyama, T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues), 7, 108 (2023).

修士学位論文要約（令和6年3月）

映像脈波を利用した生体認証に関する基礎的研究

寺井 孝則

指導教員：杉田 典大

Fundamental Study on Biometric Identification
Using Video Plethysmography

Takanori TERAJ

Supervisor: Norihiro SUGITA

Video plethysmography (VPG), a technique that relies on capturing biological signals acquired from skin videos, is expected to be applied in telemedicine and daily health management. The occurrence patterns acquired through VPG can be unique to individuals because they are influenced by the course and condition of blood vessels beneath the skin. In this study, we focused on the difference in the occurrence patterns among individuals and proposed biometric authentication techniques using VPG of the palm area. We captured videos of the palm from 20 participants and calculated the similarity of the VPG power or phase distribution between two of them. The results of the experiment indicate that both methods achieved individual identification accuracy of $> 85\%$ within the same day and $> 70\%$ on different days. These results confirm the presence of distinct individual patterns in pulsation information and the feasibility of VPG for a biometric authentication system.

1. はじめに

映像脈波は、映像を利用して非接触で生体指標を測定することができる技術である¹⁾。本研究ではその映像脈波技術を用いた新たな生体認証方式の確立を目的として、その可能性の検証に取り組んだ。静脈パターンや指紋、顔など、現在実用化されている生体認証に使われる生体情報の多くは、写真などで取得されてしまうとそれらを物理的に再現することが可能な静的な生体認証である。今後、これらの静的な生体認証は3D解析技術や3Dプリンティング技術などが進歩することで、容易に複製が可能となってしまう危険性が指摘されている²⁾。

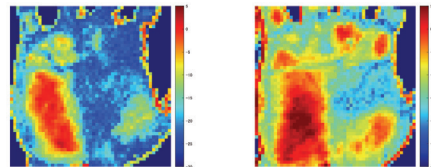
このような背景を受けて、盗難と複製が難しい時間変化する情報を用いた生体認証手法が研究されており、代表的なものとしては行動的特徴を用いた認証手法が挙げられる。しかし、この特徴量は、怪我や酔い、疲労、体調といった身体的要因の変化や、個人の恣意的な行動の変化の影響を強く受けてしまうため、認証の信頼性と正確性に大きな課題がある。

本研究で提案する映像脈波に基づいて得られる脈動情報を用いた認証手法は、人体構造に基づく身体的特徴でありながら、時間情報を含む生体情報を用いるため、従来の認証方式の課題であった複製・盗難リスクの低下と、身体的要因や恣意的な行動の変化に対するロバスト性の両方を解決したものになると考えられる。

2. 脈動強度分布パターンを用いた認証方式

脈動強度分布パターンを用いた認証方式は、手掌内において脈動が強く現れる部分と弱く現れる部分が血管の3次元的な構造と密度に由来するという仮説に基づく。

まず手掌部映像の細分化した領域ごとに輝度変化の解析を行うことで映像脈波を取得し、その後パワースペクトル密度推定を行うことで手掌内の各位置における脈動強度を算出する。さらに、その強度をマッピングすることで手掌内における脈動強度の空間分布を取得し、この分布パターンを個人の特徴量とすることで個人の識別を行う。本手法により取得された脈動強度分布パターンの例を図1に示す。検証実験にあたり、2次元相関係数を元に分布パターンどうしの相関を算出し、個人認証を行うための類似度とした。



(a)被験者A

(b)被験者B

図1. 脈動強度分布パターンの例

3. 脈動位相分布パターンを用いた認証方式

脈動位相分布パターンを用いた認証方式は、脈

波の伝搬方向が血管構造に左右されることに由来する。

まず、脈動強度分布パターンを用いた手法と同様に、手掌部映像の細分化した領域ごとに輝度値解析を行うことで映像脈波を取得する。その後、取得した映像脈波形にヒルベルト変換を適用し瞬時位相を算出することで脈波の伝搬方向(脈波ベクトル)を求め、手掌内の平均的な脈波と各位置における脈波の位相差によって求まる位相データ分布から個人の特徴量を抽出する。本手法により取得された脈動位相分布パターンの例を図2に示す。検証実験にあたり、方向統計学における検定手法の1つとして知られるMardia-Watson-Wheeler 検定の統計量を用いて位相データ分布の差を評価し、個人認証を行うための類似度とした。

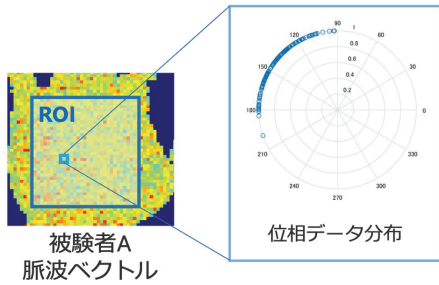


図2. 脈動位相分布パターンの例

4. 個人認証精度検証実験

提案手法により脈動情報から取得される特徴量に個人差があることを確認するため、20人の被験者について手掌映像を撮影し、個人認証精度の評価を行った。撮影にあたって、透明なアクリル板上に置いた手掌部に上から2.0kgの荷重をかけ、白色光と近赤外光を照射した状態で30秒間の映像を取得した。これを各被験者に対し、測定初日、約1週間後、約1ヶ月後の3日間で3回ずつ、計9回実施した。

手掌形状によらない純粋な脈動情報のみの差異を評価するため、Enhanced Correlation Coefficient (ECC) アルゴリズム³⁾を用いて個人間の手掌部の形状と位置の補正を行った上で脈動情報による個人認証精度を評価した。

5. 実験結果

表1と図3に、それぞれの手法を用いて同日もしくは経日で認証を行った場合の等価エラー率(EER)と、他人受入率(FAR)と本人拒否率(FRR)によるROC曲線を示す。これらの結果から、いずれの提案手法においても、同日では85%以上、経日では70%以上の精度で個人識別を行えることが示された。

表1. 提案手法における等価エラー率

提案手法	脈動強度分布	脈動位相分布
EER(同日)	13.8%	11.6%
EER(経日)	23.6%	29.0%

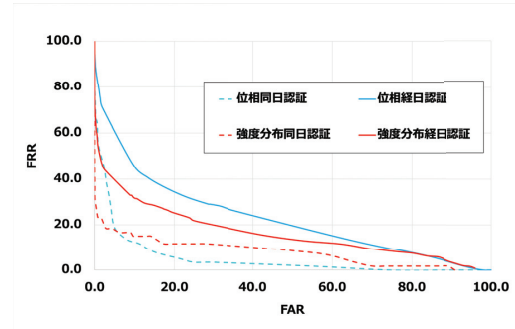


図3. 提案手法におけるROC曲線

5. まとめ

本研究では、映像脈波を用いて取得される脈動情報を用いた生体認証手法を2つ提案し、それぞれの手法における特徴量について個人差の検証を行った。その結果、脈動情報には個人特有のパターンが存在し、生体認証への適用可能性が示唆された。

文献

- 1) Gerard De Haan and Vincent Jeanne. Robust pulse rate from chrominance-based rppg. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 60, No. 10, pp. 2878–2886, 2013.
- 2) Anil K. Jain, Debayan Deb, and Joshua J. Engelsma. Biometrics: Trust, but verify. IEEE Transactions on Biometrics, Behavior, and Identity Science, Vol. 4, No. 3, pp. 303–323, 2022.
- 3) Georgios D. Evangelidis and Emmanouil Z. Psarakis. Parametric image alignment using enhanced correlation coefficient maximization. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 30, No. 10, pp. 1858–1865, 2008.

修士学位論文要約（令和6年3月）

可視化マップを用いた医用画像診断における
深層学習モデル性能向上に関する研究

水野 泰平

指導教員：杉田 典大， 研究指導教員：杉田 典大

Performance Improvement of Deep Learning Model for Medical Image
Diagnosis by Using Visual Explanation Maps

Taihei MIZUNO

Supervisor: Norihiro SUGITA, Research Advisor: Norihiro SUGITA

Recently, many computer-aided diagnosis (CAD) systems based on deep convolutional neural network (DCNN) have been developed. However, it has been reported that the consistency between the region of interest in the system and the region indicated by specialists was low. In this research, we aimed to match the evidence of automatic classifications by the deep learning-based CAD system with that provided by the specialists. Furthermore, we expect that it could improve the classification performance of the systems. For the purpose, we proposed a method to supervise the regions of interest of a DCNN model shown as visualization maps by using expert knowledge. The proposed system output a classification result and two types of visualization maps representing regions of interest of the model, including the activation maps generated by Gradient-Weighted Class Activation Mapping (Grad-CAM) and the attention masks. In experiments, we trained and evaluated DCNN models for drowning diagnosis by using 313 cases of postmortem computed tomography (PMCT) images. As a result, the proposed model showed AUC=0.96 in drowning classification. It is sufficiently high score and shows equivalent performance to conventional models. Next for the activation map, on drowning cases, the average of IoU between the correct region was 0.34, which is higher than that of conventional model (IoU=0.27). we evaluated the model trained with small number of training data (40% of whole data). The model trained with the proposed method showed AUC=0.96, which is higher than AUC=0.91 with the conventional method.

1. はじめに

医用画像は疾病の早期発見や正確な診断、適切な治療において重要な役割を担う。また、病気の検診だけでなく法医学分野における剖検においても活用されており、死後コンピュータ断層撮影 (Post Mortem Computer Tomography: PMCT) による検査は、死因特定における有用性が示されている。

しかし、このように多様な領域で医用画像を用いた診断が行われる中で専門知識を有する医師が不足し、それに伴う負担増加や人的ミスの発生につながる懸念される。加えて、画像診断は画像上の特徴に対する定性的な解釈をもとに行われる場合が多く、病変の見落としや診断の個人差も発生し得る。

これらの問題に対しコンピュータ支援診断 (Computer-aided diagnosis: CAD) システムの導入が有用である。これは、医師の最終診断精度の向上や診断における一貫性の確保、業務における負担軽減などに寄与する。

先行研究¹⁾では、死後 CT 画像による溺死鑑別を目的として訓練された深層畳み込みニューラルネット

ワーク (deep convolutional neural network: DCNN) モデルが高い分類性能をもつことが示された。しかし一方で、Gradient-Weighted Class Activation Mapping (Grad-CAM)²⁾を用いて可視化したモデルの注目領域と専門医の示す注目領域を比較した結果、両者の一致度は低いことが示された。

そこで本研究では医学的な妥当性をもつ医用画像分類システムに向けて、専門医の注目領域を訓練データとして与えて可視化マップに示されるモデルの注目領域を訓練する手法を提案する。更に、注目領域の妥当性向上に伴う分類性能の向上を図った。

2. 提案モデル

本研究で用いた DCNN モデルの概略を図 1 に示した。提案する DCNN モデルは一枚の画像を入力とし、画像の分類結果を出力するとともに分類において注目された領域を二種の可視化マップとして出力する。ここで、DCNN を用いた医用画像鑑別システムにおいて生成される注目領域の可視化マップとして、Grad-CAM により生成される活性化マップ及びアテンションマスク³⁾を用いた。

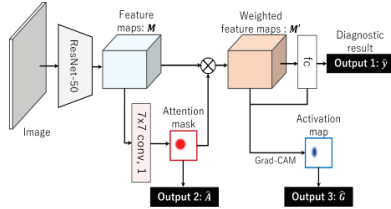


図1 提案モデルの概略

学習に際しては、モデルによる鑑別結果と正解の鑑別結果の差、モデルの注目領域と専門医により示された臨床上に有意な領域(正解領域)の差のそれぞれから損失関数の計算を行った。

3. 実験データ

実験においては、溺死症例 153 症例, 非溺死症例 160 症例分の PMCT 画像を合計で 8360 枚を用いた。用意したデータは 25 症例分をテストデータとし, 残りのデータの内の 90% を学習データ, 10% を検証データとした。

さらに, 提案法は明示的に有意な特徴の存在する位置を提示することができるため, 比較的少数のデータでも特異的な特徴が抽出可能であり, より多数のデータを用いて訓練されるシステムと比較しても十分な鑑別性能が確保できる可能性が考えられる。これを検証するために, 本研究では学習データの数を制限して実験を行った。このとき学習データの数は全学習データの 20%, 40%, 60%, 80% とした。

4. 鑑別性能に関する評価

今回用いる手法の効果を検証するために, 本研究では複数の手法を用いてモデルを学習させた。基準となる Model-C は, 従来通り畳み込み層と全結合層による鑑別を行い, それをもとに学習が行われる。Model-SA は空間方向の注意機構を導入したモデルであり, さらにアテンションマップをもとにした損失から学習を行うモデルを Model-AF とした。最後に, 以上の機構に加え, 顕著性マップをもとにした損失を用いて学習を行うものを Model-VF とした。これらについて 5 分割交差検証により性能の評価を行った。

鑑別性能を表す Area Under the receiver operating characteristic Curve (AUC)の結果を図 2 に示した。すべてのデータを用いるといずれのモデルにおいても AUC=0.96 程度の十分に高い鑑別性能が確認された。更に, 学習に利用できるデータ数を 40%削減して検証を行ったところ, 提案法である Model-VF においては AUC=0.96 と従来法の AUC=0.91 と比べて上昇していることが確認された。この鑑別性能は 1.7 倍のデータを用いて従来法により学習されたモデルと同等の性能であった。

5. 注目領域に関する評価

モデルの分類における注目領域の専門家の作成した正解領域との一致を Intersection over Union

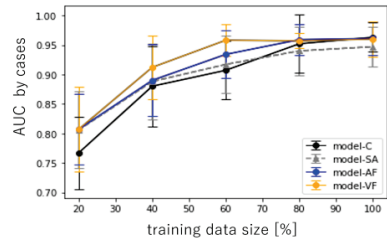


図2 データサイズと AUC の関係

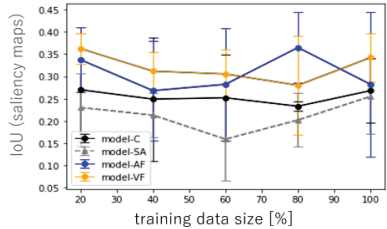


図3 データサイズと IoU の関係

(IoU) により評価した。

提案法により得られた顕著性マップに関して, 正解領域との一致は溺死症例の分類において IoU = 0.34 を示し, 従来法における IoU=0.27 と比較して上昇がみられた。

5. まとめ

提案モデルは分類において専門医に近い領域へ注目することから, 医学的に妥当な根拠を基にした鑑別が可能となり, 深層学習を用いた CAD システムの信頼性の向上に寄与することが期待される。加えて, 少数データによる学習時にも高い分類性能の確保が可能なることから, 自然画像と比較して入手可能な枚数が少ない医用画像の鑑別に向けた CAD システムの構築に向けて有効である可能性が示された。

文献

- 1) Zeng, Y., Zhang, X., Kawasumi, Y., Usui, A., Ichiji, K., Funayama, M. and Homma, N.: A 2.5D Deep Learning-Based Method for Drowning Diagnosis Using Post-Mortem Computed Tomography, IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, Vol. 27, pp. 1026–1035 (2023).
- 2) Selvaraju, R. R., Cogswell, M., Das, A., Vedantam, R., Parikh, D. and Batra, D.: Grad-CAM: Visual Explanation from Deep Networks via Gradient-Based Localization, International Journal of Computer Vision, Vol. 128, (2020).
- 3) Zagoruyko, S. and Komodakis, N.: Paying more attention to attention: Improving the performance of convolutional neural networks via attention transfer, arXiv preprint arXiv:1612.03928 (2016).

修士学位論文要約（令和6年3月）

GaN on Si パワーデバイスを用いたデータセンター向け 小型・高効率 48V 降圧コンバータに関する研究

宮崎 俊輔

指導教員：遠藤哲郎

Study on Compact and High Efficiency 48V Buck Converter for Data Centers with GaN on Si Power Device

Shunsuke MIYAZAKI

Supervisor: Tetsuo ENDOH

For low power consumption in data centers, 48V buck converters are required to be placed on the motherboard. 48V buck converters must be compact because it is placed on the motherboard and highly efficient because it handles a large amount of power. Conventional 48V buck converters use hybrid circuits to achieve high efficiency even with Si power devices. However, hybrid circuits have the problem of a large number of components and large size. Compared to Si power devices, GaN on Si power devices are expected to achieve higher efficiency due to their low ON-resistance and fast switching characteristics. In this study, compact size is achieved by applying GaN on Si power device and synchronous rectifier buck converter, and higher efficiency is achieved by applying GaN on Si power device and optimizing IC control. The evaluation items were power conversion efficiency, number of components, and size.

1. はじめに

近年のインターネットデータ通信量の増大によって、データセンターの消費電力が増大している。データセンターの消費電力低減には供給電圧の高電圧化による配線損失の低減が挙げられ、サーバーにおけるマザーボードの供給電圧は 12V から 48V へ高電圧化している。それに伴い 48V 降圧コンバータが求められ、マザーボード上に配置されるため小型、大きな電力を扱うため高効率という特性が求められる。本研究では、2 段階降圧を想定して 48V 降圧コンバータの出力電圧を 12V とした。

従来の 48V 降圧コンバータはスイッチトキャパシタ回路と同期整流式降圧コンバータを組み合わせた Hybrid 回路により、Si パワーデバイスでも高効率を実現している。しかし、Hybrid 回路は部品点数が多いため回路のサイズが大きくなるという課題がある。この課題に対して本研究では、部品点数が少なく回路のサイズを小さくできる同期整流式降圧コンバータでも高効率となるよう検討を行った。

本研究で検討した 48V 降圧コンバータは、パワ

ーデバイスにワイドギャップ半導体である GaN on Si (Gallium Nitride : 窒化ガリウム)、回路方式に同期整流式降圧コンバータを適用した。しかし、Si パワーデバイスよりも低損失な GaN on Si パワーデバイスの適用だけでは、Hybrid 回路を適用した従来の Si 製 48V 降圧コンバータの電力変換効率より低効率であるため、GaN on Si 製 48V 降圧コンバータの IC 制御の最適化を行うことで、高効率化を検討した。

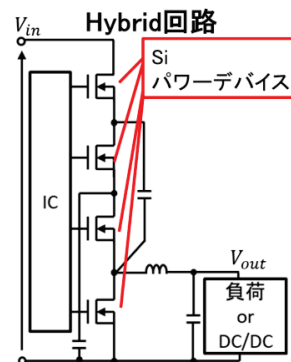


図 1 従来の Si 製 48V 降圧コンバータの構成

同期整流式降圧コンバータ

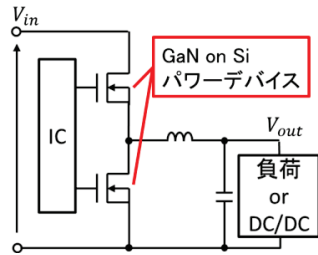


図2 本研究で検討した
GaN on Si 製 48V 降圧コンバータの構成

2. GaN on Si パワーデバイス適用による 48V 降圧コンバータの小型化・高効率化

GaN on Si パワーデバイスは Si 基板上に GaN を成長させたパワー半導体デバイスである。GaN on Si パワーデバイスは絶縁破壊電界などの電気的特性やデバイス構造から、低特性オン抵抗と高速スイッチング特性という特長を有している。

サイズでは、GaN on Si パワーデバイスを適用することで、低特性オン抵抗という特長により同耐圧・抵抗値の場合 Si パワーデバイスと比較しデバイス自身のサイズを小さくできることから小型化が期待できる。

電力変換効率では、低特性オン抵抗による導通損失の低減、高速スイッチング特性によるスイッチング損失の低減により高効率化が期待できる。また、ボディダイオードが存在せず、逆回復損失が生じないことから高効率化が期待できる。

3. 高効率 GaN on Si パワーデバイス製 48V 降圧コンバータの開発と電力変換効率測定結果

GaN on Si パワーデバイスと同期整流式降圧コンバータを適用した 48V 降圧コンバータ (GaN on Si 製 48V 降圧コンバータ) と従来の Si 製 48V 降圧コンバータの電力変換効率を測定すると、従来の Si 製 48V 降圧コンバータの方が高効率であった。この課題に対し、本研究では IC 制御の最適化を行うことで高効率 GaN on Si 製 48V 降圧コンバータを開発した。IC 制御の最適化は、軽負荷動作時と重負荷動作時に最適なデッドタイム値の設計、軽負荷動作時の動作モードの変更、出力電流によって動作フェーズ数の変更について行った。

開発した高効率 GaN on Si 製 48V 降圧コンバータの電力変換効率を測定すると、従来の Si 製 48V 降圧コンバータと比較し一部の出力電流を除いて高効率であることを確認した。また、低効率であった出力電流においても、開発した高効率 GaN on Si 製 48V 降圧コンバータは十分な電力変換効率である

ことを確認した。

4. 開発した高効率 GaN on Si 製 48V 降圧コンバータ向けのパワーデバイスの性能算出

開発した高効率 GaN on Si 製 48V 降圧コンバータは従来の Si 製 48V 降圧コンバータと比較し、一部の出力電流範囲において低効率であることを確認した。この課題に対し、本研究では回路内でより大きな損失を生じるパワーデバイスについて考察を行った。

パワーデバイスにはオン抵抗や寄生容量といった損失を生じるパラメータがあり、従来の Si 製 48V 降圧コンバータよりも高効率となるために求められる性能の算出を行った。算出した性能に対し、GaN の理論限界の範囲より実現可能であることを確認した。

5. 48V 降圧コンバータの部品点数・サイズの評価

全体の部品点数・サイズをパワーデバイス、インダクタ、Hybrid 回路用コンデンサとして評価を行った。GaN on Si 製 48V 降圧コンバータが従来の Si 製 48V 降圧コンバータより部品点数とサイズの大幅な低減を確認した。従って、GaN on Si パワーデバイスと同期整流式降圧コンバータの適用による 48V 降圧コンバータの小型化を確認した。

6. まとめ

データセンターの高電圧化にはマザーボード上に配置される 48V 降圧コンバータが求められ、その特性として小型・高効率が挙げられる。

本研究では、従来の Si 製 48V 降圧コンバータよりも小型・高効率な 48V 降圧コンバータとなる GaN on Si パワーデバイスと同期整流式降圧コンバータを適用した 48V 降圧コンバータの開発を行った。開発では IC 制御の最適化を行った。この IC 制御の最適化により、従来の Si 製 48V 降圧コンバータと比較し、部品点数かつサイズの大幅な低減をしながら、同等の電力変換効率の実現を可能とした。

本研究の成果は、データセンターの高電圧化に貢献できるものと考えられる。

文献

- 1) Alex Lidow, Michael de Rooji, Johan Strydom, David Reusch, John Glaser, "GaN Transistors for Efficient Power Conversion", John Wiley Sons Ltd, Second Edition, 2015

修士学位論文要約（令和 6 年 3 月）

60kV 級 CV ケーブルにおける水トリー劣化の進行と劣化診断指標の相関性に関する研究

山田 文斗

指導教員：斎藤 浩海， 研究指導教員：八島 政史

Study on Correlation between Progression of Water Trees Degradation and Degradation Diagnostic Index in 60kV Class XLPE Cable

Fumito YAMADA

Supervisor: Hiroumi SAITOH, Research Advisor: Masafumi YASHIMA

Water tree is one of the causes of insulation deterioration of XLPE cable. In order to detect deterioration signals caused by water trees, the AC loss current method is actually applied as an insulation deterioration diagnosis method for 60kV class XLPE cables. In this method, the third harmonic component caused by water trees is used as a deterioration index, but its relationship with the state of water trees inside the cable is not clear. In this study, we first observed the water trees present in four 60 kV class removed XLPE cables. Next, we reproduced the observed water tree using an electric field model, performed a simulation assuming future water tree extension, and analyzed the AC loss current and dielectric breakdown voltage. Finally, we considered the correlation between water tree and deterioration index based on the simulation results.

1. はじめに

60kV 級撤去 CV ケーブルに対して実施された前駆遮断試験の結果から、水トリーの発生様相は、局所的に存在する未橋絡の水トリーが絶縁性能の低下要因となることが報告されている¹⁾。このような水トリーに起因する劣化信号を検出するために、CV ケーブルに対する絶縁劣化診断技術として交流損失電流法が実適用されている。この手法では交流損失電流 (I_{loss}) に含まれる第 3 次高調波成分の波高値 (I_3) と重畳位相 (θ_3) が劣化指標とされているが、ケーブル内部の水トリーの状態との相関関係は明確ではない。

そこで、本研究では前駆遮断試験と交流損失電流測定のため実施された 4 線路の 60kV 級撤去 CV ケーブルを対象に前駆遮断点の断面とそれ以外の絶縁体断面のスライス片から水トリーの発生様相を観察した。次に観察から得られた水トリーを電界モデルで再現し、今後の水トリー伸展を想定した劣化シミュレーションを行い、劣化指標との相関関係について考察した。

2. 水トリーの電界モデルの作成と物性値の設定

本解析では、有限要素法に基づく電界計算ソフト (Simcenter MAGNET Electric) を用いた。本研究では、前駆遮断試験結果から 4 線路の内、最も絶縁性能が低下していた線路を対象に電界モデルによるモデル化を行った。前駆遮断点で観察された内導到達ボウタイトリー (以下、内導到達 BTT) は撮影画像から輪郭形状を読み取り、全長を一致させて、1.11mm となるように

モデルを作成した (図 1)。次に、前駆遮断点以外の絶縁層で観察されたボウタイトリー (以下、BTT) については、様々な長さや形状をもつものが多数存在することから個別にモデル化することは困難であった。そこで、BTT の代表的な形状を表す標準モデルを設定し、これが絶縁層内に分散していると仮定した。標準モデルの形状はボウタイ状を模擬するため、回転楕円体を 2 つ連結させたモデルとし、寸法については観察された BTT の平均長さと同さを適用した。ここで、先行研究より、ケーブル全体に流れる第 3 次高調波成分 (I_3) は BTT の総体積に依存すると推定されること²⁾ から観察した絶縁層のスライス片 1 枚の中で最も I_3 に寄

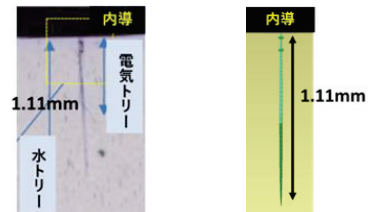


図 1 内導到達 BTT とそのモデル

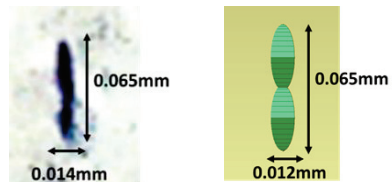


図 2 BTT とその標準モデル

与していると推定される長さをBTT長とスライス片1枚当たりの総体積の関係から算出した。その結果、0.065mmとなり、この長さを標準モデルの長さに設定した上で、算出した縦横比を適用し、標準モデルを作成した(図2)。

内導到達BTTは100mm長のケーブルモデルの内、50mmの位置を前駆遮断点として内導に接して配置した。標準モデルの配置箇所は文献²⁾を参考にひとつの断面に50本配置し、この断面を2.0mm間隔で48層配置した。各種物性値は文献²⁾を参考に設定した。

3. 今後の水トリー伸展を想定したシミュレーション

60kV級撤去CVケーブルを撤去せずに運用し続けた場合、第3次高調波成分(I_3 , θ_3)と絶縁破壊電圧(V_{BD})がどのように変化するか解析を行った。解析では2節で作成したモデルを基本形状として内導到達BTTの長さを1.5mm, 2.0mm, 2.5mm, 3.0mmに変化させると同時に、標準モデルの長さを0.07mm, 0.08mm, 0.09mm, 0.1mmと変化した。 I_3 , θ_3 の解析において印加電圧は15kV, 50Hzとし、 V_{BD} の解析では15kVから内導到達BTTの先端電界が電気トリー発生電界とされている220~300kV/mm³⁾を超えるまで段階的に増加させた。図3に I_3 , θ_3 , 図4に V_{BD} の解析結果を示す。図3よりBTTの長さが長くなるほど I_3 の値は増加し、 θ_3 の値は0°から-90°方向にシフトした。また、図4より内導到達BTTの長さが長くなるほど先端電界が高まり、 V_{BD} は低下した。ここで、一線地絡時の健全相電圧上昇値66kVに対して1.5倍程度の裕度を考慮した100kVまでを所要絶縁レベルとした場合、内導到達

BTTが約2.25mmを超えると危険度が高まると考えられる。

以上の解析結果から I_3 はBTTの体積と θ_3 はBTTの縦横比、 V_{BD} は内導到達BTTの長さ強く相関性を持つと考えられる。また、水トリー長を長くするにつれて I_3 と V_{BD} は劣化度が重度の方向に変化したのに対して、 θ_3 は劣化度が逆に軽度の方向に変化している。ここで、交流損失電流法の定説では θ_3 は「水トリー長や破壊強度などの劣化の程度と相関性を持つ」⁴⁾とされているが、 θ_3 は V_{BD} に対して相反する傾向を示しているため、 θ_3 を劣化指標とすることには不十分な点があると考えられる。

4. まとめ

60kV級CVケーブルに存在する前駆遮断点の内導到達BTTおよびそれ以外の絶縁層におけるBTTの発生様相を観察した。また、観察された水トリーをモデル化して今後の水トリー伸展を想定したシミュレーションを行い、交流損失電流および絶縁破壊電圧の解析を行った結果、以下のことが判明した。水トリーの伸展に対して、 θ_3 と V_{BD} は劣化の方向が相反しており、 θ_3 と V_{BD} は直接的には関係しないことが示唆された。これらの知見を総括すると交流損失電流法は絶縁面の劣化(V_{BD})の診断には課題があるが、損失面の劣化(I_3 , θ_3)を診断することには有効であると考えられる。一方で、前駆遮断試験は絶縁面の劣化を診断することには有効であるが、現場適用は不可能である。そのため、今後は絶縁性能を評価できる現場適用可能な診断法の開発が推奨される。

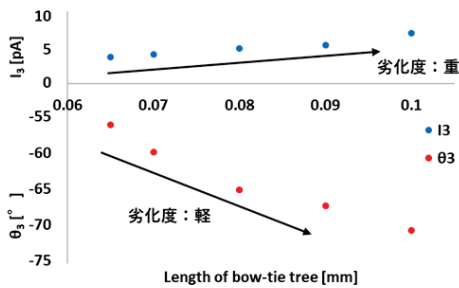


図3 BTT長と I_3 , θ_3 の関係

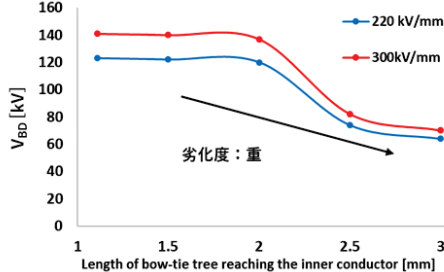


図4 内導到達BTT長と V_{BD} の関係

文献

- 1) 高橋俊裕・栗原隆史・岡本達希:「乾式架橋方式60kV級撤去CVケーブルの絶縁破壊前駆遮断による絶縁性能の経年低下特性と低下要因の把握」, 電学論 B, Vol.140, No.4, pp.299-304 (2020)
- 2) 木樽 翼・板垣航大・八島政史:「60kV級CVケーブルにおける水トリーのモデル化—撤去ケーブルにおける微小ボウタイトリーの個数—長さ分布の評価と交流損失電流の推定—」, 電気学会 誘電・絶縁材料/電線・ケーブル合同研究会, DEI-22-054/EWC-22-010 (2022)
- 3) 片貝昭史・日渡重雄・鈴木弘:「ボウ・タイ状水トリーからの電気トリー発生メカニズムの検討」, 電学論 A, Vol.139, No.5, pp.264-276 (2019)
- 4) 八木幸弘・田中秀郎・武藤秀二・木村人司:「損失電流高調波成分によるCVケーブル劣化診断法の検討」, 電学論 B, Vol.119, No.4, pp.438-444 (1999)

修士学位論文要約（令和6年3月）

耐エラー数表現に基づく省エネルギー
不揮発ニューラルネットワークの構成

浅野 健

指導教員：羽生 貴弘， 研究指導教員：夏井 雅典

Design of an Energy-Efficient Nonvolatile Neural Network
Based on Error-Tolerant Data Representation

Ken ASANO

Supervisor: Takahiro HANYU, Research Advisor: Masanori NATSUI

This paper demonstrates that quantized neural networks (QNNs) exhibit high tolerance to bit errors in weights and an output feature map. Since probabilistic switching errors in MTJ devices do not have always a serious effect on the performance of QNNs, large write energy is not required for reliable switching operations of MTJ devices. Based on the evaluation results, we achieve about 80% write-energy reduction on buffer memory compared to the conventional method. In addition, it is demonstrated that binary representation exhibits higher bit-error tolerance than the other data representations in the range of large error rates.

1. 緒言

Deep Neural Network (DNN) の実世界応用に向けて、量子化ニューラルネットワーク (NN) を高エネルギー効率なハードウェアとして実装することが期待されている。上記の需要に応えるため、不揮発記憶機能を有する Magnetic Tunnel Junction (MTJ) 素子を活用した回路技術が注目されているが、MTJ 素子に内在する確率的特性により、確実なデータの書込みには大きなエネルギーを要する点が課題である。

本論文では、NN のエラー耐性を利用することで素子の確率的動作を許容し、書込みエネルギーを削減する手法を紹介する。複数のデータ表現の量子化 NN を対象としてそのエラー耐性を検証し、提案手法の有効性を確認した。

2. エラー耐性を活用した書込みエネルギー削減

MTJ 素子を用いた回路設計において考慮すべき点の一つとして、素子のもつ確率的なスイッチング特性がある[1]。MTJ 素子の状態変化は書込みに用いる電流に依存するため、十分な電流量または時間を素子に印加しない場合、確率的な書込みエラーが生じる。書込みエラーによる回路性能の劣化を防ぐため、従来では十分な電流量または時間を素子に印加しなければならず、大きな書込みエネルギーを要する点が課題となっている。一方で、NN は潜在的にエラー耐性を有することが知られている[2][3]。この性質を利用し、量子化 NN の性能に影響を与えない範囲で書込みエラーを許容することで、書込みエネルギーの削減が可能

となる。以上の観点から、量子化 NN の許容できるエラー率を見積もるため、MTJ 素子の書込みエラーがその性能に与える影響を評価する。量子化の度合いがエラー耐性に与える影響についても十分な検討がなされていないことから、複数のデータ表現の量子化 NN を対象にエラー耐性の評価を行う。

3. エラー耐性評価環境の構築

図1に量子化 NN のエラー耐性の評価手順を示す。重みと活性化に量子化を適用した量込み NN を対象として評価を行う。量子化のデータ表現には二値表現 (Binary) とビット長の異なる固小数点表現 (Fxp) を含む4種類を検討する。学習後の重みまたは各層の中間出力 (特徴マップ) を不揮発メモリに書込む際に確率的なエラーが発生すると想定し、エラー発生確率と認識精度の関係を評価する。図3に各データ表現におけるエラー付与の手順を示す。各ビットに一律な確率でエラーを発生させることで MTJ 素子の書込みエラーを再現する。

4. 性能評価

図3に量子化 NN のエラー耐性の評価結果を示す。量子化 NN は、エラー率が増加しても一定程度の認識精度を保っている。各データ表現の違いに着目すると、エラー率が比較的大きい範囲では Binary を適用した NN のエラー耐性が高いことを確認した。

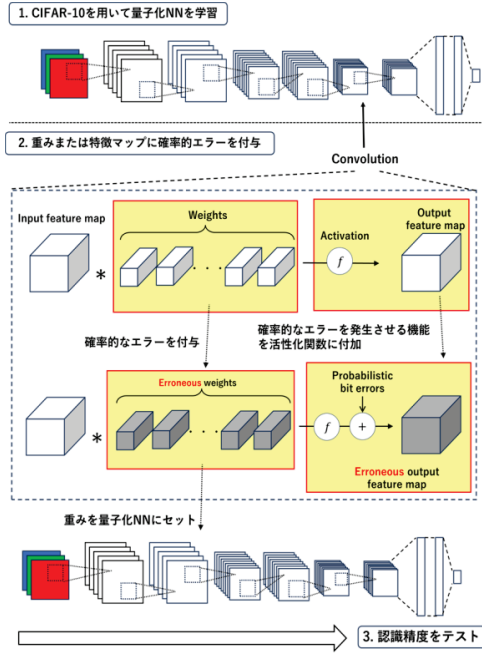


図1 量子化 NN のエラー耐性の評価手順

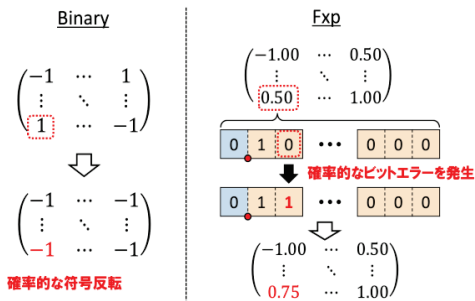


図2 各データ表現におけるエラー付与の手順

重みにエラーを発生させる場合と特徴マップにエラーを発生させる場合を比較すると、特徴マップに生じるエラーが量子化NNの認識精度に与える影響が小さいことが確認できる。一般的に、各層の中間結果を保持するバッファメモリは重みを保持するストレージメモリと比較して書き込み頻度が高いため、この性質を活用することによる積極的な書き込みエネルギーの削減が期待できる。例として、MTJ素子を用いたバッファメモリに特徴マップを保持する際の書き込みエラーを2.40%許容するとした場合、約80%の書き込みエネルギーの削減が可能となる。

量子化NNの認識精度の減少は3%未満

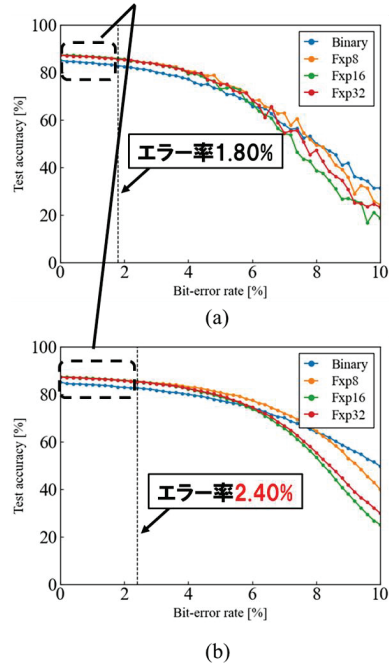


図3 量子化 NN のエラー耐性: (a) 重みに発生するエラー率と認識精度の関係. (b) 特徴マップに発生するエラー率と認識精度の関係

5. 結言

本論文では、MTJ素子の書き込みエラーが量子化NNの性能に与える影響を複数のデータ表現を対象にして評価を行った。素子の確率的動作を許容しながら省エネルギー化を実現するNNハードウェアの可能性を示した。

文献

- 1) D. Bedau, H. Liu, J. Sun, J. Katine, E. Fullerton, S. Mangin, and A. Kent, "Spin-transfer pulse switching: From the dynamic to the thermally activated regime," *Applied Physics Letters*, vol.97, no.26, 2010.
- 2) L. Yang et al., "Bit Error Tolerance of a CIFAR-10 Binarized Convolutional Neural Network Processor," 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2018, pp. 1-5.
- 3) Z. Yan et al., "When Single Event Upset Meets Deep Neural Networks: Observations, Explorations, and Remedies," 2020 25th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC), 2020, pp. 163-168.

謝辞

本研究の一部は本成果の一部は JST CREST (JPMJCR19K3), NEDO (JPNP16007), CRP (R05/B17) および JSPS 科研費 (JP21H03405, JP21H04868) の助成を受けたものである。

修士学位論文要約（令和6年3月）

中赤外減衰全反射法による汚水中窒素化合物分析に関する研究

新井 蓮

指導教員：松浦 祐司

Measurement of Nitride Concentration in Sewage by Mid-infrared ATR Method

Ren ARAI

Supervisor: Yuji MATSUURA

In order to properly treat nitrogen compounds present in wastewater and sewage, it is important to accurately analyze the concentrations of those compounds. This thesis focused on infrared absorption spectroscopy, which can detect various components simultaneously, and investigated the measurement of the concentration of nitrogen compounds by ATR spectroscopy using a simple measurement system.

1. はじめに

廃水や下水に起因する水環境問題の原因のひとつは、水中に存在する窒素化合物による富栄養化である。この富栄養化を防止するためには、家庭や工場から排出される窒素化合物を適切に処理することが不可欠であり、その際には、排水中のアンモニア ($\text{NH}_3 \cdot \text{NH}_4^+$) 成分を亜硝酸 (NO_2^-) と硝酸 (NO_3^-) に変換し、最終的に窒素ガスとして大気中に拡散させる必要がある。これらのプロセスを効率的に行うために、多成分を同時に分析できるリアルタイム分析装置のニーズが高まっている。

従来法としては、イオン電極法があるが、頻繁な校正が必要なおえ、多成分同時測定が困難であった。そこで本研究では、上記の窒素化合物が中赤外領域に明瞭な吸収ピークを示すことに着目し、簡易な測定系を用いた ATR 分光法により、これらの成分を同時に検出することについて検討した。さらには曝気処理による各成分の変化についても、同時検出を試みた。

2. 測定方法

図 1 に測定システムの概略を示す。FT-IR から照射された赤外光は平面鏡と凹面鏡で反射し、台形プリズム (幅 24mm, 高さ 2.3mm) に入射する。プリズム内の上面で 8 回、下面で 7 回反射した後、光は液体窒素冷却 HgCdTe 検出器で検出される。プリズム上面で全反射した際にわずかに漏れるエバネッセント場は、プリズム上面に塗布された試料に吸収され、吸収スペクトルが得られる。

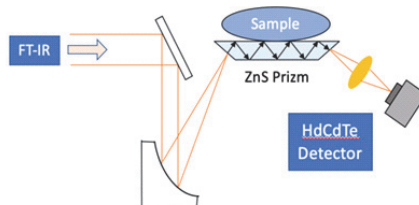


図 1 測定系

本システムによる測定プロセスは以下の通りである。亜硝酸性窒素標準液、硝酸性窒素標準液、アンモニア性窒素標準液を調製する。

- (1) バックグラウンドとして純水の吸収スペクトルを測定する。分解能は 4 cm^{-1} 、積分回数は 256 回、積分時間は 64 秒とした。
- (2) 各サンプルの吸収スペクトルを測定する。分解能、積分回数、積分時間はバックグラウンド測定と同じにした。

3. 測定結果

図 2 に 1000 ppm における NO_2^- 、 NO_3^- 、 NH_4^+ の吸収スペクトルを示す。 NO_2^- のピークは 1230 cm^{-1} 付近、 NO_3^- は 1450 cm^{-1} から 1300 cm^{-1} の範囲、 NH_4^+ は 1450 cm^{-1} 付近に確認された。これにより、3 つの窒素化合物を区別できることが確認された。個々の窒素化合物の検出限界を測定してみると、 NO_2^- は 3 ppm まで、 NO_3^- は 1 ppm まで検出できたが、 NH_4^+ は 100 ppm では NO_2^- や NO_3^- に比べて検出精度が低かった。そのため、 NH_4^+ の吸収スペクトルを経時的に測定すると、 1100 cm^{-1} と 1270 cm^{-1} に NH_3 の吸収ピークが見つかった。これは、水中の NH_4^+ が時間とともに NH_3 に変換されることを示唆している。

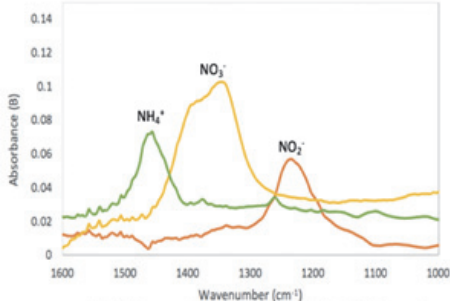


図2 NO₂⁻, NO₃⁻, NH₄⁺ の吸収スペクトル

実用化のためには、各成分の濃度のリアルタイム測定が必要である。そこで窒素化合物の混合物の吸収スペクトルを測定し、個々の化合物の吸収スペクトルと同様のピークを検出できることを確認した。さらに検出限界を評価するために、重回帰分析を適用することについて検討した。当初は 1000 ppm における NO₂⁻, NO₃⁻, NH₄⁺ の吸収スペクトルを説明変数として用いたが、精度が悪かったため、より低濃度な 100 ppm における NO₂⁻, NO₃⁻, NH₄⁺ の吸収スペクトルを説明変数として用いることとした。図 3 は、NO₂⁻, NO₃⁻, NH₄⁺ の比率を変えた混合物の吸収スペクトルと、100 ppm における NO₂⁻, NO₃⁻, NH₄⁺ の吸収スペクトルを説明変数とした重回帰分析の結果である。各試料の組成を表 1 に示す。表に示すように、推定結果は濃度が 10 ppm オーダーの混合物でも比較的正確に濃度を推定しており、混合物の測定限界が 10 ppm オーダーであることが確認された。

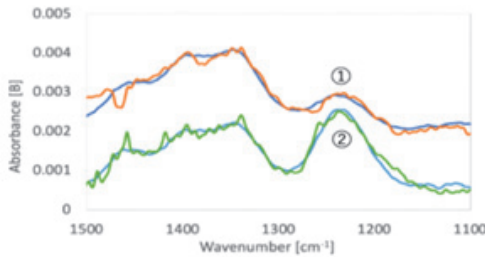


図3 混合物の吸収スペクトルと重回帰分析結果

表 1 各試料の組成

	NO ₂ ⁻ (ppm)	NO ₃ ⁻ (ppm)	NH ₄ ⁺ (ppm)
①TRUE	16.7	16.7	16.7
①Estimated	11.9	17.3	19.6
②TRUE	33.3	16.7	16.7
②Estimated	33.0	13.8	20.8

3. 曝気処理による影響

実際の排水処理では、硝化槽で曝気ブローアにより硝化に必要な酸素量を導入して曝気処理を行う。これにより、アンモニア性窒素が硝酸性窒素に変換される(硝化反応)。そこで、エアポンプによる模擬曝気を用いて窒素化合物の測定を行ったが、窒素化合物の硝化反応による吸収スペクトルの変化は観察されなかった。これは、硝化槽では硝化反応を促進するために硝化細菌を使用しているためである。このことを考慮して、硝化細菌を導入してから曝気を行い NO₂⁻(100 ppm)と NH₄⁺(100 ppm)の吸収スペクトルの変化を測定した。図 4 に NO₂⁻の吸収スペクトルの経時変化を示すが、時間の経過とともに NO₃⁻の吸収ピーク(1450 cm⁻¹付近から 1300 cm⁻¹付近)が確認できる。図 5 は NH₃, NO₂⁻, NO₃⁻の経時的な吸収スペクトルであり、時間の経過とともに NH₃ イオン(1270 cm⁻¹付近, 1100 cm⁻¹付近), NO₂⁻イオン(1230 cm⁻¹付近), NO₃⁻イオン(1450 cm⁻¹付近から 1300 cm⁻¹付近)の吸収ピークが確認できる。これは、模擬曝気と硝化細菌の作用による窒素化合物の吸収スペクトルの変化を確認するものである。この結果は、本測定システムを用いて硝化槽内の反応を検出できることを示している。

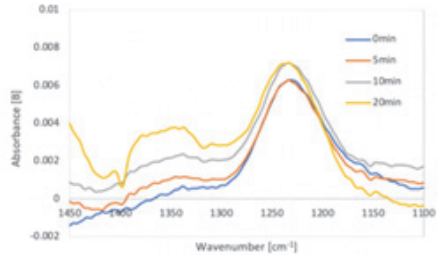


図4 曝気処理による NO₂⁻吸収スペクトルの変化

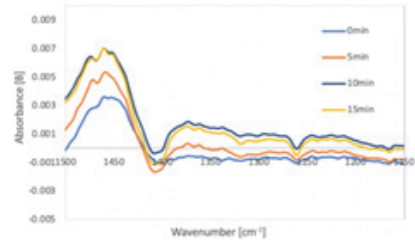


図5 曝気処理による NH₄⁺吸収スペクトルの変化

修士学位論文要約（令和6年3月）

コヒーレントナイキストパルス伝送の長距離化に関する研究

石川 碧人

指導教員：廣岡 俊彦

Study on Long-Distance Coherent Nyquist Pulse Transmission

Aoto ISHIKAWA

Supervisor: Toshihiko HIROOKA

The growth of Internet traffic requires a sustained increase in the transmission capacity of long-haul optical transmission systems. To increase the transmission capacity while reducing the number of channels to save cost, 1 Tbit/s/ch digital coherent transmission systems using quadrature amplitude modulation (QAM) have attracted attention by virtue of their high spectral efficiency. However, the transmission capacity per wavelength has been limited to about 1 Tbit/s due to the bandwidth limitation of electronic devices. Optical time-division multiplexing (OTDM) transmission effectively overcomes this limitation because it makes it possible to realize ultrahigh-speed transmission beyond 1 Tbit/s in exchange for a broad signal bandwidth. OTDM transmission using Nyquist pulses is an attractive technique for simultaneously achieving a single-channel bit rate beyond 1 Tbit/s and high spectral efficiency. The aim of this research is to realize a 1 Tbit/s/ch WDM transmission over 1,000 km with a total capacity of more than 10 Tbit/s using a coherent Nyquist pulse. By lowering the symbol rate with the WDM scheme and introducing a low nonlinear dispersion managed transmission line and PS technology, I achieved a 1 Tbit/s/ch WDM coherent Nyquist pulse transmission over 1,600 km with a total transmission capacity of 21.5 Tbit/s. To the best of my knowledge, this is the first high capacity and long-haul transmission beyond 10 Tbit/s capacity and over 1,000 km distance to be achieved using 1-Tbit/s/ch signals.

1. はじめに

インターネットトラフィックの増大に伴い、長距離光伝送システムの伝送容量の持続的な増大が求められている。伝送容量を増大させながらチャンネル数を削減し、コスト低減を図る方法として、高い周波数利用効率を有する 1-Tbit/s/ch コヒーレント伝送システムが注目されている。これまで、1-Tbit/s/ch の PS (Probabilistically Shaped) 64 QAM 信号を用いた 35-Tbit/s、800 km WDM 伝送¹⁾が実証されているが、総伝送容量が 10 Tbit/s を超え、かつ 1,000 km を超える 1-Tbit/s/ch 伝送は報告されていない。本研究はコヒーレント伝送システムにナイキストパルスを導入し、総伝送容量 10 Tbit/s 以上で、伝送距離 1,000 km 以上の 1-Tbit/s/ch-WDM 伝送を実現することを目的とした。

2. 光ナイキストパルスを用いた OTDM 伝送

図 1 に光ナイキストパルスの周波数スペクトルと時間波形を示す。光ナイキストパルスはナイキストフィルタの Sinc 関数的なインパルス応答と同じ形状を有する光パルスであり、その時間波形は周期的なゼロクロス点を持つ。これによって、光ナイキストパルスを光時分割多重 (OTDM: Optical time-division multiplexing) した際、周波数帯域が狭くパルス同士が時間軸上で重なり合う状態にあってもシンボル間干渉を防ぐことができる。

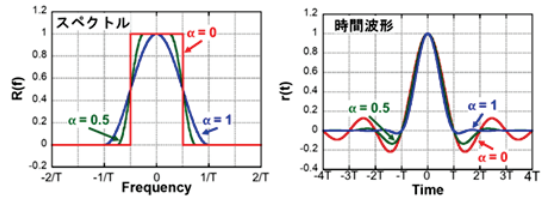


図 1 光ナイキストパルスの周波数スペクトルと時間波形

当研究室では、光ナイキストパルスを用いて、単一チャンネル 15.3 Tbit/s-150 km の超高速コヒーレント 64 QAM 伝送²⁾に成功している。さらに、DQPSK を用いたノンコヒーレント WDM 伝送において、1 チャンネル当たりの速度を 1.28 Tbit/s/ch まで低速化することにより、10.2 Tbit/s-2,100 km 伝送³⁾に成功しており、光ナイキストパルスが超高速伝送だけでなく、長距離伝送においても有用であることを示してきた。本研究では、コヒーレントナイキストパルス伝送についても WDM へ展開し、伝送容量を拡大しつつ長距離化を目指した。

3. コヒーレントナイキストパルス伝送の長距離化に向けた取り組み

本研究ではコヒーレントナイキストパルス伝送の長距離化に向けて大きく 3 つの取り組みを行った。1 つ目はシンボルレートの最適化である。先行研究の単一チャンネル 15.3 Tbit/s 伝送から 1 チャンネル当たりのシ

ンボルレートを低速化し WDM へ展開することで非線形耐力を増大させた。2 つ目は光伝送路の低非線形化である。先行研究では有効コア断面積が小さく長尺な IDF (Inverse dispersion fiber) を分散補償に用いていたが、これを短尺な CFBG (Chirped fiber Bragg grating) に置き換えることで光学的非線形の影響を低減させた。3 つ目は変調方式の改良である。信号配置を確率的に整形する PS-QAM を新たに用いることで、SNR 劣化への耐力増大を実現させた。

4. 総伝送容量 21.5 Tbit/s、1,600 km コヒーレントナイキストパルス伝送実験

図2に伝送システムの構成を示す。送信部の測定チャンネルにおいて、CW-LD と光コム生成器を用いた 10 GHz のパルス光源からの出力をスペクトル整形してナイキストパルスを生成する。また、10 Gbaud PS-32QAM でナイキストパルスを変調し、160 Gbaud に OTDM 多重した後に偏波多重を行う。測定チャンネル以外のダミーチャンネル信号は、モード同期ファイバレーザと高非線形ファイバによって一括して生成している。これらをクロック配信用 LD (Clock) 及び位相同期用パイロットトーン信号 (PT) と合波し、180 GHz 間隔で 23 チャンネルのフル C バンド WDM 信号を生成している。この WDM 信号を、ULAF (Ultra large area fiber) と CFBG を組み合わせた 1 周 160 km の分散マネージ周回伝送路で、1,600 km 伝送させる。ファイバの伝送損失はラマン増幅器で補償している。また、LCoS (Liquid crystal on silicon) 素子により、利得等化と残留分散の補償を行っている。

受信部では光フィルタによって、測定チャンネルと PT 及び Clock をそれぞれ抽出する。PT と Clock を用いて、位相と繰り返し周波数が測定チャンネルの OTDM 信号と同期したナイキスト LO パルスを生成している。この LO パルスを測定チャンネルの OTDM 信号と共に 90° 光ハイブリッドに入射することで、ナイキストパルスの直交性を用いた OTDM 多重分離とホモダイン検波を同時に行っている。検波した信号は A/D 変換した後にデジタル信号処理によってオフラインで復調し、信号品質の指標である NGMI

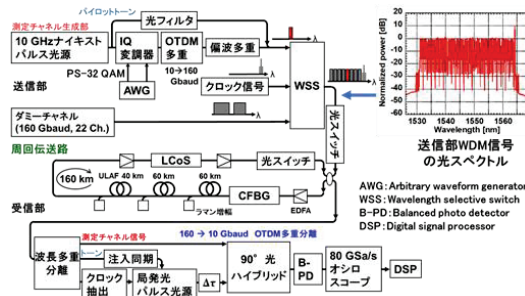


図2 長距離大容量コヒーレントナイキストパルス伝送実験系

(Normalized generalized mutual information)を測定する。

図3に全 23WDM チャンネルの 1,600 km 伝送後の PS-32QAM の復調特性を示す。PS-32 QAM の送信エントロピーを決めるシェイピングパラメータ ν は、伝送性能の波長依存性を考慮し、0.05、0.07、0.09 の 3 段階に設定した。NGMI を全トリビュタリおよび両偏波の平均で評価した結果、全チャンネルで 49.6% オバーヘッド FEC の閾値 0.75^[4] を超える NGMI が得られた。このとき達成した 1 チャンネル当たりの実効伝送容量は、 $\nu=0.05、0.07、0.09$ に対し、それぞれ 1.00、0.943、0.879 Tbit/s であり、合計で 21.5 Tb/s の総伝送容量を達成した。

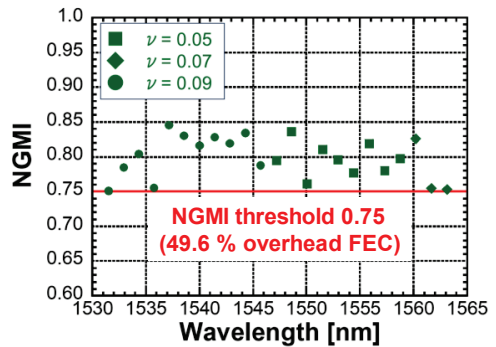


図3 WDM コヒーレントナイキストパルス 1,600 km 伝送結果

5. まとめ

コヒーレントナイキストパルスを WDM 伝送へ展開し、低非線形分散マネージ伝送路の構築および PS 技術の導入により、総伝送容量 21.5 Tbit/s で 1-Tbit/s/ch、PS-32 QAM 信号の 1,600 km 伝送に成功した。これは、これまで報告されている 1-Tbit/s/ch 信号を用いた WDM 伝送の中で最長である。

文献

- 1) T. Kobayashi, M. Nakamura, F. Hamaoka, M. Nagatani, H. Wakita, H. Yamazaki, T. Umeki, H. Nosaka, and Y. Miyamoto, OFC2019, Th4B.2, (2019).
- 2) M. Yoshida, K. Kimura, T. Iwaya, K. Kasai, T. Hirooka, and M. Nakazawa, Opt. Express vol. 27, no. 20, pp. 28952-28967, (2019).
- 3) A. Watanabe, A. Ishikawa, M. Yoshida, T. Hirooka, and M. Nakazawa, OECC2022, MB2-3, (2022).
- 4) A. Alvarado, E. Agrell, D. Lavery, R. Maher, and P. Bayvel, J. Lightwave Technol., vol.33, no. 20, pp. 4338-4352 (2015).

修士学位論文要約（令和 6 年 3 月）

作詞補助システムのための深層学習を用いた歌詞生成に関する研究

井上 真揮

指導教員：伊藤 彰則， 研究指導教員：能勢 隆

Research of lyrics generation using deep learning for lyric assistance systems

Masaki INOUE

Supervisor: Akinori ITO, Research Advisor: Takashi NOSE

In recent years, desktop music (DTM) and singing voice synthesis software such as VOCALOID have become popular. This has led to an increase in opportunities for people to compose music and write lyrics. When writing lyrics to a song melody, it is necessary to select words for the lyrics so that the number of syllables in the lyrics matches the number of corresponding notes. In Japanese, one syllable corresponds to one mora. Because of this difficulty, it is necessary to construct a lyric writing assistance system to help beginners write lyrics. The user enters the beginning of the lyrics and the length of the lyrics that follow, and this system presents candidate lyrics that match the criteria. The system is required to generate lyrics that follow the lyrics entered by the user, generate lyrics with the number of moras entered by the user, and generate multiple lyric suggestions for the user to choose from. Conventional lyric writing assistance systems generate lyrics using an n-gram language model, which has the problem that it cannot take into account the long-term context of lyrics because the pattern of considered sequences increases exponentially with the length of the input sequence. This study suggests long-term context-aware lyric generation method based on the Encoder-Decoder model.

1. はじめに

近年、DTM (Desktop Music) を行うための環境や VOCALOID¹⁾などの歌声合成ソフトが普及してきている。それに伴い、個人が作曲や作詞を行う機会が増えている。曲のメロディに合わせて作詞を行う場合、歌詞の音節の数と対応する音符の数が一致するように歌詞に用いる単語を選ぶ必要がある。日本語では、1 音節が 1 モーラに相当する²⁾。この作詞における制約により、作詞初心者にとって作詞は容易ではない。そのため、初心者の作詞を補助する作詞補助システムを構築する必要がある。システムの利用方法としては、ユーザが歌詞の最初の部分を入力し、後に続く歌詞の長さを指定すると、システムが自動的に複数の歌詞の候補を提案する。従来の作詞補助システム³⁻⁵⁾は、N-gram 言語モデルを用いて歌詞生成を行う。N-gram 言語モデルは、入力系列が長くなると考慮される系列のパターンが指数関数的に増加するため、長期的な歌詞の文脈を考慮できないという問題点が存在する。この問題を解決するため、高橋ら⁶⁾は Encoder-Decoder モデルに基づく長期的な文脈を考慮した歌詞生成手法の検討を行った。

高橋らの手法では長期的な入力が可能になったが、渡邊ら⁵⁾の手法で行われていた、生成した

い歌詞のトピックの指定が行われていない。本研究では、Encoder-Decoder モデルによる感情を考慮した歌詞候補生成システムの構築の検討を行った。

2. Encoder-Decoder モデルによる歌詞生成

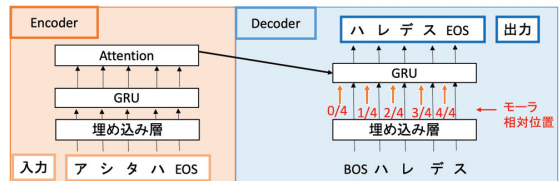


図 1 Encoder-Decoder モデル

図 1 は Encoder-Decoder モデルによる歌詞生成を示している。Decoder の入力はモーラ列と相対位置で、出力はモーラ列である。またこのモデルでは、モーラ相対位置⁶⁾を導入している。

従来法の課題であった、長期的な歌詞の文脈の考慮を解決したが、目標モーラ数に達していない生成が多いという問題が生じた。

3. ビームサーチの導入

図 1 に示すモデルでは、生成結果が目標モーラ数に満たないという問題点があったため、ビーム

サーチを用いて複数の候補を提示しより目標モーラ数に合った生成を行った。通常のビームサーチだと最後のモーラ付近だけが異なる候補だけが生成される。そのため、多様な候補を生成するために、最初のモーラごとに探索木を分けて、それぞれの木についてビームサーチを行った。目標モーラ数が5のときの生成モーラ数の分布結果は、図2のようになった。

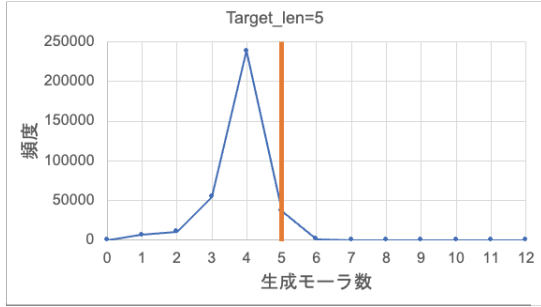


図2 目標モーラ数が5のときの生成モーラ数の分布

図1のモデルと比較すると文章の自然性が大幅に改善されたが依然として生成モーラ数は目標モーラ数に満たないものが多かった。

4. BERT エンコーダの利用

生成モーラ数をより目標モーラ数に近づけるために Huggingface の日本語 BERT を利用した。入力には漢字仮名交じり文、出力をモーラ列とした。BERT を使用した場合と使用していない場合の生成文の例を表1に示す。目標モーラ数は7である。日本語 BERT を利用したことで、目標モーラ数よりも小さいモーラ数の生成を減らすことができた。

表1 各エンコーダの生成文の比較

文脈	正解	GRU エンコーダ	BERT エンコーダ
行く場所なんてどこでも イクバシヨナンテドコデモ	イイアナタ	ナクナッテルノ カワッテルノ アイニクノ イナイノカナ イッショダッタ	タイセツナガラ タイセツナガル コノセカイノ タイセツナカ
風に吹かれた髪をそっとかき カゼニフカレタカミソツトカキ	アゲルシグサガ	ヲカケテルノ ヲツクッタノ ダスコトバデ ダスアッタノ ガアッタダ	キズカナイデ キズカナイデ キズカナイデル コトバカシミ ナガレテクレル
水たまりに落ちた花 ミズタマリニオチタハナ	ヲヒロウコトワ	ワカッテルノ ノイロヲシ カオシエテク ワカッテルヨー	スコンダケガラ スコンダッタノ サガシタイタノ サケンダイクヨ スコンダケノセ

5. 歌詞生成への条件の導入

以上で提案した Encoder-Decoder モデルでは、単に文脈の後に来やすいフレーズを生成していた。実際にシステムを使用する際は、ユーザが意図した歌詞を生成する必要がある。そこで、文脈に加えてセンチメントが入力できるようなモデルに変更する。生成文の例を表2に示す。

表2 センチメントを導入した際の生成文

文脈	正解	Sentiment=0	Sentiment=1
行く場所なんてどこでも	イイアナタ	タカツタダヨ タカツタヨニ タカツタダロ タノワタシダケ ワタシノナカニ	タノワタシダッ タノワタシダイル タノワタシダイル タノワタシダイル タノワタシダイル
風に吹かれた髪をそっとかき	アゲルシグサガ	タノダロウカイ ワラッテイタン タノワタシダケ タノダロウナラ ワラッテイタイ	ノオモイダセズ ノオモイダセバ ノオモイダシタ ノオモイヲオシ ワラッテイタノ
水たまりに落ちた花	ヲヒロウコトワ	タノダロウマエ タノダロウナラ タノワタシダケ ワダレモイナク ナンチコトバヲ	ノオモイヲミテ ノオモイヲシテ ノオモイダセテ タノダロウマデ タノダロウカナ

センチメントを入力に使用することで生成モーラ長が目標モーラ長に近づいたことが確認できた。しかしながら、センチメントの値ごとに似たような候補が生成されてしまった。この原因として、コンテキスト・目標モーラ数・センチメントを入力して候補を生成したために、目標モーラ数の制約が強くなったことがあげられる。

6. まとめ

Encoder-Decoder モデルに対して、ビームサーチを実装し長い文脈を考慮しつつ生成モーラ数ある程度制御可能であることを確認した。また BERT を使用し生成モーラ数をより制御することができることと、文章として成立した生成が可能になることを確認した。最後に、センチメントの導入により異なった生成を可能にし、ユーザにとっての利便性の向上を図った。

文献

- 1) Kenmochi, "VOCALOID and Hatsune Miku phenomenon in Japan," In Proc. Interdisciplinary Workshop on Singing Voice, 2010.
- 2) Fukayama, "Automatic song composition from the lyrics exploiting prosody of the Japanese language," In Proc. 7th Sound and Music Computing Conference (SMC), pp. 299-302, 2010.
- 3) Abe and Ito, "A Japanese lyrics writing support system for amateur songwriters," In Proc. APSIPA-ASC, p. 4, 2012.
- 4) 阿部, 伊藤: "pâtissier-アマチュア作詞家のための作詞補助システム," 情報処理学会研究報告. SLP, 音声言語情報処理 SLP-90(17), pp. 1-6, 2012.
- 5) Watanabe et al., "LyriSys: An interactive support system for writing lyrics based on topic transition," In Proc. the 22nd International Conference on Intelligent User Interfaces, pp. 559-563, 2017.
- 6) 高橋 力哉, 能勢 隆, 伊藤 彰則, "モーラ相対位置を用いた Encoder-Decoder モデルに基づく逐次複数歌詞候補生成の検討," 日本音響学会秋季講演集

修士学位論文要約（令和6年3月）

軽量認証暗号ソフトウェアの実装安全性評価に関する研究

岩佐 大将

指導教員：本間 尚文， 研究指導教員：上野 嶺

Side-Channel Security Evaluation of ASCON Software Implementation

Daisuke IWASA

Supervisor: Naofumi HOMMA Research Advisor: Rei UENO

Side-Channel Analysis (SCA) is a threat that has attracted particular attention among threats to IoT devices. Since the side-channel information leaked from the cryptographic module varies greatly depending on the implementation method, it is often not possible to take it into account at the stage of designing a cryptographic algorithm. Therefore, it is important to evaluate the implementation safety in consideration of implementation. We propose a way to avoid this problem by using multiple side-channel leaks, where the incorrect key has the same estimated power consumption as the correct key at a given leaking part.8

1. はじめに

現在、IoT デバイスへの脅威のうち特に注目されている脅威として、サイドチャネル解析(SCA: Side-Channel Analysis)がある。サイドチャネル解析は暗号化処理時に暗号モジュールから漏洩する物理的情報(消費電力、漏洩電磁波、処理時間など)を用いて、秘密情報を解析する手法である。また、近年注目されている軽量暗号に ASCON がある。ASCON は従来の暗号よりも軽量なため、小型のIoT デバイスへの利用が期待されている。しかし、これまで ASCON のソフトウェア実装に対するサイドチャネル解析の報告例は無く、実装安全性は不明である。そこで本研究では、ASCON のソフトウェア実装に対する実装安全性評価を研究目的とする。

2. ASCON の構成

ASCON は Add constants, Substitution Layer, Liner diffusion Layer 3 つの処理で Permutation の一ラウンドが構成される。本研究ではこのうち、Substitution Layer の Sbox による置換処理を攻撃の対象とする。これは Sbox による置換処理が非線形演算であるため、他の演算と比較し、攻撃が容易であると考えられるからである。攻撃の対象とするソフトウェア実装では 32bit 毎に置換処理が行われる。この時の中間値の出力を表1に示す。表からわかるように鍵01,10は全てのナンスに対して秘密中間値が一致するため、推定消費電力と相関値は完全に同じ値を持つ。したがって、正解鍵を識別できない状態になる。これは他の秘密中間値を利用した場合も同様である。また、d3 に関しては出力がナンスに依存せず一定値を取ることが分かる。したがって、サイドチャネル波形との相関値は

0 となるため、選択関数として利用することができ

表 1:秘密中間値

d0の出力

	00	01	10	11
00	1	1	0	0
01	0	0	1	1
10	1	0	0	1
11	1	0	0	1

d1の出力

	00	01	10	11
00	1	0	0	1
01	0	1	0	1
10	0	1	0	1
11	0	1	1	0

d2の出力

	00	01	10	11
00	1	0	1	1
01	0	1	0	0
10	0	1	0	0
11	1	0	1	1

d3の出力

	00	01	10	11
00	1	1	1	1
01	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	1	1	1	1

d4の出力

	00	01	10	11
00	0	1	1	0
01	0	1	1	0
10	0	0	1	1
11	0	0	1	1

ない。以上の結果より、単一の選択関数を利用する場合は正解鍵と同じ相関値を持つ不正解鍵が出現してしまい、解析を行うことが理論上不可能であることが示された。

3. 複数の漏洩を利用するサイドチャネル解析

この問題を回避する方法として、複数の選択関数を利用することが考えられる。d0-d4 は別々のタイミングで計算されレジスタに格納されるため、デバイスの消費電力が推定する鍵ビットに影響を受けるタイミングは複数回存在する。そこで、複数のタイミングの消費電力を推定し、それぞれのサイドチャネル波形と相関係数を計算することで全ての鍵を識別できる可能性がある。

4. 実験概要

提案した複数の選択関数を用いる解析手法の有効性を、ソフトウェア実装に対する実験を通して評価する。最初に攻撃シナリオや実験条件について概説する。その後、得られた実験結果に対して考察を行う。本実験では攻撃者が暗号化で利用されるナンスの値とそれに対応するサイドチャンネル波形を取得可能であるというシナリオで解析を行う。初期化ベクトルは ASCON-128 で推奨されているパラメータを用いておりと仮定する。実験では、ランダムなナンスを生成し、固定された秘密鍵と初期化ベクトルと結合することで初期内部状態を生成し、これを用いて暗号化処理を行う。今回は中間値を 2 つ (d0,d1) 利用した場合と、3 つ (d0,d1,d4) 利用した場合で実験を行った。それぞれ (d0,d1) と (d0,d1,d4) の置換処理で漏洩するサイドチャンネル波形を取得し、これを解析に用いる。解析方法が有効であることを示すには、全ての鍵パターンにおいて正解鍵が正しく推定され、攻撃成功確率が 1 に収束する必要がある。そのため、本実験では 4 通りの正解鍵を用意し、推定を行った。

5. 実験結果・考察

図 1 と図 2 に中間値を 2 点利用した場合と 3 点利用した場合のそれぞれの実験結果を示す。ここで、横軸は攻撃に使用したサイドチャンネル波形数、縦軸は攻撃成功確率を表している。また、各グラフは推定する秘密鍵を 4 通りに変化させた場合を示している。実験 1 の結果から、全ての正解鍵において

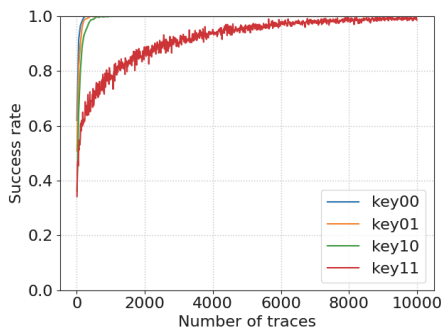


図 1: 2つの中間値(d0,d1)を利用

攻撃成功確率が 1 に収束し、提案した解析方法が有効であることが示された。また、正解鍵ごとに攻撃成功確率が 1 に収束するまでの必要波形数が大きく異なることを確認した。正解鍵 00 においては 600 波形程度である一方、正解鍵 11 は 10,000 波形程度を要した。実験 2 の結果から、中間値を 3 点利用した場合も全ての正解鍵において攻撃成功確率が 1 に収束し、解析方法が有効であることが示された。また、中間値を 2 点利用した場合と比較

し、攻撃に必要な波形数は全ての鍵パターンにおいて、ほとんど変化が見られなかった。

利用する中間値を増やした場合でも、攻撃に必要な波形数が減少しなかった原因について考察する。利用する中間値を増やし、攻撃に成功するためには、

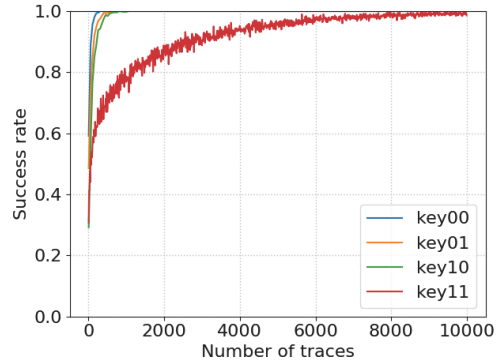


図 2: 3つの中間値(d0,d1,d4)を利用

d4 で計算した相関値が大きい値を持つ必要がある。しかし、d0, d1 の相関値が小さくなる場合、つまり、2つの中間値を利用して推定に失敗している場合は、追加で利用した d4 も相関値が小さくなる。これは利用する波形数が少ないためにノイズの影響が大きくなるためである。一方で、利用する波形数が増えたときには、すでに d0, d1 の相関値が大きくなるため、d4 を利用しても推定結果に変化が現れなかったと考えられる。以上のことから、解析に利用する中間値を増やした場合でも攻撃に必要な波形は減少しなかった。

5. まとめ

本研究では 32bitSW 実装の ASCON に対して新たなサイドチャンネル解析方法を提案し、実機実験によりその有効性を示した。今後の課題としては、より少ない波形数で解析が可能となるような選択関数の調査が挙げられる。

文献

- 1) P. Kocher, J. Jaffe, and B. Jun, "Differential power analysis," in *Advance in Cryptology – CRYPTO :19th Annual International Cryptology Conference* Santa Barbara, California, USA, August 15-19, 1999 Proceedings 19. Springer, 1999, pp.388-397.
- 2) C. Dobraunig, M. Eichlseder, F. Mendel, and M. Schl affer, "Ascon v1. 2," Sub-mission to the CAESAR Competition, vol. 5, no. 6, p. 7, 2016.
- 3) E. Brier, C. Clavier, and F. Olivier, "Correlation power analysis with a leakage model," *ternational Workshop Cambridge, MA, USA, August 11-13, 2004. Proceedings* 6.

修士学位論文要約（令和6年3月）

遅延耐性ネットワークの発信ノードにおける 受信信号強度に基づく中継ノード選択に関する研究

上村 優樹

指導教員：西山 大樹

A Study on Relay Node Selection Based on Received Signal Strength at a Source Node in Delay/Disruption Tolerant Networks

Masaki UEMURA

Supervisor: Hiroki NISHIYAMA

Delay/Disruption tolerant networks technology is capable of communicating in environments where communication infrastructure does not exist. Therefore, this technology can be used to construct an information communication system in the event of a disaster. To improve the probability of information reaching its destination, a source node needs to send information to as many relay nodes as possible. However, the number of successful information transmissions varies depending on which relay node the information is sent to. Therefore, we propose a relay node selection method that improves the number of information transmissions within a certain period of time by utilizing the received signal strength at a source node, and evaluate its effectiveness using computer simulations.

1. Introduction

In the event of a disaster, communication infrastructure may be damaged, and communication may become impossible. Delay/Disruption Tolerant Networks (DTN) technology can be used to construct an information and communication system. In order to improve the probability of information reaching its destination, a source node, which is the source of information, needs to send information to as many relay nodes as possible, and the number of information transmissions varies depending on which relay node the information is sent to. In this study, we consider a relay node selection method that improves the number of information transmissions.

2. System Model

The assumed system model is shown in Fig. 1. This study considers a scenario in which a source node that continues to move sends information to relay nodes that appear in its vicinity. A source node can send information to a relay node only once, and information can be sent to one at a time. The relay node passes across the communication range of a source node, and the time of appearance in the communication range, the speed of movement, and the direction of movement differ from node to node.

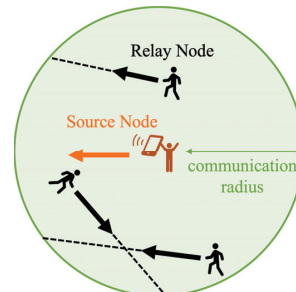


Fig. 1 System Model.

A source node can know the Received Signal Strength Indicator (RSSI) of the relay nodes within its communication range, and the throughput varies depending on the distance between the nodes. When a source node is not transmitting information, it can select a relay node and start a information transmission at the timing for selecting a transmission partner, which occurs at regular intervals. The information transmission continues until the information transmission is completed or the relay node moves out of communication range.

3. Relay Node Selection Issue

Although a source node selects a relay node for a information transmission at the timing for selecting a transmission partner, the number of information

transmissions after a certain period of time varies depending on which relay node the information is sent to and in which order. This is due to differences in the success or failure of information transmissions and the time required to complete a information transmission.

4. Relay Node Selection Method

To improve the number of information transmissions after a certain period of time, this study considers selecting the relay node with the shortest time to complete information transmissions among the relay nodes at the time of selecting a transmission partner. To achieve this, four major steps of control are performed. First, the estimated throughput is calculated from the RSSI history, assuming that the relay node has been communicating with the source node. For this calculation, we refer to the study which describes the relationship between RSSI and throughput [1]. Next, the estimated throughput of each relay node is classified according to whether its estimated throughput is increasing or not, and the future estimated throughput fluctuation is estimated and the predicted transmission capacity is calculated. Then, based on this predicted transmission capacity, we determine the likelihood of transmission completion when each relay node is selected. Finally, a relay node is selected according to whether there is a relay node that is likely to complete transmission.

5. Evaluation by Computer Simulations

To confirm the effectiveness of the proposed method, we evaluated it by computer simulations. There are five comparison methods. The first one, “Random100-Median”, is the median value in 100 random selection patterns. The second, “Random100-Max”, is the maximum value in 100 random selections. The third, “ThroughputMax”, is a control method that selects the relay node with the highest throughput at the timing of the relay node selection. The fourth, “ThroughputRiseMax”, is a control method to select the relay node with the highest throughput slope at the timing of selecting the transmission partner. “Proposed” is the method described in the Sec. 4.

The simulation results are shown in Fig. 2. From this figure, it can be seen that the proposed method has a larger number of information transmissions than the other control methods. The average number

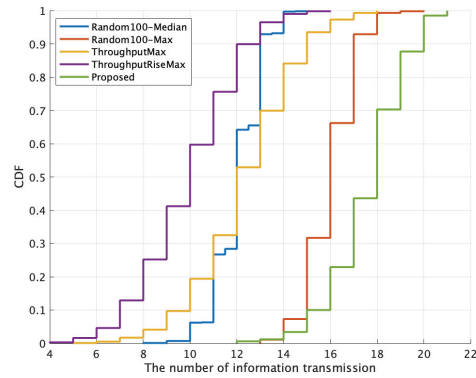


Fig. 2 Simulation Result.

of information transmissions was 11.58 for Random100-Median, 15.52 for Random100-Max, 12.30 for ThroughputMax, 9.861 for ThroughputRiseMax, and 17.43 for Proposed. This confirms the effectiveness of the proposed method in terms of the average number of information transmissions.

6. Conclusion

This study focuses on the transmission of information from a source node to relay nodes when an information transmission system is constructed using DTN technology in the event of a disaster. The number of successful information transmissions varies depending on which relay node the information is sent to, and to solve this problem, we proposed a relay node selection method using RSSI. Computer simulations have confirmed the effectiveness of the proposed method, and the results demonstrate the efficiency of information transmissions at a source node of the DTN.

This work was supported in part by the Japan Society for the Promotion of Science KAKENHI under Grant No. JP20K11785.

References

- [1]. M. U. Sheikh, B. Badihi, K. Ruttik, and R. Jäntti. “Adaptive Physical Layer Selection for Bluetooth 5: Measurements and Simulations,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, Article ID 8842919, Jan. 2021, 10 pages.

修士学位論文要約（令和6年3月）

シリコン光集積回路を用いた量子計算に関する研究

小田川 朋史

指導教員：山田 博仁， 研究指導教員：松田 信幸

Study of Quantum Computing Using a Silicon Integrated Optical Circuit Tomofumi ODAGAWA

Supervisor: Hirohito YAMADA, Research Advisor: Nobuyuki MATSUDA

Recently, the optical quantum computation method called Gaussian Boson Sampling (GBS) has been attracting attention for its use in demonstrating quantum supremacy and is expected to be applied to drug discovery and quantum chemistry computation. A GBS circuit fabricated with an optical waveguide is superior to a free-space type GBS circuit in its full reconfigurability. Especially, a silicon optical waveguide is well suited for fabricating an optical circuit and composing a quantum light source, which is a critical component for GBS. In this study, we established a high-precision optical circuit control method for a large-scale silicon photonics circuit. We then designed and fabricated a programmable GBS circuit using a silicon optical waveguide, and successfully demonstrated GBS using the circuit with high fidelity and high computational capability.

1. はじめに

近年、ガウシアンボソンサンプリング (GBS) と呼ばれる方式の光量子計算が量子超越性の実証¹⁾等に用いられ注目を集めているとともに、創薬や量子化学計算への応用が期待されている。GBSを行うためには、多チャンネルの2モード真空スクイーズド (TMSV) 光源²⁾、多入力多出力のユニタリ変換光回路および光子数識別検出器が必要となる。光導波路を用いた GBS 回路では自由空間型回路に比べてプログラマブルな回路を構成できる点から優れている。特に、シリコン光導波路は成熟した CMOS 互換プロセスを用いて回路を作製できる点や方向性結合器や位相シフタを始めとした光回路の構成要素の設計ルールが確立されている点から光回路の作製に適した光導波路である。また、3次の非線形光学定数の高いシリコン光導波路中の3次非線形光学効果(四光波混合)を用いることで真空スクイーズド光を高効率に発生できる点から GBS の光源としても優れている。そこで本研究では、シリコン光導波路を用いてプログラマブル GBS 回路を設計、試作し、これを用いた GBS 実証を目的とした研究を行った。

2. シリコン光集積回路の制御システムの構築と高精度化

量子計算用シリコン光集積回路の制御において、光回路内に設置された多数の熱光学位相シフタを高精度に駆動する必要がある。本研究では Qontrol 社(英)製 96 チャンネル定電流源を導入し、Python を用いて電源制御プログラムを作成した。その後、いくつかのラ

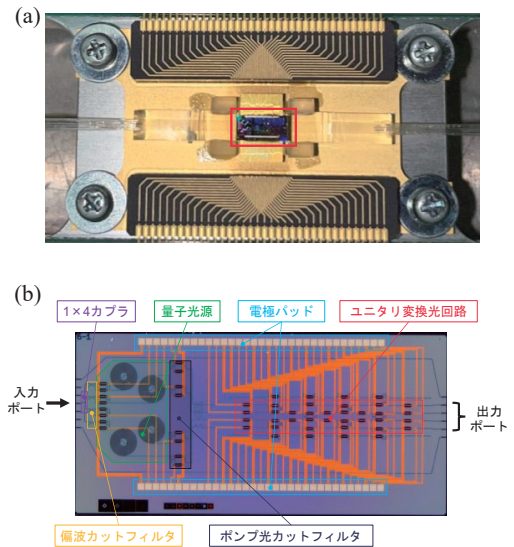


図1 作製した GBS 回路チップ。(a)チップの実装図。赤枠内がチップで、入出力部にファイバーアレイが実装されている。(b)チップの光学顕微鏡写真と詳細。

ンダムなユニタリ行列を標的行列として図1に示す GBS 回路のユニタリ変換光回路部に実装した。実装された行列を実験的に測定し、忠実度 (Fidelity) という評価指標³⁾を用いて実装行列と標的行列の比較を行った。比較の結果、図2に示すように95%程度の忠実度が得られた一方、標的行列間で Fidelity 値のばらつき

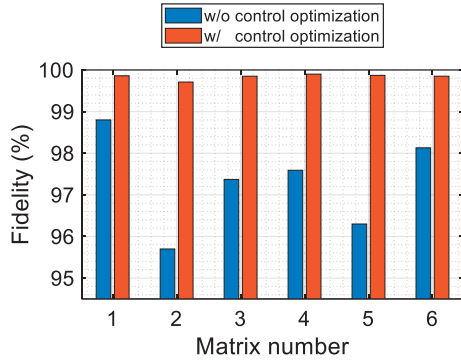


図2 回路制御最適化による実行行列の忠実度の向上。

が生じることが分かった。ばらつきの改善のため、校正曲線取得用光源や電流値の設定誤差、行列測定手法の改善、光回路の温調等に対する検討を行った。特に、校正曲線取得用光源としてパルスレーザーを用いることで光源の可干渉性を低減させ、CW レーザーを用いたときと比べて光回路内外の反射光が行列測定に及ぼす影響を低減した。また、電源自身の発熱により生じる電流値の誤差が生じることを見出すとともに、電流値のフィードバック制御によりこれを補正することにより電流値誤差を最大概ね 500 μA から 1 μA まで低減できた。制御手法の改善後に再度実装行列と標的行列の比較を行ったところ、忠実度を 99.7%以上まで大幅に向上できたと共に、標的行列ごとの忠実度のばらつきも抑制できた。

3. シリコン光集積回路を用いた GBS の実証

構築した回路制御システムを用いてシリコン光導波路を用いたプログラマブル GBS 回路の実証実験を行った。中心波長 1548.9 nm のポンプ光パルスプログラマブル 4×4 GBS 回路に入射し、4 つの量子光源部で四光波混合によりスキューミングパラメータ約 0.9 の TMSV 光を発生させる。それらをユニタリ変換光回路で量子干渉させた後、光子数識別検出器を用いて GBS 回路の光子群の出力パターンを測定した。その結果を図 3 に示す。得られた出力パターンを、対応するスキューミングパラメータ、ユニタリ行列、そして実験系全体の光子検出効率を用いて計算した理論的な出力パターンと比較したところ、良い一致が見られた。また、実験分布と理論分布の一致度を総変動距離 D を用いて計算したところ、 $D = 0.092$ であった。この値は TMSV 光同士が識別可能である (量子干渉が生じない) モデルで得られた分布との距離 $D = 0.379$ より小さく、ユニタリ変換光回路内で 4 つのスキューズド真空場からなる光子群が正しく量子干渉していることを示す。すなわち、プログラマブル GBS 回路は動作実証に成功した。続いて、プログラ

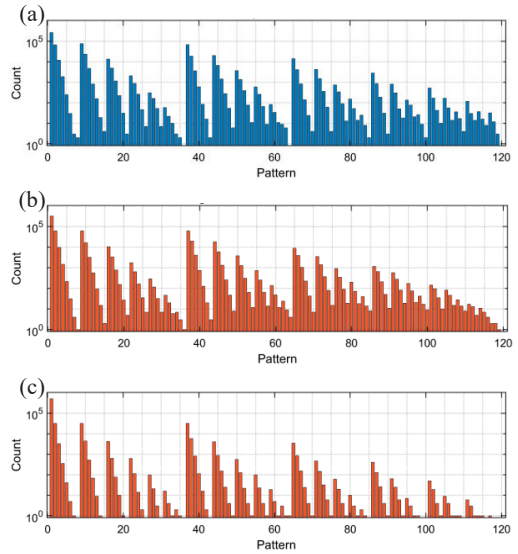


図3 GBS 回路の出力光子群パターン。(a)実験で得られた光子群パターン。(b)実験パラメータを用いた理論計算に基づく光子群パターン。(c) Distinguishable な光子群パターン。

マブル 4×4 GBS 回路に高強度のポンプ光を入力し、4 台の検出器における総検出光子数の分布を観測した。結果、最大同時検出光子数 19 のイベントの観測に成功した。この値は先行研究における報告値⁴⁾と同等であり、我々は演算性能の高い GBS 量子計算機の作製に成功した。

4. まとめ

本研究ではプログラマブル光回路の正確な制御手法を確立し、それを用いたシリコン光導波路型プログラマブル GBS の実証実験を行った。結果として、理論分布と良く一致するような出力光子群パターンが得られ、プログラマブル GBS 回路の動作実証に成功した。また、極めて高い最大同時検出光子数のイベントが観測できたことから、演算性能の高い GBS 量子計算機の作製に成功したことが確認できた。今後の課題として、構築したプログラマブル GBS 回路を、量子化学計算やグラフ理論計算等の実問題へ適用することが挙げられる。同時に、さらなる演算性能向上に向け、シリコン光導波路の非線形吸収の緩和をはじめとする光回路損失の低減が重要となる。

文献

- 1) H.-S. Zhong *et al.*, Science **370**, 1460 (2020).
- 2) J. E. Sharping *et al.*, Opt. Express **14**, 12388 (2006).
- 3) W. R. Clements *et al.*, Optica **3**, 1460-1465 (2016).
- 4) J. M. Arrazola *et al.*, Nature **591**, 54 (2021).

修士学位論文要約（令和6年3月）

再エネ駆動分散型マイクロデータセンタに関する研究

加藤 泰成

指導教員：山田 博仁

A Study on Renewable Energy Driven Distributed Data Centers

Taisei KATO

Supervisor: Hirohito YAMADA

As the generation and consumption of big data has skyrocketed in recent years, the power consumption of data centers (DCs) has also been increasing rapidly. To solve this problem, we propose the development of renewable energy driven mobile edge computing DC. In edge computing, information processing is performed in a DC close to the user, thereby reducing the latency required for communication and DCs are distributed to several areas rather than performed in a single location, which makes it more resistant to disasters. Because of their ease of installation and relocation, the operation as small-scale microDC is expected for edge computing. Since there are few precedents for setting up outdoor DCs in edge computing, this study investigated the stable operation of an outdoor microDCs that only use renewable energy for operation.

1. はじめに

近年、世界中でビッグデータの生成と消費が急増しており、通信トラフィック量も増加の一途をたどっている。これらに伴ってデータセンター(DC)の役割も益々重要になるが消費電力の増加も問題となる。ある予測では、2030年にはDCが消費する総電力は、国内の総消費電力の10%を占めるとまで言われており、国のエネルギー政策においても重要な課題である。従って、DCの駆動電力をグリーン化する対策が世界中で見られ、大手IT企業は2030年までにDCの完全再エネ稼働の実現を掲げている。またBeyond5Gの転換として集中型DCから分散型DCへの移行も検討されている。これは利用者に近いDCで情報処理を行うことで、情報処理に発生する遅延や通信ネットワークの負荷を軽減するエッジコンピューティングにという手法が用いられる。またエッジコンピューティングにおいて情報処理を分散させることで災害に対するレジリエント性や、導入や移転のしやすさから小規模でのDCとして分散型マイクロDCの運用が期待される。エッジコンピューティングにおいて、屋外にDCを設置するという前例も実証例も少ないため、本研究では工学部電気系キャンパス内に設置されたコンテナ型屋外マイクロDCを再生可能エネルギーのみで安定稼働させる研究を行った。

2. マイクロDCの消費電力

マイクロDCの消費電力は冷却装置とサーバー機器が主な内訳となる。屋外に設置することからDC内の温度は外気温に影響され、夏季においては冷却装置の稼働時間が増加することで消費電力も増加する。サー

バーの消費電力は、情報処理負荷に依らず一定の電力を消費する固定分と、CPUなどが情報処理負荷に応じて増減する変動分から構成される。サーバーの安定稼働に必要とされるのは負荷の低減による発熱と消費電力の抑制にある[1]。本研究では負荷の制御をDockerとKubernetesを用いてジョブスケジューリング(JS)によって行った。負荷をPodという単位で制御することで複数のサーバー機器に処理を分散し一つのサーバーの消費電力を低下させDCネットワーク内全体の消費電力を軽減することを目的とした。

JSによる実験によりCPU使用率と消費電力の関係を求めた。CPU内に存在するコアへの負荷のかけ方によって処理能力と消費電力に差が発生することが分かった。一例として図1に示すようにコアが4つ内蔵されているCPUにおいて4つのコアに均等に負荷を与えた場合、使用率がある閾値を超えると急激に消費電力が上昇した。対して図2のようにコアを順番に使用することで負荷を与え場合には消費電力はほぼ線形的な関係を示した。

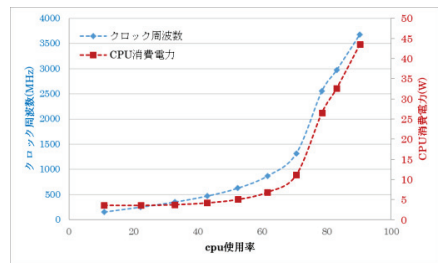


図1:コア分散時のCPU使用率と消費電力の関係

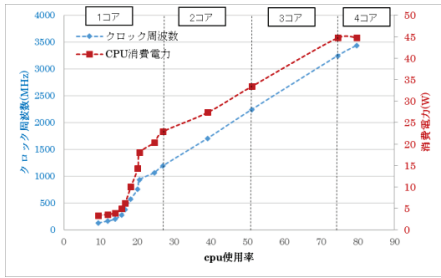


図 2:コア占有時の CPU 使用率と消費電力の関係

つまり CPU コア稼働による消費電力の上昇がサーバーの固定消費電力を下回る CPU 使用率になるように処理を複数のサーバーに分散させれば、ネットワーク全体の総消費電力を抑えられることが分かった。

3. マイクロ DC の屋外設置における実証実験

本実験で利用したサーバー機器の動作時の環境条件温度が 10~35℃ であるため、コンテナ内の温度を 30℃ に抑えるようにクーラー動作温度を設定した。季節別で負荷処理を集中させたときと分散させたときの実験結果を図 3 に示す。夏季においては最大内部温度が 35℃ を上回る時間帯が発生し、クーラーがフル稼働することで、夏季と秋季の間には最大 3.4 kWh ほど消費電力に差が発生した。また CPU 負荷が 80% となる処理を一つのサーバーに与えた場合と 2 つのサーバーに分散させた場合の消費電力には最大 1.5 kWh の差が生じた。これは図 1 で示したように閾値となる CPU 使用率を下回るように負荷を分散した結果、急激な消費電力の増加が発生せずサーバー台数を増加させた方が消費電力の低下につながる事が確認できた。

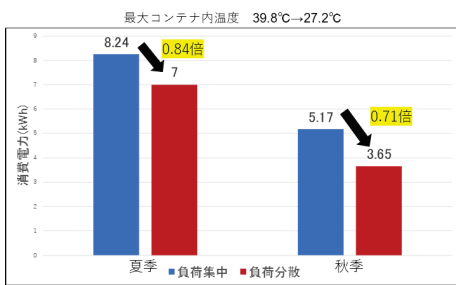


図 3: 夏季と秋季のマイクロ DC の消費電力の違い

4. マイクロ DC の無線化による可搬性の向上

小規模であるマイクロ DC の優位性は導入と移転のし易さにあるがネットワークを有線接続する場合設置場所の自由度は低い。そのため移動通信システムであるローカル 5G をマイクロ DC に導入することで可搬性の向上を目指した。電波強度、遅延時間、通信速度の観点から測定を行った結果を図 4、5 に示す。

ローカル 5G は遮蔽物による影響が大きく、アンテナからの見通しが良い場所と比べて建物など電波を妨害するものと受信電波強度は約 20 dB ほど低下した。そして遅延と通信速度は電波強度と相関を持つことから、アンテナからの距離と見通しがマイクロ DC の無線通信において重要なパラメータとなることが分かった。しかしこれらを満たせば自由に設置場所を決められるためマイクロ DC の無線化は有効であると考察した。

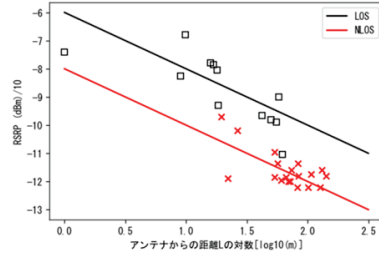


図 4:遮蔽物による電波強度への影響

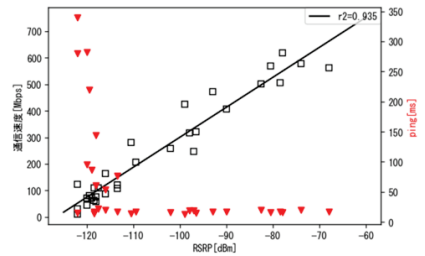


図 5:電波強度に対する通信速度と遅延の関係

5. まとめ

世界的に電子データの生成と消費が加速する現代において、データセンターの役割はより重要なものとなりつつある。データセンターの電力消費も増加傾向にあり、特に大手 IT 企業が保有する大規模データセンターよりも中小規模のデータセンターにおける電力効率(PUE 値)が悪い[2]ため、改善策が必要とされている。そこで本研究では、再エネによって駆動する小規模分散型マイクロ DC の安定稼働の手法として、ジョブスケジューリングを採用した。過去のシミュレーション結果に基づいて、屋外に設置したマイクロ DC にも応用が可能かを実証実験により検証した。

文献

- 1) 加藤 大裕, 「再エネ駆動データセンターのジョブスケジューリングに関する研究」 東北大学大学院工学研究科、修士論文 (2022)
- 2) Vasques, T. L., (2017), “Energy efficiency insight into small and medium data centers: A comparative analysis based on a survey”, ECEE E, 7-086-17, 2019

修士学位論文要約（令和6年3月）

遅延耐性ネットワークにおける移動特性を考慮した クラスタリングに基づく中継端末選択に関する研究

鎌田 峻暉

指導教員：西山 大樹

A Study on Relay Node Selection Based on Clustering
Considering Mobility Characteristics in Delay/Disruption-Tolerant Networks

Ryoki KAMADA

Supervisor: Hiroki NISHIYAMA

A Delay/Disruption-Tolerant Network (DTN) is a technology that enables information transfer independent of communication infrastructures and has been focused on for the realization of non-infrastructure information diffusion systems in smart cities. However, when relay nodes are selected without considering the mobility characteristics of them, the information diffusion is biased, and the number of diffusions is reduced. To solve this problem, it is necessary to identify the mobility characteristics of nodes and to select relay nodes by considering their mobility characteristics. Therefore, we propose a relay node selection algorithm and verify its effectiveness by computer simulations.

1. Introduction

Recently, some of the smart cities that are expected to be realized include the concept of regional information diffusion that does not depend on cellular communications, and the Delay/Disruption-Tolerant Network (DTN) exists as a technology to realize such diffusion.

SONAERING [1], the system that aims to realize information distribution with DTN, emphasizes the importance of information reaching more residents. Therefore, this study focuses on the improvement of information diffusion performance in such system. We propose a relay node selection method to improve the number of information diffusion. Since the number of information diffusion depends on the travel path of the selected relay nodes, we propose a method that considers the travel characteristics of the relay nodes.

2. System Model and Issue

As shown in Fig. 1, we assume that information is spread via relay nodes to destination nodes that are uniformly and fixedly distributed in the area. The information diffusion is performed by a store-and-forward transfer method using device-to-device communication. The relay nodes move from the center point of the area to other points in the area by the shortest paths.

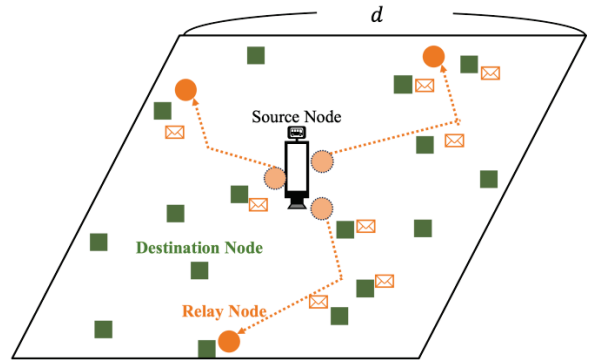


Fig. 1 System model.

In this system, the information diffusion performance can be degraded due to two reasons. The first one is the overlapping of travel routes. When relay nodes with overlapping travel routes are selected, multiple relay nodes will spread the same information to the same destination nodes. Therefore, the diffusion area is biased, and the number of diffusions decreases. Second is the length of the travel route. If a node with a short travel route is selected, it will encounter fewer destination nodes than the case that a node with a long distance to travel is selected, resulting in a decrease in the number of receivers.

Therefore, it is important to clarify the mobility characteristics of relay nodes and develop a relay node selection method based on their characteristics. By considering mobility characteristics, a selection method should be proposed to avoid selecting nodes with overlapping mobilities or nodes with short travel routes.

3. Proposed Method

The proposed relay node selection method consists of three steps.

First, the mobility characteristics are expressed based on the communication histories of the relay nodes. Here, the communication history means the list of included Wi-Fi Service Set Identifiers (SSIDs) that the relay node has detected during its past movements.

Next, relay nodes are classified according to the similarity of their mobility characteristics. The classification is performed by k-means clustering on their communication histories.

Finally, relay nodes with high mobility are selected. The mobility is estimated from the number of SSIDs detected in the detection history of each node, and the higher the number of detections, the higher the mobility. Then, the node with the highest mobility is selected from each cluster.

Thus, we realize relay node selection that resolves the issues of overlapping routes and travel distance.

4. Simulation

We performed computer simulations to evaluate the performance of the proposed method. In addition, to realize relay node mobility closer to reality, this study used travel routes based on the real map.

Four different methods are used for performance comparison. Random is a method that randomly selects relay nodes. Only-clustering is a method that performs clustering to avoid duplications of nodes' paths. Only-length is a method that selects nodes with long distance movement. Proposed is a combination of Only-clustering and Only-length.

Fig. 2 shows the results of the simulations. The results confirm the effectiveness of the clustering method and the method of selecting nodes with large mobility. Table 1 show that the clustering-based method contributes to the improvement of the minimum value, while the distance-aware method contributes to the improvement in the median value. These results show that the proposed method, which combines clustering and length methods, has the best performance.

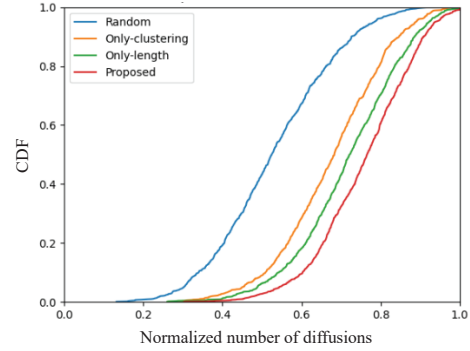


Fig. 2 Comparison by the number of diffusions.

Table 1 Comparison in typical values.

Method	Min	Median	Max
Random	0.132	0.525	0.941
Only-clustering	0.279	0.683	1.00
Only-length	0.261	0.722	1.00
Proposed	0.303	0.765	1.00

5. Conclusion

In this study, we proposed a relay node selection method for information diffusion systems based on DTNs. The relay node selection method is divided into two parts: one part performs relay node classification based on mobility characteristics by clustering, and the other part is for selecting long-distance nodes by estimating their mobilities. The results show that the proposed method contributes to improve the number of information diffusion in the system.

This work was supported in part by the Japan Society for the Promotion of Science KAKENHI under Grant No. JP20K11785.

References

- 1) +SONAE Project, SONAE RING, <https://plus-sonae.com/en/sonae-ring/> (view:2023-10-24)
- 2) M. Cunche, Mohamed Ali Kaafar, and R. Boreli, "I know who you will meet this evening! Linking wireless devices using Wi-Fi probe requests," 2012 IEEE Int. Symp. World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), San Francisco, CA, USA, Jun. 2012, 9 pages.

修士学位論文要約（令和6年3月）

ストリーム暗号ハードウェアの安全性評価に関する研究

小林 蒼一郎

指導教員:本間 尚文, 研究指導教員:上野 嶺

Security Evaluation of Stream Cipher Hardware

Soichiro KOBAYASHI

Supervisor: Naofumi HOMMA, Research Advisor: Rei UENO

This paper presents a side-channel attack on unrolled implementations of stream ciphers, with a focus on Trivium. Most previous SCAs on Trivium use the side-channel leakage of some first rounds in the initialization phase before the key and IV are sufficiently diffused. However, an unrolled hardware implementation, which achieves high throughput of key stream generation and energy efficiency, does not store the intermediate values of these rounds in the internal state register. This fact implies that the applicability of these SCAs to the unrolled implementation is unclear, as the side-channel leakage of some first rounds is hardly obtained. The proposed method estimates the intermediate values of latter rounds by correlation power analysis (CPA) using a well-calibrated chosen-IV set and realizes the full key recovery through linearization. The experimental results show the feasibility of full key recovery on the 288-round unrolled implementation, which was recognized as the most energy-efficient. Furthermore, this paper discusses the SCA resistance of unrolled implementations in case of larger unrolling degrees exceeding 288.

1. はじめに

情報の秘匿性を担保するために、現代社会ではあらゆる情報通信において共通鍵暗号による暗号化が行われる。その1つであるストリーム暗号は、鍵ストリームと呼ばれる擬似乱数系列を内部状態レジスタから出力し、平文と排他的論理和 (XOR) をとることで暗号化を行う。小規模なラウンド関数や高スループットな鍵ストリーム生成などの特徴から、回路を実装するためのリソースに制約がある場合や、大量のデータを高速に暗号化する場合に適している。

代表的なハードウェア向けストリーム暗号の1つであり、ISO/IEC 29192-3 で標準化されている Trivium¹⁾ は、Initialization と Key stream generation から構成されている。Initialization では、ともに 80 ビットである秘密鍵と IV を用いて 288 ビットの内部状態を攪拌する。攪拌は 1152 ラウンド行われ、その後の Key stream generation では攪拌を続けながら鍵ストリームを出力する。なお、内部状態は 3 本の NLFSR (NLFSR-1, NLFSR-2, NLFSR-3) で構成される。

攪拌時のビットシフトおよび鍵ストリームの生成は、1 ラウンドにつき 1 ビットずつ行われる。基本的なストリーム暗号ハードウェアであるラウンドベース実装が、1 クロックサイクルにつき 1 ラウンド実行するのに対し、アンロールド実装では、アンロールラウンド数 r に対し、1 クロックサイクルにつき r ラウンド分の演算を実行する。これにより、Initialization の遅延が $1152/r$ まで削減され、鍵ストリーム生成のスループットが r 倍向上する。先行

研究²⁾においては、 $r = 288$ がエネルギー効率の観点で最適とされ、アンロールド実装はストリーム暗号ハードウェアにおける、より実用的な実装方法である。

暗号ハードウェアの実用性を検討する上で、暗号演算時に発生する副次的な物理情報 (サイドチャネル情報) を統計解析し、秘密情報を取得するサイドチャネル攻撃 (SCA: Side-Channel Attack) に対する耐性評価が重要となる。これまで多数の Trivium に対する SCA 手法が提案されているが、これらはアンロールド実装を考慮しておらず、適用可能か否かも示されていない。

本研究では、Trivium に対する従来 SCA を拡張することで、288 ラウンドアンロールド実装の鍵回復が可能であることを示す。また、SCA 耐性を有するアンロールラウンド数についても考察する。

2. Trivium に対する従来 SCA

ここでは、消費電力波形が解析対象となる相関電力解析 (CPA: Correlation Power Analysis) に焦点を当て、Trivium に対する従来手法を説明する。攻撃対象となるのは、Initialization における NLFSR-2 の更新に用いる第 i ラウンドの中間値 t_1^i である。特に攪拌が進んでいない $i = 1, 2, \dots, 80$ について、秘密鍵 k と IV v のビットを変数とする多項式関数 $f^i(k)$ と $g^i(v)$ を用いて、 $t_1^i = f^i(k) + g^i(v)$ と表すことができる。なお、Trivium のラウンド関数は \mathbb{F}_2 上の演算を行うため、 $+$ は XOR を表す。この中間値がレジスタに格納される際の消費電力波形を用いて CPA を行い、鍵の多項式の固定値 σ^i を推定することで、攻撃者は鍵ビットの方程

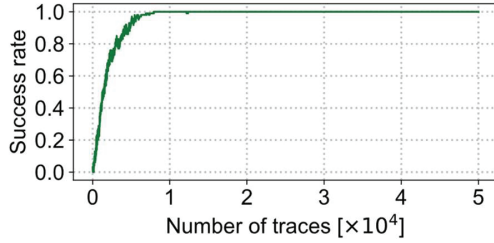


図1: 8ビットの $(\sigma^{257,0}, \sigma^{258,0}, \dots, \sigma^{264,0})$ を同時に推定するCPAの攻撃成功確率

式 $\sigma^i = f^i(k)$ を取得できる。そして、80ラウンド分の低次方程式から成る連立方程式を解くことで、Triviumハードウェアの鍵回復が可能となる。

しかし、これはランダムベース実装への攻撃を想定した手法である。また、 $r = 288$ といった多くのラウンドをアンロールする場合、内部状態には攪拌が進んだ後段ラウンドの中間値のみが格納されるため、従来手法の適用は困難になる。

3. 後段ラウンドの中間値に対するCPA

後段ラウンドの中間値は、 $f^i(k)$ および $g^i(v)$ に加え、 k と v のビットが混ざった非線形項の和である多項式関数 $h^i(k, v)$ を用いて、 $t_1^i = f^i + g^i + h^i$ と表される。非線形項としては、 $(k_m + g_n^{i,1}(v))(k_{m'} + g_n^{i,2}(v))$ のような項が多数現れるが、IVの値によって鍵ビットを含む多項式 $f^i + h^i$ が変化するため、ランダムIVセットを用いてCPAを行うことは困難になる。そこで、全ての非線形項中のIVビットから成る多項式の値を、0もしくは1の値で固定する選択IVセット \mathcal{V}^i を用いたCPAを提案する。この場合、 $t_1^i|_{\mathcal{V}^i} = f^i + g^i|_{\mathcal{V}^i} + h^i|_{\mathcal{V}^i} = \sigma^i + g^i|_{\mathcal{V}^i}$ のように、新たに鍵ビットの多項式の固定値 σ^i を定義できる。このように、攻撃者は適切な選択IVセット \mathcal{V}^i を用いることで、鍵ビットの多項式の固定値 $\sigma^i = f^i + h^i|_{\mathcal{V}^i}$ をCPAで推定可能となる。

4. 線形化に基づく効率的な鍵回復

後段ラウンドの σ^i を推定することで、鍵ビットに関する方程式 $\sigma^i = f^i + h^i|_{\mathcal{V}^i}$ が得られる。しかし、攪拌が進むことで高次方程式となっているため、これらの式を多数取得できた場合でも、鍵回復は困難になる。そこで、より効率的な鍵回復手法を提案する。 h^i 中の非線形項のうち、 $(k_m + g_n^{i,1})(k_{m'} + g_n^{i,2})$ の形の項について、 $g_n^{i,1} = g_n^{i,2} = 0$ および $g_n^{i,1} = g_n^{i,2} = 1$ と固定するような選択IVセットを $\mathcal{V}^{i,0}$ および $\mathcal{V}^{i,1}$ とする。なお、その他の非線形項内のIVビットの多項式は、2つのIVセットで同じ値に固定される。これらを用いたCPAで得られる $\sigma^{i,0} = f^i + h^i|_{\mathcal{V}^{i,0}}$ および $\sigma^{i,1} = f^i + h^i|_{\mathcal{V}^{i,1}}$ の式について、2つの式を加算して線形化を行った場合、共通項が打ち消され、 $\sigma^{i,0} + \sigma^{i,1} = k_m + k_{m'} + 1$ という1次方程式に変換することができる。このように、

表1: アンロールド Trivium ハードウェアの性能評価 (クロック周波数は 100 MHz)

r	Area [GE]	Power [mW]	Energy [fJ/bit]	SCA security [# traces]
288	11,358	2.58	89.58	360,000
576	19,391	7.49	130.03	N/A

異なる2つの選択IVセットを用いてCPAおよび線形化を行うことで、鍵ビットの1次方程式が得られる。そして、多数の鍵ビットの1次方程式を取得することで、攻撃者は容易に鍵回復を実現できる。

5. 提案手法の評価実験

FPGA上に実装した288ラウンドアンロールド実装を用いた実験結果について、算出した攻撃成功確率を図1に示す。なお、Initializationにおける後段ラウンド $i = 257, 258, \dots, 264$ を攻撃対象にし、8ラウンド分の $\sigma^{i,0}$ を同時に推定した結果である。図1より、約2万波形攻撃に使用することで、攻撃成功確率が1に収束している。 $\sigma^{i,1}$ の推定においても同様の結果が得られたため、後段ラウンドの σ^i の推定および線形化による鍵回復が可能と言える。このように、288ラウンドアンロールド実装に対する提案手法の有効性を確認できた。

さらに、提案手法に対する耐性を有するアンロールラウンド数について、表1のハードウェア性能評価結果とともに考察する。ここでは、 $r = 288$ よりも大きいアンロールラウンド数として、Initializationのクロックサイクル数が半減する $r = 576$ を検討する。ハードウェア性能について、回路面積と消費電力/エネルギーは $r = 288$ より増加している。しかし、鍵回復に必要な波形数では、 $r = 288$ が36万波形である一方、 $r = 576$ はより攪拌が進んでいるため選択IVセットが確保できず、提案手法の適用は困難となる。したがって、288ラウンドアンロールド実装と比べ、576ラウンドアンロールド実装は提案手法に対する高い耐性を有する。

6. まとめ

Triviumハードウェアのアンロールド実装に対する、SCAおよび鍵回復手法を提案した。エネルギー効率の観点で最適な288ラウンドアンロールド実装に対し、提案手法による鍵回復が可能であることを実験的に示した。また、576ラウンドアンロールド実装は提案手法に対して高い耐性を有する実装であることも確認できた。

文献

- 1) Christophe De Canniere and Bart Preneel, "Trivium," New Stream Cipher Designs: The eSTREAM Finalists, pp. 244–266, 2008.
- 2) Andrea Caforio *et al.*, "Perfect trees: Designing energy-optimal symmetric encryption primitives," IACR Transactions on Symmetric Cryptology, No. 4, pp. 36–73, 2021.

修士学位論文要約（令和 6 年 3 月）

28 GHz 帯光・無線融合フルコヒーレント伝送に関する研究

白幡 晃一

指導教員：廣岡 俊彦

Study on Optical and Wireless Linked Fully Coherent Transmission at 28 GHz Band

Koichi SHIRAHATA

Supervisor: Toshihiko HIROOKA

An economical optical mobile fronthaul (O-MFH) that can efficiently deliver large-capacity data signals to multiple antennas with low latency is essential in a radio access network beyond 5G. For such an O-MFH, we have proposed an optical and wireless linked fully coherent transmission system using an injection-locked heterodyne detection (IL-HD) method. This method made it possible to realize an optical-to-wireless frequency conversion with a high S/N. By using the IL-HD, we successfully increased the loss budget of the transmission system by 9 dB compared with that obtained with the conventional self-heterodyne method. Furthermore, we applied the fully coherent transmission to O-MFH at the 28 GHz band and successfully transmitted a 16 Gbit/s, 256 QAM signal over a 10 km single-mode fiber and 20 m wirelessly using practical compact microstrip antennas.

1. はじめに

近年、Beyond 5G、6G といった次世代大容量 RAN(Radio Access Network)の研究開発が精力的に進められている^[1]。このような RAN を実現するためには、大容量のデータ信号を複数のアンテナへ効率よく配信できるロスバジェットの大きい光モバイルフロントホール(Optical Mobile Fronthaul: O-MFH)が不可欠となる。これまで我々はそのような O-MFH として、注入同期ヘテロダイン(Injection-locking heterodyne: IL-HD)方式を用いた光・無線融合フルコヒーレント伝送方式を提案してきている^[2,3]。本研究では、O-MFH における IL-HD 方式と従来の Self-heterodyne (SHD)方式の性能比較を行い、IL-HD 方式が 9 dB 高いロスバジェットを有していることを明らかにした。また、本方式を 5G で運用が開始されている 28 GHz 帯へ適用し、小型で実用的なマイクロストリップアンテナ^[4]を用いて 16 Gbit/s、256 QAM 信号の Single Mode Fiber (SMF)10 km、無線 20 m フルコヒーレント伝送に成功した。

2. 光モバイルフロントホール用 IF 28 GHz フルコヒーレント伝送システム

図 1 に伝送系を示す。集約基地局側では 2 Gbaud、256 QAM 信号(16 Gbit/s)及び光キャリアから 28 GHz 低周波数側へシフトした Pilot Tone(PT)信号を生成している。両信号を合波し、-3 dBm のパワーで Single Mode Fiber (SMF)を 10 km 伝送する。このと

き、データ信号と PT 信号のパワーは IL-HD 方式では -3 dBm と -16 dBm に最適化している。一方 SHD 方式では、両信号とも -6 dBm が最適値であった。

アンテナサイトでは(a)IL-HD 方式もしくは(b)SHD 方式を用いて光領域から Intermediate Frequency (IF)帯にキャリア周波数変換を行う。(a)では PT を局発 LD へ注入同期することにより、データ信号に位同期した高出力且つ Optical Signal-to-Noise Ratio (OSNR)の高い LO 信号を得る。本 LO 信号とデータ信号をヘテロダイン検波することにより、28 GHz-IF 信号を得ている。一方(b)では、データと PT 信号をそのまま PIN-PD へ入力し、ヘテロダイン検波を行う。(a)または(b)方式によって得られた IF 信号は、利得 19.5 dBi の小型マイクロストリップアンテナを介してユーザ側へ無線伝送される。図 2 にマイクロストリップアンテナの外観写真を示す。本アンテナは 10 個の素子から成るサブアレイ 8 列で構成され、全てのサブアレイは同相で給電されている。

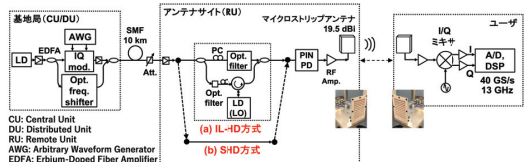
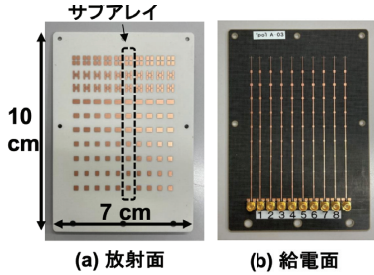


図 1 フルコヒーレント伝送系(a) IL-HD 方式、(b) SHD 方式

ユーザ側では受信した IF 信号を IQ ミキサを介してベースバンド信号へ変換し、DSP を用いてオフラインで復調する。



3. IL-HD 及び SHD 方式のロスバジェットと比較

無線の back-to-back の条件において、IL-HD、SHD 両方式のロスバジェットの比較を行った。SMF 10 km の後段に可変光減衰器(Att.)を挿入して伝送路中に付加損失(L_{add})を与え、 L_{add} の値を変化させて 256 QAM 信号の復調特性を評価した。図 3 は L_{add} に対する 256 QAM 信号の Bit Error Rate(BER)特性である。IL-HD 方式のほうが、SHD と比較して 9 dB 高いロスバジェットを有していることがわかる。IL-HD 方式のほうが SHD 方式と比較して 9 dB ロスバジェット (L_{add}) が大きいことが判る。SHD 方式では L_{add} の増大に伴い QAM と PT 信号の OSNR が同時に劣化する。一方 IL-HD 方式では、OSNR の十分大きな LO 信号を常に用いることができる。さらには光フィルタによって ASE 雑音を除去するため、S/N が 6 dB 高い IF 信号を生成することが可能となる。また、最適化された QAM 信号の送信パワーは、IL-HD 方式のほうが SHD 方式より 3 dB 大きい。そのため、IL-HD 方式のロスバジェットは SHD 方式と比較して 9 dB 大きくなる。

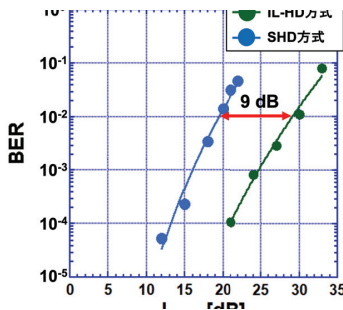
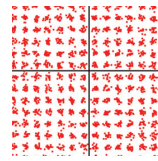
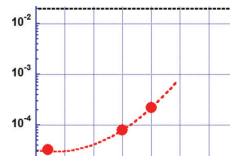


図3 付加損失 L_{add} に対する 256 QAM 信号の BER 特性

4. IL-HD 方式を用いたフルコヒーレント伝送

IL-HD 方式を用い、IF 28 GHz 帯における 16 Gbit/s、256 QAM 信号の光・無線融合フルコヒーレント伝送実験を行った。図 4 に無線伝送距離に対する 16 Gbit/s、256QAM 信号の BER 特性を示す。20 m 伝送後では、オーバーヘッド 20 % の Forward Error Correction(FEC)の閾値である 2.0×10^{-2} 以下の BER が得られており、FEC の適用により、エラーフリー伝送を実現できる。図 5 は無線 20 m 伝送後の 256 QAM 信号のコンスタレーションである。EVM は 2.23 % であった。



4 無線伝送距離に対する 256 QAM 信号の BER 特性

5 SMF10 km、無線 20 m 伝送後の 256 QAM 信号のコンスタレーション

5. まとめ

28 GHz 帯フルコヒーレント伝送における IL-HD 方式と SHD 方式の性能比較実験を行い、IL-HD 方式が 9 dB 高いロスバジェットを有していることを明らかにした。また、19.5 dBi 小型マイクロストリップアンテナを用い、16 Gbit/s、256 QAM 信号の SMF10 km、無線 20 m フルコヒーレント伝送に成功した。

以上より、Beyond 5G における超高速信号の長距離無線伝送および多数アンテナへの配信において IL-H 型 フルコヒーレント伝送方式が有用であることを明らかにした。

文献

- 1) NTT ドコモ, ホワイトペーパー”5G の高度化と 6G(5.0 版),” (2022).
- 2) 中沢, Microwave Photonics Symposium, (2014).
- 3) K. Kasai et al., ECOC2020, Th1G-7, (2020).
- 4) 東 他, 信学技報, AP2022-73, (2022).

修士学位論文要約（令和6年3月）

グラフェンチャネルトランジスタのデバイスプロセス高度化と その高感度テラヘルツ波検出への応用に関する研究

関 宏信

指導教員：尾辻 泰一， 研究指導教員：尾辻 泰一

Study on advanced device/process technology for graphene-channel transistors and their applications to highly sensitive terahertz detection

Hironobu SEKI

Supervisor: Taiichi OTSUJI, Research Advisor: Taiichi OTSUJI

The author studied the advanced device/process technology for graphene-channel transistors (GFET) and their applications to highly sensitive terahertz detection. He proposed and demonstrated a new method to improve the detection characteristics of the GFET by utilizing Raman spectroscopy and establish a method of a highly repetitive and stable graphene crystallographic quality evaluation. In addition to the conventional detection scheme in which the photovoltaic signal was read out from the drain end, the author demonstrated a feasibility of highly sensitive THz detection in GFETs by introducing the gate-readout scheme allowing the so-called three-dimensional rectification (3D-R) in which the in-plane horizontal plasmonic nonlinearity is multiplied by gate-to-channel vertical diode nonlinearity.

1. Introduction

Recently, the volume of wireless communication increases remarkably due to the development of the information society and versatile evolutions in work styles. The author highlights the terahertz (THz) electromagnetic waves which are expected to be used in various industrial applications, including the high speed, high-capacity wireless communications and imaging technology, and focuses on photodetectors operating in the THz-band, which is essential for realizing high-capacity, high-speed THz wireless communications.

The author also focuses on “Graphene” as a promising unique two-dimensional material and fabricates transistor devices using graphene as a channel to apply its outstanding properties for THz functions. Graphene consists of carbon in a monoatomic honeycomb structure, and its band structure is gapless and linearly dispersive. One can expect such an extraordinary property in graphene to realize ultrafast, ultra-sensitive, and ultra-low-noise detectors. In a previous study, a graphene-channel field-effect transistor (GFET), which functions as a THz detector by utilizing the Plasmonic Effect (PLE) and the Photo Thermo-Electric effect (PTE), was designed and fabricated. In this device, the marked photovoltaic output from the drain electrode by both PLE and PTE principles was

demonstrated [1]. On the other hand, the Dirac point voltage defined as the charge-neutrality-point voltage, which normally appears around 0 V in graphene, is largely shifted to around -15 V. The author considers that it is due to an unintentional electron doping, which is a factor that deteriorates the THz detection performance originated from graphene's superior electron transport properties.

2. Back surface Raman spectroscopy

First, the author proposed and introduced the Back Surface Raman Spectroscopy (BSRS) as a stable, reproducible method that allows to improve the device process and fabricate a high-performance GFETs with less electron doping compared to the previous studies. The Raman spectroscopy is usually performed by laser irradiation from the top surface of the device, which needs tedious laser-beam focusing adjustment at every gate stack and passivation processes, substantially degrading the repetitiveness and stability. On the contrary the BSRS irradiate the device from the backside, which can preserve the best beam focusing condition without any re-adjustment throughout the GFET fabrication processes so that it enables highly repetitive and stable evaluation of the graphene crystallographic qualities at each step in the GFET fabrication process [2].

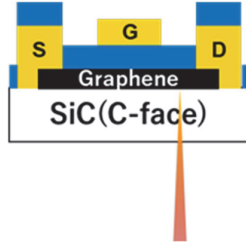


Fig. 1 Schematic image of the back surface Raman spectroscopy to a GFET.

3. Comparison of dielectric deposition process

Second, the author compared the dielectric deposition process between Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PE-CVD) and Atomic Layer Deposition (ALD) by the BSRS. As a result, devices deposited with Al_2O_3 using ALD showed sharp, monopeak, and large G and G' bands, proving an existence of high-quality graphene. No crystallographic quality degradation was observed through the GFET processes after deposition. The results confirmed that the ALD is a promising method. Moreover, when the author fabricated GFETs by using ALD, a significant improvement of less unintentional doping was observed in the ambipolar I-V characteristic with the Dirac point shift as small as within ± 3 V.

4. The THz detection in a drain readout

Third, the THz detection experiments were conducted by using a single-gate GFET in a drain readout scheme. Under the drain-unbiased condition ($V_{ds} = 0$ V), the gate voltage was swept from -10 V to $+10$ V in 1-V steps, where there is no channel gradient so that the PTE does not appear. As a result, the distinctive photoresponse was observed when the gate voltage was applied positively or negatively with respect to the Dirac voltage, which manifested the occurrence of the PLE rectification. However, the PLE cannot well quantitatively explain the photoresponses, which means a third detection mechanism may be involved, which will be discussed in the next section. In addition, the maximum output photovoltage of $+349.5$ mV was subsequently confirmed for this device when the gate voltage was applied positively and negatively under the condition of $V_{ds} = -1$ V where the potential gradient occurred along the channel so that the PTE becomes responsible for THz detection. It can be said that the PTE effect can assist the PLE photoresponse and the third principle might be added for THz detection.

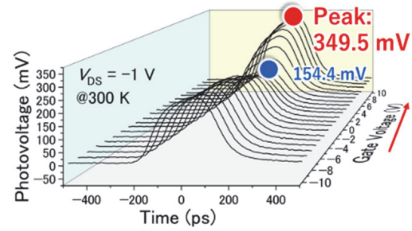


Fig. 2 Measured temporal response of photo-voltage in the drain readout for versus V_g steps.

5. The THz detection in a gate readout

the author conducted THz wave detection experiments in the gate readout scheme. In the same way as in the drain readout experiment with $V_{ds} = 0$ V, the gate voltage was applied from -10 V to $+10$ V in 1 V steps. The photoresponse was observed only when the gate voltage was applied positively. This gate-voltage dependence on photoresponse correlated with the diode-like nonlinearity and strongly supported the idea that the photoresponse in the forward-biased gate electrode scheme was due to the 3D-R effect.

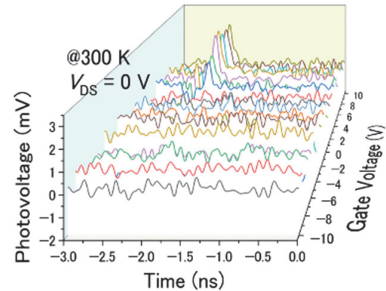


Fig. 3 Measured temporal response of photo-voltage in the gate readout for versus V_g steps..

Conclusion

The unintentional electron doping of graphene in GFETs was successfully eliminated by introducing the ALD- Al_2O_3 gate stack process technology and the GFETs successfully performed highly sensitive THz detection in both the drain and gate readout schemes. The next step would be an introduction of several improved structures like the asymmetric dual-grating-gate GFET as well as the Rectenna-GFET (with different metal species for the gate and source/drain electrodes) for higher sensitive and faster response THz detection.

References

- [1] K. Tamura et al., IRMMW-THz2023, We-PM 1-1-2 (2023)
- [2] H. Seki et al., TeraTech 2023 Dig. pp. 122-123, Aizuwakamatsu, Sept. 6, 2023.

修士学位論文要約（令和6年3月）

RFID 部分義歯管理システムに関する研究

高寺 裕二

指導教員：末松 憲治

A Study on Partial Denture Management RFID System

Yuji TAKATERA

Supervisor: Noriharu SUEMATSU

For elderly people who use partial dentures, accidental ingestion or loss of partial dentures is a serious problem. To solve this problem, an RFID partial denture management system has been proposed that uses different frequencies for in-body detection when accidentally swallowed and out-body detection when lost. Dual use RFID tag that communicates at 920 MHz in body and 5.02 GHz out body was also fabricated for use in this system. In this thesis, simple phantom model simulating the shape and electrical characteristics of the human head were fabricated, and the detectable range under accidental ingestion situations was measured. As a result, the effectiveness of the system for accidental ingestion detection is confirmed. The effectiveness of the system in detecting lost partial denture was also confirmed..

1. はじめに

現在、日本では75歳以上の89%が義歯を利用しており、その約半数の方が部分義歯を利用している。部分義歯はサイズが約30mmと小型であるため、紛失・誤飲が起こりやすく、社会問題となっている。そのため誤飲や紛失時のより簡便な検知方法が必要となっている。この課題に対し、RFID 部分義歯管理システムが提案されている[1]。システムの構成を図1に示す。RFID 部分義歯管理システムでは部分義歯にRFタグを埋め込むことで、部分義歯の誤飲・紛失の検知を行う。体内通信では市販のRFIDリータライタ(R/W)で利用可能な920MHz帯を用い、体外通信では5.02GHzを用いている。体外通信時にはリータライタに周波数コンバータを接続し5.02GHzの通信を行う。これまでの検討により、図2に示すような体内外共用RFIDタグが試作されており、人体環境(水道水中)で920MHz、空気中で5.02GHzで通信が成立することが確認されている。しかしこれまでの検討では、頭頸部の形状や人体の電気的特性の再現が不十分であり、誤飲検知への有効性の検証が不十分であった。また体内通信における通信方式に電波方式を利用していたが、人体の誘電率・導電率による影響を受けづらい磁界を用いた電磁誘導方式の利用がより適している可能性がある。そのため、人体の頭頸部の外形と電気的特性を模擬した頭部モデルを作製し、誤飲想定時の電波方式、電磁誘導方式による検知可能範囲の測定を行い、システムの誤飲検知への有効性を検証する。また、体外通信による紛失時の検知の有効性の検証を行う。

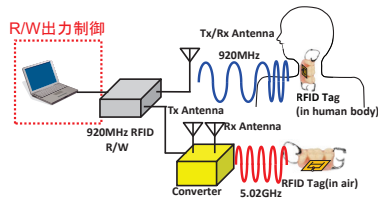
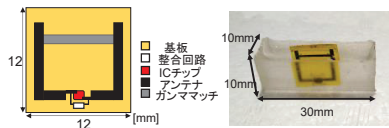


図1 システムの概要



(a)試作タグ (b)レジンに埋めたタグ

図2 体内外共用RFIDタグ

2. 体内通信による誤飲検知の有効性の検証

誤飲時の部分義歯の所在である人体の頭頸部の外形を再現するため図3(b)に示すような簡易ファントムモデルを作製した。モデル内にはSAR評価液剤を満たすことで人体の電気的特性を再現している。このモデルの頭頸部に当たる図3(a)中に示す点o上に体内外共用RFIDタグを配置することで誤飲した状態を再現している。電波方式による検知可能範囲の測定系を図3に示す。R/Wの出力電力は30dBmとしている。またR/Wの受信電力が最小受信電力である-60dBmとなったときに通信が途切れる。そのため通信が途切れた時のLを最大通信距離としてθを

変えながら最大通信距離の測定を行った。電波方式による測定の結果を図4に示す。図4中の凡例は図3(a)の点o上には位置した体内外共用RFIDタグの向きを示している。測定の結果から、いずれのRFIDタグの向きにおいても検知可能な方向が存在することが確認でき、リーダライタアンテナを首の周りで走査することで誤飲の検知が可能であることを示した。

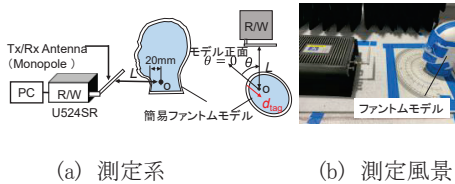


図3 電波方式による測定

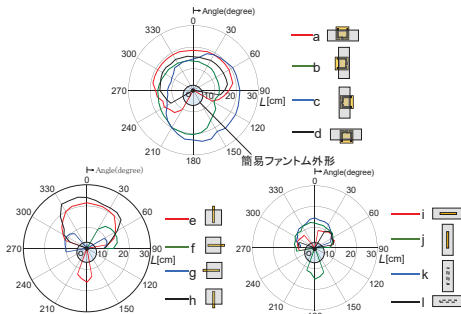


図4 電波方式による測定結果

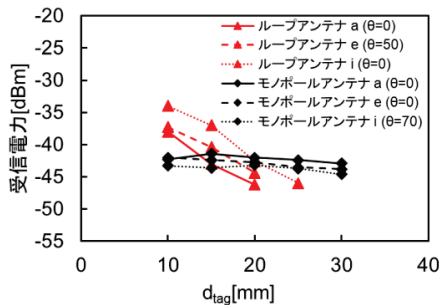


図5 電波方式と電磁誘導方式の比較

また図3のモノポールアンテナをループアンテナに変え、簡易ファントムモデルの体表から5mmの位置に配置して、 θ を変えながら電磁誘導方式による検知可能範囲の測定を行った。それぞれの体内外共用タグの向きにおいて受信電力が最大となった角度 θ での受信電力の体表からの距離 d_{tag} 依存性を図5に示す。図5中には同様の測定をモノポールアンテナを用いて行った電波方式による結果も示している。結果から、ループアンテナは体表から近い範囲において受信電力が大

きいが、距離による減衰が大きく、距離に応じて受信電力の大小がモノポールアンテナと入れ変わることが分かる。このことから様々な体表からの距離が想定される誤飲に対して、モノポールアンテナとループアンテナの両方を切り替えて利用することで、誤飲の検知がより確実になることを示した。

3. 体外通信の検知可能範囲の測定

体外通信の検知可能範囲の測定系を図6に示す。送信電力を27dBmとして θ を変えながら通信の成立する最大通信距離の測定を行った。図7に示す測定の結果からタグの向きによらず、0度方向において5cm以上の距離で通信が成立することを確認した。

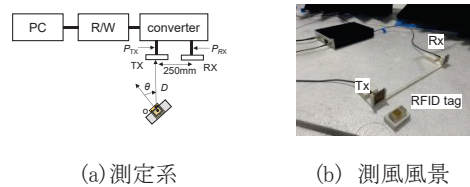


図6 体外通信の測定

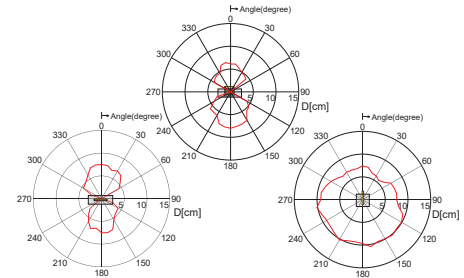


図7 体外通信の測定結果

4. まとめ

人体頭頸部の外形と電気的特性を再現する簡易ファントムモデルを作製し、これを用いて誤飲時の検知可能範囲を測定し、システムによる誤飲の検知が可能であることを示した。またモノポールアンテナとループアンテナの両方を切り替え、受信電力の大きい方を選択して用いることで、誤飲の検知がより確実になることを示した。体外通信も同様に検知可能範囲の測定を行い、システムによる義歯紛失時の検知への有効性を示した。

文献

1) Bowen Dang, M.Motoyoshi, "In-body/Out-body Dual-Use Miniaturized RFID Tag System Using 920MHz/5.02GHz Bands," 2020 IEEE Int. Symp. on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT), pp.148-150, Hiroshima, Japan, Sept.2020

修士学位論文要約（令和 6 年 3 月）

中赤外光誘起超音波を用いた生体組織光音響イメージングの研究

田中 望実

指導教員：松浦 祐司

A Study on Photoacoustic Imaging of Bio-tissue by Ultrasound Induced by Mid-infrared Light

Nozomi Tanaka

Supervisor: Yuji Matsuura

In the mid-infrared region, a variety of biological information is obtained because strong absorption peaks of biomolecules appeared in this so-called fingerprint region. We proposed photoacoustic spectroscopy using a PZT transducer (PZT-PAS) and a mid-infrared quantum cascade laser (QCL) for biological analysis. First, we attempted imaging of biological tissue by using a bovine slice as a sample. By using machine learning: SVM, we confirmed that we can get the separated image of fat and muscle. Second, we measured 2-HydroxyGlutarate (2HG), which has attracted attention as a biomarker for malignant tumors. Porcine brain samples were used as a sample and measured spectra of the samples with several different concentrations.

1. はじめに

脳腫瘍の治療においては正常組織との境界が不明瞭であることから、手術現場での正常脳との判別が大きな課題である。現在、手術現場で取り入れられている方法として、CT による脳マッピング[1]や蛍光による判別[2]があるが、リアルタイムかつラベルフリーな悪性腫瘍判別のためには改善が必要である。非侵襲な生体測定手法の一つとして、中赤外領域の光を用いた光学的手法が挙げられる。波長 3–12 μm 付近には、生体組織を構成するタンパク質、糖質、脂質、アミノ酸、水など様々な分子が強力な吸収ピークを示す指紋領域があり、詳細な測定が期待される。

本研究では、FTIR よりも低コストかつ小型な量子カスケードレーザー (QCL) を光源として用いた光音響分光法 (Photoacoustic Spectroscopy: PAS) による生体組織成分の分析手法を検討した。

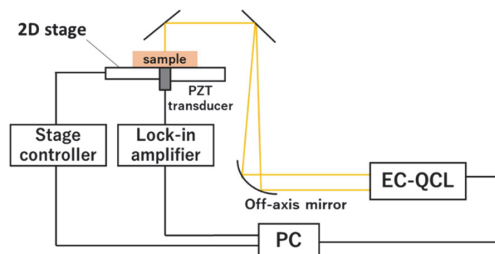


図 1 測定系の概略図

2. 測定方法

測定系の概略図を図 1 に示す。光源には、波長 8.3–10.8 μm の範囲で波長可変な EC-QCL を用いた。試料中で発生した超音波を、試料背面に配置した圧電トランスデューサにより検出した。パルス幅は 200 ns、最大平均パワーは 15 mW 程度である。QCL を使用することによって従来の中赤外光音響イメージング[3]の光源として用いられる光源より約 10 分の 1 程度の小型化、5 分の 1 程度の低コスト化を行っている。

なお、本手法においては得られるスペクトルの形状が吸収スペクトルに対しておおよそ反転したものとなる傾向がある。そこで、本研究では COMSOL Multiphysics を用いたシミュレーションも行った。シミュレーションでは 1 mm の厚みを持った高分子試料に

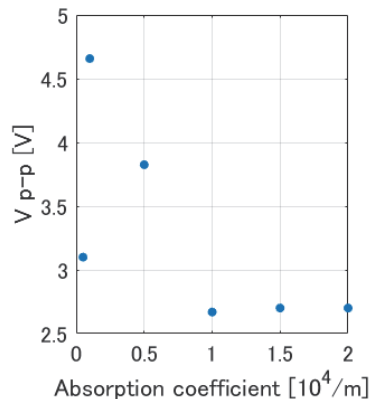


図 2 COMSOL による吸収値に対する取得電圧のシミュレーション

500 kHz のレーザー光を照射した。

図2にシミュレーションの結果を示す。吸光度の上昇に対して負の関係性を持ち、ごく大きい範囲では飽和することがわかった。吸光度が極めて大きい試料に対しては、試料のごく表面でのみ光が吸収される。このような場合、温度上昇も表面で発生し、応力の発生源から検出器までの物理的な距離が増加し、試料内で応力の減衰が起こる。このため吸光度に対する信号の反転が見られると推測される。

3. 牛肉試料の測定

生体試料におけるイメージングの可能性を調べるために、牛肉片内における筋肉部位と脂肪部位を判別することを試みた。機械学習の一種であるサポートベクターマシン(SVM)を用いて学習と分類判別を行い、最も判別率の高い2波長である 1040 cm^{-1} と 1090 cm^{-1} を用いてイメージングを行なった結果を図3に示す。測定範囲は5mm角であり、1ステップ500 μm として走査した。この結果から脂質と筋肉が複雑に混合した試料においても判別が可能であることがわかった。

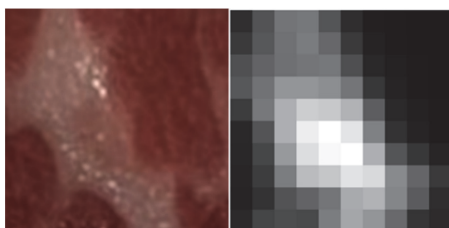


図3 牛肉片の可視像(左)とイメージング結果(右)

4. 脳腫瘍バイオマーカーの測定

脳腫瘍バイオマーカーとして 2-HydroxyGlutarate (2HG)を用いた測定を行なった。2HGは悪性腫瘍特性が極めて高く[4]、中赤外領域に複数のピークを持つ。実際にヒトの脳腫瘍片をFTIR-ATR法によって測定した際に2HGのピークが複数確認された報告もあり[5]、2HGを基準とした悪性腫瘍判別が期待できる。

本手法を用いて2HG水溶液の測定を行なうと、 1100 cm^{-1} 周辺に大きなピークを持つことがわかった。さらに、HGを混合させたブタの脳試料を模擬脳腫瘍試料として測定を行ない、生体試料内での2HG検出が可能であることがわかった。一方で、ブタの脳は生体組織の複雑さや本手法における吸収係数との非線形性から安定したスペクトルを取得することが難しい。このため、イメージングを行なうには測定条件の検討が必要であった。そこで、これまで測定に用いてきた繰り返し周波数500 kHzから周波数を変化させることで安定な測定を試みた結果、適切な測定周波数とし

て700 kHzを採用した。

イメージングは、測定したスペクトル領域のうち、2HGの吸収帯域に相当する $1080\text{--}1110\text{ cm}^{-1}$ におけるピーク面積値をベースライン処理を行ったうえで計算し、それによって評価した。2HGが5%含まれたブタ試料を左側に配置した試料内の $5\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ の領域を1ステップあたり1mmで測定した結果を図4に示す。

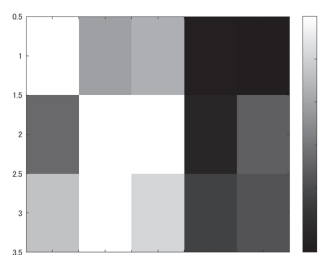


図4 ブタ脳試料内の2HGのイメージング

試料左側が明るく反応していることがわかり、2HGの生体内イメージングの可能性が示された。

5. まとめ

本研究では、簡易な測定系でリアルタイムかつその場計測が可能なPZT-PASによる生体イメージングについて検討した。中赤外光を試料に照射した際に試料中に発生する超音波を圧電トランスデューサで直接検出することで、生体模擬試料や生体試料の分光分析を試みた。牛肉片のイメージングを行ない、本手法のイメージングデバイスとしての有用性を示した。また、脳腫瘍のバイオマーカーとして2HGに着目し、脳腫瘍における悪性腫瘍検出への有用性が示唆された。

文献

- 1) Taichi Kin, *et al.*, "Pre- and Intraoperative Brain Functional Mapping in Brain Tumor Surgery", *Jpn J. Neurosurg.*, 23(1), 5-11 (2014).
- 2) Naokado Ikeda, *et al.*, "History, Current Status, and Emerging Issue of 5-Aminolevulinic Acid Induced Fluorescence Guided Surgery in Neurological Surgery", *JJSLSM*, 44(2), 155-163 (2023).
- 3) Yun He, *et al.*, "Label-free imaging of lipid-rich biological tissues by mid-infrared photoacoustic microscopy", *J. Biomed. Opt.*, 25(10), 106506 (2022).
- 4) L. Dang, *et al.*, "Cancer-associated IDH1 mutations produce 2-hydroxyglutarate", *nature*, 462, 739-744 (2009).
- 5) O. Ukermann, *et al.*, "Optical Analysis of Glioma: Fourier-Transform Infrared Spectroscopy Reveals the IDH1 Mutation Status", *Clin Cancer Res*, 24(11), 2530-2538 (2018).

修士学位論文要約（令和6年3月）

共通鍵暗号ソフトウェアの深層学習に基づく安全性評価に関する研究

田中 陸真

指導教員：本間 尚文， 研究指導教員：上野 嶺

Deep-Learning based Security Evaluation of Symmetric Cipher Software

Rikuma TANAKA

Supervisor: Naofumi HOMMA, Research Advisor: Rei UENO

This paper presents a method of Non-profiled Deep-Learning based Side-Channel Attack (DL-SCA) of the symmetric cipher software. The basic idea of the proposed attack is to train an NN to estimate plaintext instead of the secret intermediate value using the side-channel traces of the i -th byte (training byte) operation and estimate the difference of partial keys between the i -th byte to other bytes from the side-channel traces of each byte except for the i -th byte (analyzing bytes) operations using pre-trained NN. By estimating the difference of partial keys between the training byte and the analyzing bytes, full-key recovery is feasible if guessing the partial key of the training byte by brute force. We confirm that full-key recovery is achieved with 13,000 side-channel traces against the software implementation of AES and the advantage of the proposed method in comparison with the previous ones through actual experiments.

1. はじめに

現代の安全な情報通信において、共通鍵暗号は必要不可欠となっている。特に、近年のIoTの進展に伴い、暗号アルゴリズムがソフトウェア等でデバイス上に実装された暗号デバイスが幅広く利用されている。そうした暗号デバイスに対する脅威の1つとしてサイドチャンネル攻撃 (SCA: Side-Channel Attack) がある。サイドチャンネル攻撃とは、暗号デバイス動作時の物理情報 (サイドチャンネル情報) の解析によって、暗号デバイス内の秘密鍵を推定する攻撃である。サイドチャンネル攻撃は、演算時の中間値 (秘密中間値) を利用するため、数学的に解読困難とされていた暗号アルゴリズムに対しても有効であることに加え、前述の背景に伴う暗号デバイスの大量流通により、大きな脅威となっている。特に、サイドチャンネル情報の解析に深層学習を利用する深層学習サイドチャンネル攻撃 (DL-SCA: Deep-Learning based SCA) が強力なSCAであると報告されている¹⁾ため、DL-SCAに対する共通鍵暗号ソフトウェアの安全性評価が急務となっている。

従来のDL-SCA手法の多くは、攻撃の標的とされるデバイス (攻撃対象デバイス) とは別に、それと同型かつ攻撃者が内部状態を自由に操作可能であるデバイス (プロファイリングデバイス) を必要とする、プロファイリング型攻撃に着目していた。一方、上記の制約を満たすデバイスを入手することは困難であるため、攻撃対象デバイスのみから秘密鍵を推定するノンプロファイリング攻撃に着目する必要性が高い。

そこで本研究では、ノンプロファイリング型 DL-

SCA に対する共通鍵暗号ソフトウェアの安全性評価を目的とする。具体的には、従来のDL-SCAで推定されていた鍵値そのものではなく、部分鍵の差分を推定するノンプロファイリング型DL-SCA手法を提案し、共通鍵暗号AESのソフトウェア実装に対する有効性を検証する。

2. 従来のプロファイリング型DL-SCA

プロファイリング型DL-SCAは、プロファイリングフェーズと攻撃フェーズから構成される。まず、プロファイリングフェーズでは、プロファイリングデバイスから収集したサイドチャンネル波形を用いて、サイドチャンネル波形 X から秘密中間値 Z を推論するNNを学習させる。続く攻撃フェーズでは、攻撃対象デバイスから収集したサイドチャンネル波形 X を学習済みNNに入力し、推定された秘密中間値 Z に関する確率分布を用いて秘密鍵 k^* を推定する。

3. 部分鍵差分推定に基づくノンプロファイリング型DL-SCA

ノンプロファイリング型DL-SCAでは、攻撃者はNNの学習を行う際にあらかじめ正解鍵 k^* を知ることができず、事前に正しく秘密中間値 Z を計算することができない。そのため、 $X \rightarrow Z$ を推論するNNの学習を行うことはできない。そこで、提案手法では、サイドチャンネル波形 X から平文 T を推論するNNを学習させる。一方、 T を推論したとしても、 T と k^* は互いに独立関係にあるため、 k^* を直接推定することはできない。そこで、学習時とは異なるバイトに着目し、この学習済みNNを用いて平文 \hat{T} の推論を行う。このとき、学習時と推論時で異なるバイトに着目するため、推論さ

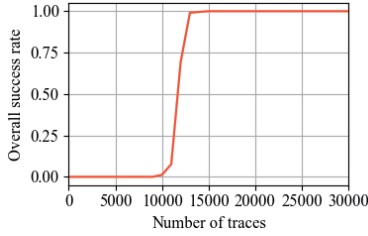


図 1 提案手法の評価結果

れた \hat{T} と実際の平文 T は等しくならない。提案手法では、この等しくならないという事実を用いることで部分鍵の差分推定を行うことが主眼となる。具体例として AES ソフトウェア実装において、NN の学習の際に 1 バイト目に着目する場合の提案手法の流れを説明する。

$T[j], K[j], Z[j], X[j]$ をそれぞれ j バイト目の部分平文、部分鍵、 $Sbox$ 出力の秘密中間値、観測したサイドチャンネル波形とする。AES ソフトウェア実装の場合には $Z[j] = Sbox(T[j] \oplus K[j])$ となる。まず、1 バイト目の $Sbox$ 演算に着目して NN の学習を行う。このとき、NN が学習するのは $X[1]$ から $T[1]$ を推論するタスクである。サイドチャンネル波形に漏洩するのが $Z[1]$ に関する情報であると仮定すると、NN はその推論を $X[1] \rightarrow Z[1] \rightarrow T[1]$ という流れ(マルコフ連鎖)で行っていると考えられる。続いて、2 バイト目の $Sbox$ 演算に着目したとする。2バイト目のサイドチャンネル波形 $X[2]$ を学習済み NN に入力すると、 $T[2] \rightarrow Z[2] \rightarrow X[2] \rightarrow \hat{Z}[1] \rightarrow \hat{T}[1]$ というマルコフ連鎖が成立する。ここで、 $\hat{Z}[1]$ と $\hat{T}[1]$ は、それぞれ $X[2]$ が 1 バイト目の $Sbox$ 演算からの漏洩が含まれるサイドチャンネル波形であると仮定したときの、NN によって推論される秘密中間値と平文である。なお、 $T[2] \rightarrow Z[2] \rightarrow X[2]$ はサイドチャンネル情報が波形に漏洩する物理的な流れ、 $X[2] \rightarrow \hat{Z}[1] \rightarrow \hat{T}[1]$ は NN による推論の流れを表している。このとき、 $\hat{T}[1]$ と $T[2]$ の関係性を考えると、 $Z[2] = \hat{Z}[1]$ が成立しているため、 $Sbox(T[2] \oplus K[2]) = Sbox(\hat{T}[1] \oplus K[1])$ となる。したがって、 $\delta[1, 2] = K[1] \oplus K[2]$ とすると、 $\hat{T}[1] = T[2] \oplus \delta[1, 2]$ と表すことができる。ここで、 $\hat{T}[1]$ は NN による推論で得られる確率分布、 $T[2]$ は攻撃者から既知であるため、部分鍵差分 $\delta[1, 2]$ を求めることができる。同様の手順を 3 バイト目以降にも適用することで、計 15 個の部分鍵差分を得る。最後に、1 バイト目の部分鍵について全探索を行うことで、全鍵回復ができる。

4. 提案手法の評価実験

評価に使用した NN のアーキテクチャは、Wouters らが提案したもの²⁾を本評価に最適化したものである。提案手法を AES ソフトウェア実装に適用した際の評価結果を図 1 に示す。縦軸の攻撃成功確率が 1 に安定することが読み取れ、提案手法の有効性を確認

表 1 従来手法との比較結果

(a) DL 未使用の手法との比較

攻撃手法	This work	Second-order CPA [CHES, 2004]	MCC-DPA [CCS Workshop, TIS, 2016]
必要波形数	13,000	17,533	30,000

(b) DL 使用の手法との比較

攻撃手法	This work	Collision DL-SCA [TCHES, 2023]	DDLA [TCHES, 2019]		Multi-DDLA [ESL, 2022]	
			w/MSB	w/LSB	w/MSB	w/LSB
必要波形数	13,000	15,000	14,000	N/A	14,000	N/A
攻撃の安定性	○	○	×		×	
NNの学習回数	16	16	4,096		16	

した。また、従来のノンプロファイリング型 SCA 手法との比較結果を表 1 に示す。提案手法は最も少ないサイドチャンネル波形数で攻撃に成功することを確認した。一方、攻撃成功に 14,000 波形を必要とする NN の学習ラベルに中間値の MSB を使用した場合の DDLA 及び Multi-DDLA と比べると、攻撃に必要なサイドチャンネル波形数に大きな差は見られない。しかしながら、これらの手法は NN の学習ラベルとして中間値の MSB を使用した場合には攻撃に成功しているが、LSB を使用した場合には攻撃が全く成功せず、攻撃性能が学習ラベルの選択に左右されるという攻撃の不安定さが見られた。攻撃者は事前に最も適した学習ラベルを知ることはできないため、攻撃性能が学習ラベルの選択に左右されるという攻撃の不安定さは大きな問題となる。また、DDLA は全鍵回復に 4,096 回の NN の学習が必要であり、その計算コストも問題となる。以上のことから、提案手法はいずれの先行研究手法と比較をしても、攻撃に必要なサイドチャンネル波形数、計算コスト、攻撃の安定性の観点から優位性を持つことを確認した。

5. まとめ

本研究では、共通鍵暗号ソフトウェアに対する部分鍵差分推定に基づくノンプロファイリング型 DL-SCA 手法を提案した。提案手法を AES ソフトウェア実装に対して適用することで、現実的なサイドチャンネル波形数で全鍵回復に成功することを示した。また、従来のノンプロファイリング SCA 手法に対する優位性を示した。

文献

- 1) A. Ito et al., “Perceived information revisited: New metrics to evaluate success rate of side-channel attacks,” IACR Transactions on Cryptographic Hardware and Embedded Systems, pp. 228–254, 2022.
- 2) L. Wouters et al., “Revisiting a methodology for efficient CNN architectures in profiling attacks,” IACR Transactions on Cryptographic Hardware and Embedded Systems, pp. 147–168, 2020.

修士学位論文要約（令和 6 年 3 月）

双方向 DC/DC コンバータによる直流電力交換システムに関する研究

唐 琼顔

指導教員：山田 博仁

Research on DC Power Exchange Systems Using Bidirectional DC/DC Converters

Qiongyan TANG

Supervisor: Hirohito YAMADA

In recent years, microgrids based on direct current (DC) systems have gained attention due to the merits of better integration of renewable power supplies, simplified operation, etc. compared to alternating current (AC) power systems. However, the regional variations in natural resources and power consumption will lead to an unbalance among DC microgrids, and the uneven energy distribution will cause the underutilization of renewable resources or even possible insufficient power supply for users. As a result, we proposed a DC power exchange system for the Autonomous Decentralized Coordinated Control (ADCC) based battery directly connected DC microgrids. The feasibility, stability, and scalability of the proposed DC power exchange system are demonstrated with experiments. A general operating method for power exchange among multiple DC microgrids is also concluded based on the empirical study.

1. はじめに

再エネを主力電源とするマイクログリッドでは、電力状況が各マイクログリッドによって異なるため、電力に余裕のあるマイクログリッドや、逆に電力が不足しているグリッドが存在し、グリッド間で電力状況が大きく異なる場合も存在する。電力的に余裕のあるマイクログリッドから、電力不足に陥っているマイクログリッドへの電力融通が、電力分布を全体最適化および再エネを効率的に活用できる技術となり得る。本研究はスケラブルかつ構成および操作が簡単な電力融通方式の開発を目的として、DC/DC コンバータによる直流電力交換システムを提案し、実験によって実現可能性、動作安定性と拡張性を検証し、複数直流マイクログリッド間での直流電力交換システムの動作手順を要約する。

2. 直流電力交換システム

すべての電力交換機器を一か所に配置する集中型により、電力交換機器を各マイクログリッド近傍に配置する分散型電力交換システムはよりスケラブルである。そこで本研究は、分散型電力交換システムの構成に基づいて、電力交換専用グリッドによるあらゆるグリッドトポロジーにおいても柔軟に対応可能な直流電力交換システムを提案する。提案する双方向 DC/DC コンバータによる直流電力交換システムが図 1 に示すように、動作プレーン（物理層）と制御プレーン（ネットワーク層）で構成される。

動作プレーンは、双方向 DC/DC コンバータと電力

交換専用グリッドによって構成され、実際に直流マイクログリッド間での電力交換動作を実現する部分である。双方向 DC/DC コンバータの低電圧側が各マイクログリッドの直流基線に、高電圧側が電力交換専用グリッドに接続され、マイクログリッド間の送電距離によって適切な電力交換電圧にまで昇圧し、送電損失を低減することが可能で、実際の設置条件に応じて異なる直流マイクログリッド配置に対して柔軟に対応可能である。

制御プレーンにおけるコントローラ（実際には PC など）が通信回線によって DC/DC コンバータと接続されることで、DC/DC コンバータを介して各マイクログリッドの電力状況を把握できる一方、各 DC/DC コンバータの動作も制御する。コントローラ同士が通信線を介して互いのマイクログリッドの電力情報を共有し、電力交換動作をコントロールすることも可能である。

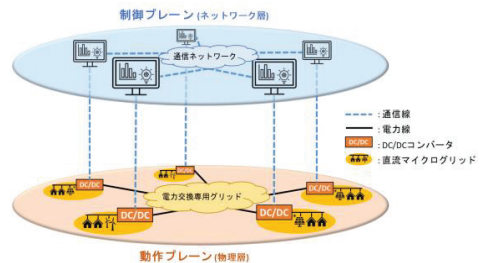


図 1 DC/DC コンバータによる直流電力交換システム

3. 直流マイクログリッド間での電力交換

提案する直流電力交換システムの構成に基づいて、双方向 DC/DC コンバータを2台用い、まず1対1電力交換システムを構築した。1対1の電力交換が実現可能であることを確認し、直流電力交換システムの送電効率および送電損失と受電電力との関係を図2にプロットした。それに加えて、直流グリッドの基線電圧に最大3%の電圧変動が起きたとしても、安定的な電力交換を維持できることを確認した。

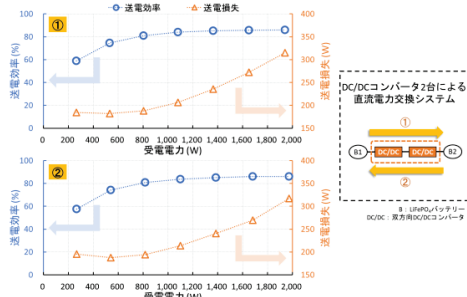


図2 1対1直流電力交換動作

3台の双方向 DC/DC コンバータの高電圧側を相互に接続することで、3つの直流マイクログリッド間での電力交換を想定した1対2および2対1の動作実験を行い、一対多および多対一の電力交換も実現した。また、図3に示すように、3台のうち2台を使用した電力交換動作実験によって、直流電力交換システムの送電効率が、電力交換専用グリッドに接続されているが待機状態にある双方向 DC/DC コンバータの数には依存しないことから、直流電力交換システムが拡張可能であることを確認した。

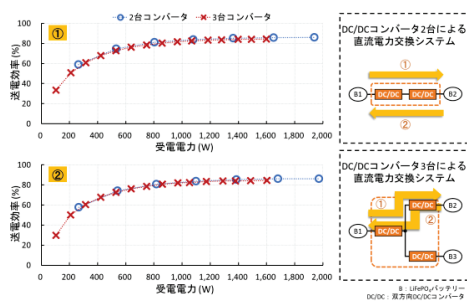


図3 直流電力交換システムの拡張性検証

さらに4台の DC/DC コンバータによって構成した直流電力交換システムを用い、4つの直流マイクログリッド間での電力交換を想定した2対2電力交換の実験を行った。多対多の電力交換が実現可能であることを確認した。送電電流比を1:1に固定し、一定の総受電電流の場合に異なる受電割合での直流電力交換システムの送電効率と送電損失

を図4に示す。送電側または受電側の電力配分を実現できる操作手順を作成した上で、提案した直流電力交換システムの送電効率は総受電電力に依存することが明らかとなった。

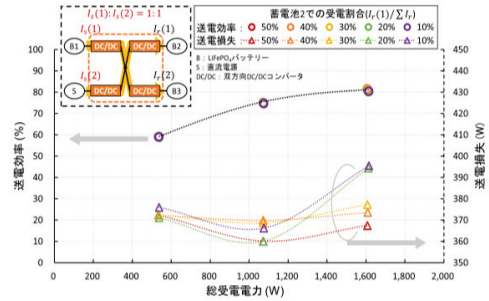


図4 送電電流比を1:1とした場合の2対2電力交換動作

4. 直流マイクログリッド間での電力交換システム

実証実験による、複数の直流マイクログリッド間での直流電力交換システムの動作手順を図5のように要約できる。新たな直流マイクログリッドを電力交換専用グリッドに追加する場合には、対応する DC/DC コンバータを二次側定電流で動作させ、電力交換専用グリッドに接続するだけで良い。また、電力交換を行っていない場合には、電力交換専用線の電圧を0Vにしておけば、万が一の事故などに対しても安全である。

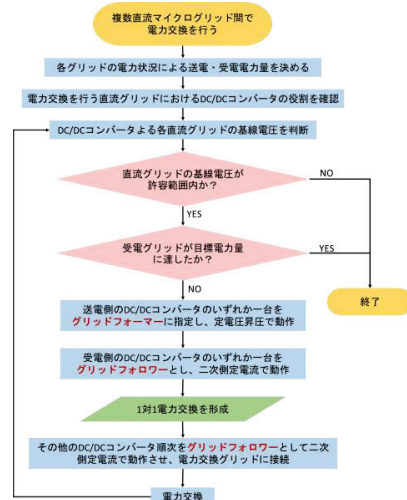


図5 直流電力交換システムの動作手順

5. まとめ

本論文に提案した直流電力交換システムは、簡単な構成で複数の直流マイクログリッド間での電力融通を実現でき、グリッド数の増減にも柔軟に対応でき、グリーンな分散型電力系統の実現に向けて重要な意味を持つ。

修士学位論文要約（令和6年3月）

中赤外光音響分光法による血中成分分析の高精度化に関する研究

談 成

指導教員：松浦 祐司

High-Precision Analysis of Blood Components
Using Mid-Infrared Photoacoustic Spectroscopy

Cheng TAN

Supervisor: Yuji MATSUURA

For the non-invasive measurement, a photoacoustic spectroscopic (PAS) method is introduced. An external cavity-quantum cascade laser was used as the light source, and a low-volume photoacoustic cell equipped with a free-field microphone is deployed to receive PA signals. The optimum modulation frequency is determined by experimental data. Based on two lock-in amplifiers, an additional high frequency signal is measured to be used as a reference signal within the fingerprint region ($930\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$). Consequently, PA spectrum showed higher correlation with components change in biological tissues based on extra signal reference.

1. Introduction

Mid-infrared (IR) spectroscopy directly detects the fundamental vibrations of the component molecules of biological tissue, such as proteins, lipids, and carbohydrate, that appear at wavelengths of 6 to 12 μm , enabling accurate and highly sensitive blood component analysis. Several studies performed in vivo analysis of blood components using mid-infrared attenuated total reflection (ATR) spectroscopy, which yielded human blood glucose levels. The ATR method utilizes total internal reflection principles, generating evanescent waves near the interface of a prism and the sample, allowing measurement of the sample's absorbance. However, the penetration depth of the ATR evanescent field for living tissue is limited to a few micrometers because of the extremely high absorption coefficient of water in the mid-infrared region. Thus, measurements on biological tissues are limited to non-corneal areas such as the lip mucosa.

Photoacoustic spectroscopy (PAS) that detects acoustic waves produced by heat generated on absorption of light can be an alternative to the ATR method. The penetration depth of mid-IR light is about 25 that is much larger than the 2–3 that is obtained by ATR spectroscopy, and this method detects components in interstitial fluid under a stratum corneum 15–20 in thickness.

2. Experiment

A schematic of our measurement system is shown in Fig. 1. The external cavity quantum cascade laser (EC-QCL: Hedgehog; Daylight Solutions, USA) is

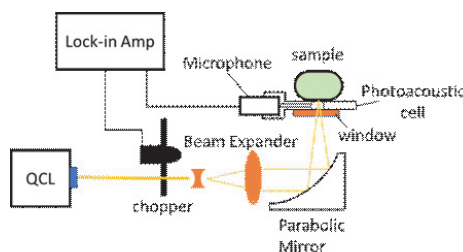


Fig. 1 Experimental setup

used as the light source, which has a tunable wavelength from $930\text{ to }1200\text{ cm}^{-1}$. The light source emits laser pulses at frequency of 500 kHz with 100 ns as the pulse width. The average power of the laser beam is about 5 mW, which deals no damage to biological tissues. The light is modulated by an optical chopper, expanded by a beam expander, and focused by an off-axis parabolic mirror. Testing sample is placed onto the photoacoustic cell, where light is directly irradiated from below. Generated acoustic wave are received by a condenser microphone. Then a lock-in amplifier detects the signal. In PAS, in principle, sensitivity can be improved by reducing the volume of the gas cell. Therefore, we fabricated the gas cell with a cavity 2 mm in diameter and 2 mm deep. The volume of this gas cell is much smaller than those of other cells described to date, and the bottom of the cell is sealed with a ZnSe window and the sample is pressed tightly against the top opening.

The modulation frequency of the incident light decides the thermal diffusion length, approximately governed as follows,

$$\mu_s = \sqrt{\frac{D}{\pi f}} = \sqrt{\frac{k}{\rho c \pi f}}$$

where D denotes to the thermal diffusivity, k denotes to the thermal conductivity, c denotes to the specific heat and ρ is the density of the sample material. This formula shows that depth profiling is possible by varying the modulation frequency. When the thickness of a sample d is sufficiently greater than the light penetration depth (around 25 μm), a PA signal proportional to the optical absorption coefficient is obtained.

In this paper, we propose to detect and utilize the harmonic components of the photoacoustic wave as well as the fundamental frequency. The square wave optical signal obtained from the optical chopper can be Fourier decomposed into a superposition of a fundamental frequency and a frequency signal that is an odd multiple of the fundamental frequency. Signals obtained through different frequency filtering reflect the material characteristics under different thermal diffusion lengths for the same light source energy. Simultaneously measuring a set of additional signals as a reference can eliminate disturbances caused by temporal variations in the light source and enhance the material characteristics at different depths in the sample. In our model, a fundamental frequency of 60 Hz and a harmonic frequency of 180 Hz that corresponds to thermal diffusion lengths of 15 μm . To explore the correlation between the blood glucose levels measured via blood sampling and photoacoustically, a healthy subject fasted for at least 8 h and then consumed a relatively high-sugar diet. Blood glucose levels were measured and PA spectra simultaneously obtained every 5 min for 2 hours. The one-touch Verioview was used for self-monitoring of blood glucose levels. For both blood collection and PA measurement, the target site was the fingertip of the ring finger.

3. Results and Discussion

In the measurement, two frequency components were detected simultaneously using two lock-in-amplifiers, one set to detect a 60 Hz component and the other to detect a 180 Hz component. The wavelength was scanned between 930 and 1200 cm^{-1} in 4 cm^{-1} steps, and each scan took about 2 seconds. Six spectra obtained at each of the 60 Hz and 180 Hz frequencies on finger tips are compared. Results shown that the spectral variation is mainly due to the power variation of the laser source, which is comparable in both groups. Then we divided the power spectra corresponding to 60 Hz by the ones for 180 Hz. Figure 2 shows the coefficients of variation obtained for the six data sets for the 60

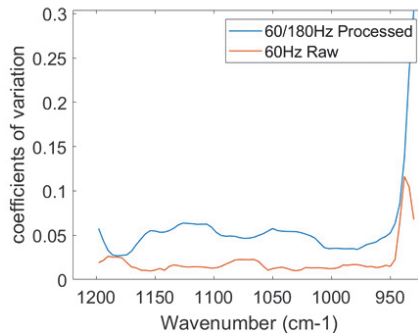


Fig. 2 Coefficient of variation between one channel signals (60 Hz) and processed signals(60 Hz+180 Hz)

Hz/180 Hz calculations and for those obtained for 60 Hz alone, respectively. It can be observed that the data processed using this method reduces the fluctuation of the data within the target wavenumber range of our measurements. This indicates that the effect of power fluctuations can be suppressed by performing operations on two different spectra measured simultaneously.

In measurements on human fingertips, we gathered a total of 128 sets of data by synchronously measuring the actual blood glucose levels. The blood glucose data ranged between 80 mg/dL and 200 mg/dL. In analysis of blood glucose levels, we applied partial least squares regression (PLSR) analysis by using the spectral data from 930 cm^{-1} to 1200 cm^{-1} as the explanatory variable, and the blood glucose value obtained by blood sampling the objective variable. We considered predicted data within ± 20 mg/dL of the true value as positive samples and predicted data exceeding this error range as negative samples considering the inherent error fluctuation in puncture sampling readings. Under this condition, we can reach an accuracy of 71% and r^2 value of 0.413. Based on this result, we made further attempt on using random forest algorithm to improve the current data performances. Firstly, data are being made into pairs as training sets. Then, all the blood sugar values are labeled into 0-8, in total 9 different levels. Instead of outputting prediction of exact blood sugar value, we make predictions by comparing similarities of two data. we do obtain the average of the multiple comparisons between unknown data and achieved datasets to get a result with higher accuracy. By using this method, accuracy rises to 79.2% and r^2 value is improved to 0.706. Through data selected by Random Forest analysis, values at 980 cm^{-1} , 1020 cm^{-1} and 1050 cm^{-1} could be attributed to vending or stretching of carbon-carbon bond and carbon-oxygen bond, which corroborates the reasonableness of the prediction.

修士学位論文要約（令和6年3月）

分散アンテナシステム用再エネ発電電源に関する研究

DING YUXUAN

指導教員：山田 博仁

Research on renewable energy-based power sources for distributed antenna systems

DING YUXUAN

Supervisor: Hirohito YAMADA

In recent years, with the development of next-generation mobile communication technology, the use of dispersed antenna technology has become mainstream. To this end, to promote the development of B5G (6G), this study proposes a new solution for the development of a renewable energy power supply system for distributed antenna systems. In this research proposed a power supply method that uses a combination of independent power supply and fronthaul power supply. In this research, we set goals for two scenarios: the disasters and the normal times. The first goal is to achieve a 50% or more renewable energy ratio in normal times. The other goal, based on the concept of the "wall of 72 hours", set a target for the duration days of power supply of more than 3 days in the event of disasters. Then, based on the measured average power consumption of the antenna of 45W, this study built a simulation model on MATLAB and began to design the power system. And verify the feasibility of the model through experiments.

1. はじめに

第五世代(5G)に続く次世代移動通信システムとしての B5G あるいは 6G は、より高い周波数のミリ波帯やテラヘルツ帯電磁波の活用や、更なる高速データ伝送速度及び低遅延特性が期待されている。また、無線セル内に複数のリモートアンテナを配置し、基地局からの信号を複数のリモートアンテナに分散して通信エリアを拡大する分散アンテナシステム(DAS)や大規模 MIMO は、次世代システムにおいては更に発展し、リモートアンテナの数も大幅に増えると共に、小型化、低消費電力化が進むと考えられる。それに伴い、リモートアンテナを設置する場所も多岐に渡り、その設置場所においてアンテナ(RU)に供給する電力を、系統電力網から必ずしも得られるとは限らず、何らかの新しい給電方式を考える必要がある。

既存のリモートアンテナへの給電方式としては、系統電力網からアンテナへの現地給電が行われているが、次世代移動通信システムにおいて、より多くのアンテナが設置されるようになると、商用電源(系統電力網)からの給電が困難な場合も出てくる。

また、次世代システムにおいては、なるべく再生可能エネルギーを活用するグリーンなシステムを目指す必要もある。既存のアンテナ機器の電力は商用電源から得ているため、その再エネ導入比率は系統電力網の再エネ比率に依存する。この問題を解決するために本研究では、図1に示す自立電源とフロントホールからの給電を併用する給電方法を提案した。再エネ発電で得た電力を活用する自立電源と、一部フ

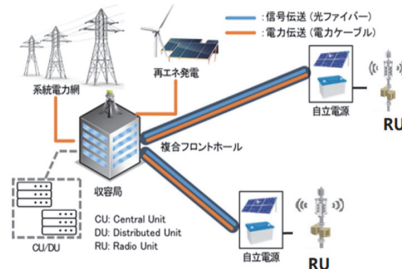


図1: 提案した電力供給方式

ロントホールからの給電を併用するシステムより、平時には再エネを最大限に活用し、そして災害時でもできるだけ長く自立運転が可能なシステムを目指す。

2. 自立電源システムの設計

本研究の自立電源では、災害時と平時の2つ場合のシナリオについて、それぞれの目標を掲げる。1 つ目の目標は平時においての再エネ比率 50%以上である。その理由は、2021 年経済産業省から発表された第 6 次エネルギー基本計画概要の通り、2030 年時点では 36-38%の再生可能エネルギー導入を目指す必要がある。従って本研究では、平時運転の再エネ比率 50%以上を目標に設定した。もう1つの目標は、「72 時間の壁」という概念に基づいて、災害時に 3 日以上電力供給持続時間を目標に設定した。以上の 2 の目

標に合わせてアンテナの性能を検討し、それに基づいて電源システムを設計する。スループットはアンテナの消費電力に影響を与えるため、実験によって測定した。その結果、アンテナの平均消費電力 50 W に基づいて、アンテナの電源システムを設計する。

電源システムを設計するためには、二つの設計事項を考える必要がある。まずは、電源の規模、つまり、蓄電池の容量とPVの定格電力である。次に蓄電池充電率(SoC)の最低保持レベルである。蓄電池電圧がそれ以下になると、フロントホールからシステムへの電力供給が開始される。そこで、MATLAB/Simulink上に構築したモデルでシミュレーションを行い、電源の規模と蓄電池最低保持電圧を決定した。

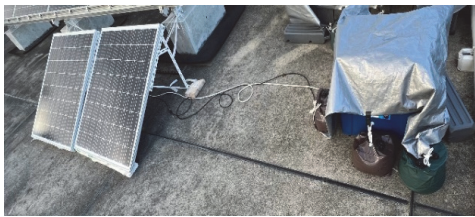


図 2: 電源システムの構築図

シミュレーションを行った結果、PV 定格電力 300 W と蓄電池容量 40 Ah の組み合わせが最適であることが分かった。また、蓄電池最低保持電圧として 52.5 V を選択した。その結果を踏まえて、図 2 に示す電源システムを構築し、実験を行った。

3. 実験による電源システムの性能評価

まず、10月に行った電力供給持続時間の実験では、初期電圧 52.5 V から始めて、蓄電池の残量がほぼ無くなる放電停止電圧の 49 V に低下するまでの時間を記録した。

複数回の測定結果では、最長電力持続時間は図 3 に示すように 7.5 日、最短時間は 0.5 日であった。3 回の測定による平均電力持続時間は約 3.7 日となった。続いて 10 月に行った再エネ比率の測定実験では、PV 発電量、DC 電源から供給された電力量、アンテナから消費された電力量をそれぞれ記録し、再エネ比率を計算した。

実験の再エネ比率の結果は 86%であった。10 月に測定したため日射量が十分あり、高い再エネ比率が得られたものと思われる。次に、12 月に行った電力供給持続時間の実験結果では、最長電力持続時間は図 4 に示すように 2.2 日、最短時間は 0.8 日であり、平均電力持続時間は約 1.3 日となった。また、12 月に行った再エネ比率の実験結果は 48%であった。

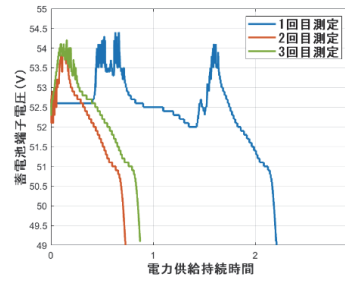


図 3: 10 月の電力持続時間の実験結果

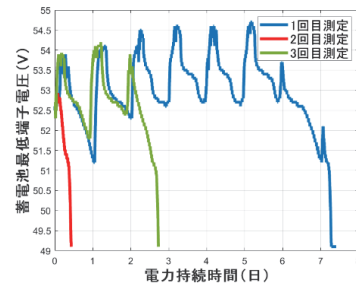


図 4: 12 月の電力持続時間の実験結果

4. まとめ

本報告では、分散型アンテナシステムにおけるリモートアンテナ(RU)のための自立電源システムの設計について検討した。再エネ発電を最大限活用する自立電源と、複合フロントホールによる收容局からの電力供給とを併用する電源システムを提案した。この電源システムの設計にあたっては、平時の再エネ比率を 50%以上、災害時など、フロントホールからの電力供給が絶たれた場合でも、リモートアンテナへの電力供給持続時間を 3 日以上とする 2 つの目標を掲げた。この 2 つの目標を同時に達成するため、シミュレーションにより電源システムを設計し、得られたシミュレーション結果に基づいて実際に実験用の電源システムを構築した。最後に設計した電源システムを評価した。

文献

- 1) Liu Ke, Yamada, Hirohito, Katsumi Iwatsuki, and Taiichi Otsuji, "A Study for Stable Operation of Battery Loaded DC Bus Based on Autonomous Cooperative Control," in 2021 6th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), pp. 1165-1168, Sep.2021
- 2) Z. Liu and P. Fan, "An Effective Handover Scheme Based on Antenna Selection in Ground-Train Distributed Antenna Systems," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 63, no. 7, pp. 3342-3350, Sept. 2014.

修士学位論文要約（令和 6 年 3 月）

ミリ波 DBF アンテナ用デジタル RF 送信機の デジタル信号処理実装に関する研究

中村 公紀

指導教員：末松 憲治

A Study on Digital Signal Processing Implementation for Millimeter-Wave DBF Antenna Digital RF Transmitter

Kouki NAKAMURA

Supervisor: Noriharu SUEMATSU

Toward the realization of a transmitter for a millimeter-wave band digital beamforming antenna mounted on a satellite, we investigated the configuration of a DBF transmitter using a direct digital RF transmitter using a 1-bit bandpass $\Delta\Sigma$ modulator based on changes in signal resolution and oversampling ratio. The effect on the output ACLR was investigated by simulation. We also confirmed the effects of changes in the number of elements and beams. When increasing by 1 bit, ACLR improves by about 6 dB. As the number of bits continues to increase, the noise caused by the $\Delta\Sigma$ modulator becomes dominant, and ACLR converges. It was found that a one-element system requires about 7 bits. Furthermore, doubling the number of elements improved ACLR by about 3 dB in the range where noise from the $\Delta\Sigma$ modulator was dominant. Furthermore, it was found that doubling the number of beams degraded the ACLR by about 6 dB.

1. 序論

現在, Beyond 5G/6G 通信システムでは, 従来の移動体通信で実現できていなかった「超カバレッジ拡張」が目指されている¹⁾. 通信の高速/大容量化, カバレッジエリアの拡大について検討がなされており, ハードウェア実装可能な, 広帯域 Q/V 帯 DBF 送信機が必要とされている. ミリ波対応, 小型化のため, 従来検討では 1 bit BP- $\Delta\Sigma$ 変調器を用いたダイレクトデジタル RF 送信機が検討されてきた²⁾.

本研究では, ミリ波 DBF アンテナ用デジタル RF 送信機の実現に必要なデジタル信号処理実装のため, 1 bit BP- $\Delta\Sigma$ 変調器を用いる場合を想定し, 信号表現に用いる bit 数と OSR の影響を明らかにすることを目的とする. DBF 演算部における信号表現の bit 数や, $\Delta\Sigma$ 変調部での OSR を変動させた場合の出力への影響, DBF 送信機とするため素子数やビーム数を変動させた場合の影響をシミュレーションによって示した. なお, 基本波 10GHz, サンプリングレートは 25GHz で固定とし, 第 3 イメージ成分の 40GHz での出力を評価する

2. 1 素子での bit 数・OSR の検討

1 素子の場合について, 信号表現の bit 数, $\Delta\Sigma$ 変調部の OSR を変動させ, 出力 ACLR への影響を確認した. ミリ波通信システムでの PA 部を除く ACLR は -35 dBc 程度が必要とされている. 本研究ではサンプリングレートを固定としており, $OSR = fs/2fb$ で求められるため,

広帯域化した場合 OSR が低下, ACLR の劣化が考えられる. また, bit 数の低下による量子化雑音の増加でも, ACLR の劣化が考えられる.

入力を QPSK, 64QAM とし, bit 数を制限(固定小数点, 3~16 bit), また OSR を 2500 から 31.25 で変動させてシミュレーションを実施した. 各 bit 数, OSR の場合の ACLR を図 1, 2 に示す. bit 数を増加させると量子化雑音が低下, 1 bit 増加するごとに ACLR は 6 dB 程度改善していることがわかる. また, bit 数をさらに増加させると $\Delta\Sigma$ 変調器による雑音が bit 数制限による雑音より大きく支配的となり, ACLR が収束していることがわかる. 今回実施したシミュレーションでは, $OSR \geq 62.5$, 7 bit 以上の場合で $ACLR < -35$ dBc を満たした.

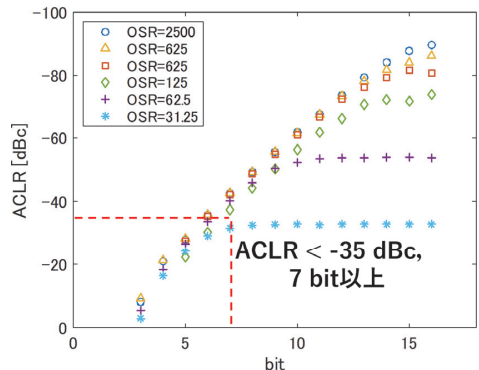


図 1 QPSK の場合の bit 数と ACLR の関係

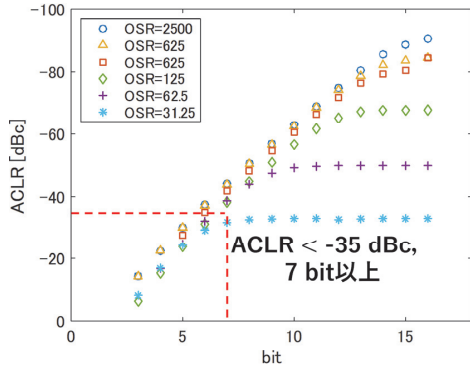


図 2 64QAM の場合の bit 数と ACLR の関係

3. n 素子 1 ビーム系での bit 数・OSR の検討

n 素子 1 ビームの場合について、第 2 章同様に bit 数, OSR を変動させながら, n を 1,2,4 として素子数増加による出力 ACLR への影響を確認した. 本研究ではアンテナ素子と送信増幅器からなるアンテナモジュールを各素子に使用する. 各モジュールの送信電力は一定であるため, トータルでの送信電力は素子数 n に比例して増加する. なお, 計算の簡略化のため, モジュールの利得は 1(0 dB) とした. 図 3 に各素子数, bit 数, OSR の場合の ACLR を示す. 先行研究より, ΔΣ 変調器部に異なる 1 bit 信号列を与え空間合成することでの雑音低減手法が提案されている³⁾. 素子数 2 倍ごとに 3 dB 程度の ACLR 改善が報告されており, 本研究でも同程度の結果が得られると予想した. 図 2 より, ACLR が収束している範囲では素子数に応じた ACLR 改善がみられたが, bit 制限によるノイズが支配的な範囲では, 各素子のノイズに位相相関性が見られ, ACLR 改善の効果が無かった. また, n=4 とすることで, OSR=31.25, 9 bit 以上の場合に ACLR の要件を満たした.

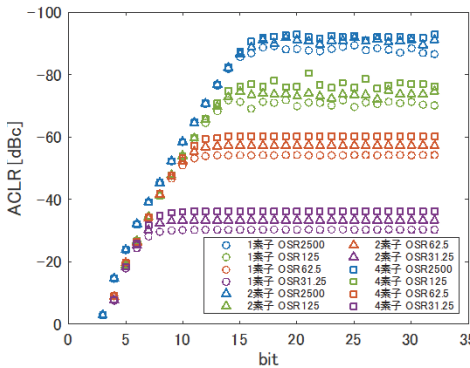


図 3 素子数を増加した場合の ACLR

4. n 素子 m ビーム系での bit 数・OSR の検討

n 素子 m ビームの場合について, 第 2, 3 章同様に bit 数, OSR を変動, また (n,m)=(2,2),(4,2),(4,4) として

ビーム数増加による出力 ACLR への影響を確認した. DBF 演算前に, 信号電圧 1/m の減衰処理を実施した. ビーム数を 2 倍に増加した場合, 1 ビーム分の信号電力は減衰処理に応じ 6 dB 程度低下, また雑音は, bit 数制限による雑音のみ, 信号と同様に低下することが確認できた. 図 4 に 4 素子 m ビームの場合の, 各 bit 数, OSR での ACLR を示す. bit 数制限によるノイズが支配的な範囲ではビーム数による変化は無く, ACLR が収束する範囲でのみ, ビーム数を 2

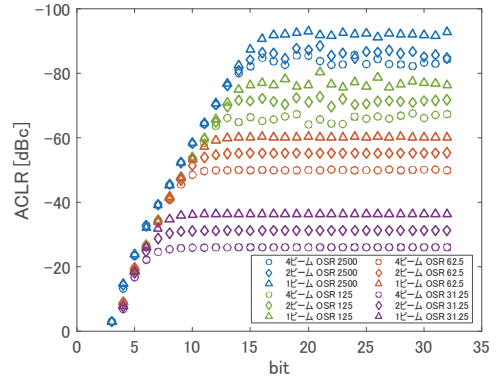


図 4 4 素子 m ビームの場合の ACLR

倍にする毎に 6 dB 程度の劣化を確認した.

5. 結論

ミリ波 DBF アンテナ用デジタル RF 送信機の実現に必要なデジタル信号処理実装のため, bit 数と OSR の影響を明らかにした. ACLR が収束する範囲において, 素子数を 2 倍とする毎に ACLR は 3 dB 程度改善, またビーム数を 2 倍とするごとに 6 dB 程度劣化することを確認した.

文献

- 1) 末松憲治, 古市朋之, 塚本悟司, “衛星搭載用 Q/V 帯ダイレクトデジタル RF DBF 送受信機構成の基礎検討,” 信学技報, vol.123, no.115, MW2023-40, pp.71-75, July 2023.
- 2) J. Zhang and N. Suematsu, "A 20GHz-Band Optical-Fiber-Feed 1-Bit Bandpass Delta-Sigma Direct Digital RF Transmitter Using First Image Component of the QSFP28 Module Output," 2022 3rd URSI Atlantic and Asia Pacific Radio Science Meeting (AT-AP-RASC), pp. 1-4, Gran Canaria, Spain, May 2022.
- 3) 田村涼, “DBF 用光ファイバ給電ダイレクトデジタル RF 送信機に関する研究,” 修士論文, 東北大学工学研究科通信工学専攻, 2020.

修士学位論文要約（令和6年3月）

プラズモニック・テラヘルツ電磁波検出素子の高性能化と
その高速テラヘルツ無線通信への応用に関する研究

成田 健一

指導教員：尾辻 泰一， 研究指導教員：佐藤 昭

Study on High Performance Terahertz Plasmonic Detectors
and their Application to High-Speed Terahertz Wireless Communication

Kenichi NARITA

Supervisor: Taiichi OTSUJI, Research Advisor: Akira SATOU

To realize a highly sensitive, fast response, room-temperature operating, and on-chip THz detector for beyond 5G wireless communication systems, the author investigated grating-gate InGaAs-channel high-electron-mobility transistors (HEMT) as terahertz (THz) plasmonic detectors. The author demonstrated that the introduction of an inverted-HEMT structure in operation of so-called three-dimensional rectification drastically improves the high-speed response. Also, it was shown that the suppression of the potential rise in the channel should result in a drastic enhancement of the scalability of the measured photoresponsivity to the active area size.

1. Introduction

Explosively growing volume of mobile data traffic due to the continuing development of the highly information-oriented society necessitates ultrahigh-speed, ultrahigh-capacity wireless communication technologies. In the next generation beyond 5G (6G/7G) wireless communication systems, THz frequency bands are assumed to be used as ultimately high-frequency radio waves. One of the key devices for realization of the THz wireless communication systems is highly sensitive, fast response, room-temperature operating, and on-chip THz detectors.

The author’s group has developed the so-called asymmetric dual-grating-gate (ADGG) THz detectors based on InGaAs-channel HEMTs as THz plasmonic detectors (Fig. 1). The GG structure with interdigitated gate fingers (G1 and G2) serves as a deep sub-wavelength grating coupler, enabling broadband, direct coupling between incident THz waves and 2D plasmons in the channel of the detector. Recently, a new way to readout the output signal from the gate electrode of the detector (gate-readout) was proposed, instead of the conventional drain-readout [1]. The gate-readout configuration enables the scaling of measured (external) photoresponsivity with size of the device active area, the impedance matching with 50-Ω high-speed interconnection systems, and a significant enhancement of the internal photoresponsivity due to the so-called 3D

rectification effect at a positive (forward) gate bias voltage (Fig. 1). The 3D rectification effect is a multiplication of the vertical diode current nonlinearity and the in-plane plasmonic hydrodynamic nonlinearity.

On the other hand, there are two critical issues of the detector. First, an unexpected long tail on the order of 100 ns after the main pulse of ~180-ps width was observed in the output photovoltage pulse waveform in the THz pulse wave detection measurements, severely restricting its fast detection response. Secondly, when a positive gate bias voltage was applied, the measured photoresponsivity did not scale with the active area size. In this paper, the author conducted the following studies to cope with these issues: (1) identification of the cause of the long tail and verification of a new device structure to remove it and (2) verification of several hypotheses that prevents the scaling of the measured photoresponsivity to the active area size.

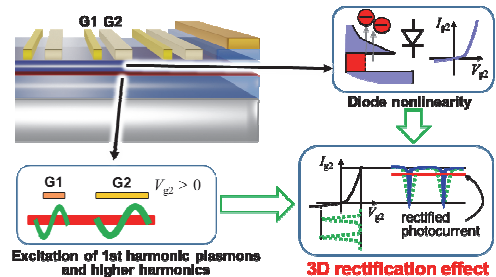


Fig. 1 A schematic view of the 3D rectification effect in an ADGG-HEMT.

2. Improvement of Detection Response

In the normal HEMT structure, there are high-density donor levels in the InAlAs carrier-supply layer for the remote doping to the InGaAs channel layer. Then, electrons in the channel can tunnel either to the conduction band in the InAlAs layers directly, or to those donor levels below the conduction band edge. In the latter case, electrons should be trapped in those levels for a long time and cause a slow pulse photoresponse, i.e., the tail waveform observed in the measurement. To confirm this hypothesis, the author examined the introduction of the inverted-HEMT structure, where the carrier-supply layer is placed below the channel layer. The author conducted a THz pulse detection measurement at 0.8 THz on the A-DGG HEMTs with the normal-HEMT and inverted-HEMT structures and with active area sizes of $20 \times 20 \mu\text{m}^2$. Figure 2 shows the measured output photovoltage waveforms for the normal-HEMT- and inverted-HEMT-based detectors. As clearly seen, the long tail appearing in the waveform for the normal-HEMT-based detector was eliminated completely in the waveform for the inverted-HEMT-based detector. This result confirms that the tail waveform is caused by the electron trapping at the donor levels in the InAlAs carrier-supply layer and can be eliminated completely by the inverted-HEMT structure. Also, the internal photoresponsivity of the normal-HEMT-based detector was estimated to be 0.49 A/W [2].

3. Scalability of Measured Photoresponsivity

To resolve the issue on the scalability of the measured photoresponsivity to the active area size, the author developed the following hypotheses: (a) nonlinear saturation of the output photovoltage for a device with the larger active area, (b) the lower yield of gate fingers in a device, and (c) potential rise in the

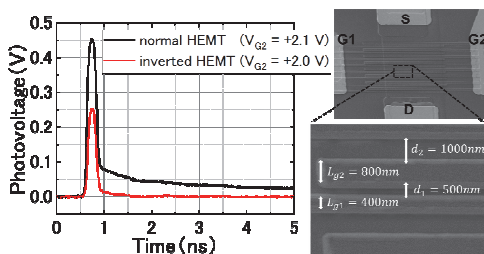


Fig. 2 Temporal waveforms of output photovoltage from normal-HEMT-based and inverted-HEMT-based detectors on the THz pulse detection measurement (inset shows a scanning-electron-microcopy image of a fabricated inverted-HEMT-based detector).

channel due to the dc current flow. To avoid (a) in the THz pulse detection measurement, the intensity of incident THz waves was reduced down to the level in the linear region for each device. To cope with (b), the author examined a single-grating-gate structure, where the patterning process of the grating-gate fingers by electron beam lithography is much simplified and the higher yield is expected. To cope with (c), the author introduced a new layout of the source (cathode) electrode in a single-grating-gate (single-grating-anode) structure to suppress the potential rise in the channel (“power-supply-reinforced” type). The THz pulse detection measurement on the newly fabricated devices showed that the photoresponsivity of the power-supply-reinforced detectors was 4 times higher than the conventional detector (Fig. 3). On the other hand, the measured photoresponsivity still did not scale with the active area size in the experiment. Then, the author conducted an electrostatic simulation of the potential rise in the channel and found that the potential rise is large even for the power-supply-reinforced detector. It was demonstrated from the simulation that the introduction of a grating-cathode electrode provides a much stronger power supply enhancement with nearly zero potential rise in the channel.

Conclusion

In conclusion, for practical use in ultrahigh-speed terahertz wireless communications, this study dramatically improved the high-speed response of grating-gate structure plasmonic detectors, and also paved the way for improving the measured photoresponsivity.

References

- 1) T. Negoro *et al.*, IRMMW-THz 2021, Chengdu, Sichuan, China, Aug 29–Sep 3, 2021.
- 2) A. Satou *et al.*, *Nanophotonics* **12**, 4283 (2023).

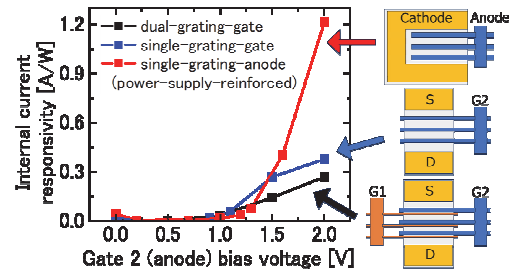


Fig. 3 Internal current responsivity vs. gate 2 (anode) bias voltage for detectors with a dual-grating-gate structure, a single-grating-gate structure, and a single-grating-anode structure (power-supply-reinforced structure).

修士学位論文要約（令和6年3月）

高スループット暗号ハードウェアに対するサイドチャネル解析に関する研究

東 哲平

指導教員：本間 尚文， 研究指導教員：上野 嶺

A Study on Side-Channel Attacks for Unrolled Implementation of Block Ciphers Tepei HIGASHI

Supervisor: Naofumi HOMMA, Research Advisor: Rei UENO

This paper presents a theoretical study of differential attacks used in correlation power analysis (CPA) for unrolled cryptographic implementations. Conventional CPA methods for loop implementations are not applicable to unrolled implementations. Therefore, a method to perform CPA from leakage using differential attacks has been proposed. In this paper, we theoretically investigate the lower bound of the number of required waveforms by performing a differential attack corresponding to CPA for unrolled implementations.

Furthermore, this paper investigates how many rounds of attacks are practically possible, and discusses how many rounds of leakage countermeasures are effective as CPA countermeasures. As a result, we could theoretically show that SCA is attackable by the third round in an unrolled implementation of AES.

1. はじめに

暗号技術は秘密情報を安全に保管するために開発されてきた。秘密情報が第三者の攻撃者に晒されるということは大きな問題であり、これを防ぐためにも暗号技術は強固なものでなければならない。このような背景がある中、暗号モジュールに対して漏えい電磁波などの副次的な物理的情報(サイドチャネル情報)を観測・解析することで、内部の秘密情報を抽出するサイドチャネル解析(SCA:Side-Channel Analysis)の脅威が指摘されている。SCAは比較的安価な機材で攻撃が可能であることから、攻撃の検知が難しく、現実的に実行可能な暗号解析手法のひとつとして知られている。

2. ブロック暗号ハードウェアの実装方法とSCA

ブロック暗号は共通鍵暗号の一種で、固定長のデータブロックを単位として処理する暗号の総称である。これに対してビット単位やバイト単位で処理を行う暗号はストリーム暗号と呼ばれる。加えてブロック暗号ではパイプライン化することで高いスループットとエネルギー効率を達成できることも知られている。しかしアンロールド実装においては、回路全体にSCA対策を施すのは極めて高コストとなるため、SCA対策を施すべきラウンドを明確にすることがコスト削減と安全性の両立には不可欠である。

SCAは、計算内容に関連して発生する物理情報を利用した攻撃である。SCAの一つに予想される電力量と実際の電力量の相関係数を利用する相関解析(CPA: Correlation Power Analysis)がある。以降では

CPAをSCAの代表として扱う。

従来のアンロールド実装のブロック暗号へ施されていたSCA対策は、データ攪拌が進んだ中間ラウンドの推定電力を算出するのは困難なことからデータ攪拌が進んでいない第一ラウンド、暗号文から逆算が可能な最終ラウンドにのみ行われており、中間ラウンドにはSCA対策を施さずに対策完了とすることが一般的であった。しかし2019年にYli-Mäyryらが第1ラウンドの推定電力値と、データ攪拌が不完全な中間ラウンドの電力値に相関があることを利用し、漏えい対策がされていないラウンドの消費電力と第1ラウンドの推定電力値の相関を取ることで鍵値を特定した^[1,2]。これによって中間ラウンドからの漏えい電力からも鍵値特定の危険性が指摘されており、どのラウンドまで漏えい対策を施す必要があるかの検証が求められていた。

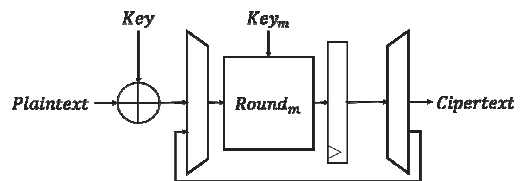


図1 ループ実装のブロック暗号

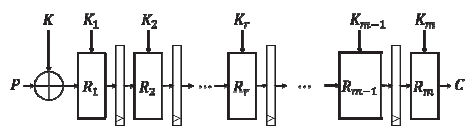


図2 アンロールド実装のブロック暗号

3. アンロールド実装への SCA の攻撃能力評価

まず SCA の攻撃では 2 つの平文を連続で入力し、そこから測定される消費電力と予測される消費電力の関係から鍵値を特定する。消費電力の予測には 2 つの値の Hamming Distance (HD) を用いる。ここで SCA の通信路を入力→出力→出力から得られる HD→消費電力波形のような通信路としておくとこれらの流れはマルコフ連鎖として捉えられる。データ処理不等式により入力を得られている状態で出力や出力から得られる HD から得られる情報量は、消費電力波形から得られる情報量よりも必ず多くなることが数学的に保証される。そこで出力や出力から得られる HD を用いて暗号解析を行い、鍵値が特定できるかを検証する。この実験で鍵値が特定できなかった場合はより情報量の少ない消費電力波形を用いても鍵値の特定は不可能であり、この場合は安全であるといえる。このようにして攻撃可能性のあるラウンドを数学的に特定することができる。

4. 実験

今回は実験 1：直接の出力値を用いた鍵値の特定、実験 2：出力値を電力モデルに変換した擬似的な SCA、出力 3：実際の波形を用いた SCA の 3 つを行った。条件は図 3 に示す。攻撃対象は世界的に用いられているブロック暗号である AES を対象とした。

まず実験 1 では各バイトにおいて入力差分に対して総当たりの調査を行い、出力差分の数値の出現回数を調べた。平文対は最大 1,000,000 対を用い、この条件で鍵値が特定できなかった場合は現実的に鍵値が特定できないとして鍵値特定不可と扱った。次に実験 2 では実際の波形を用いて SCA を行う前にまず、使用する波形データをシミュレーションによって算出された HD 値を用いた実験を行った。HD 値を用いることで測定時に観測されるノイズを考慮しない、純粋な漏えい電力値での SCA 結果を得ることができる。シミュレーションで HD 値を算出するためには差分解読で用いたような明確な出力値が必要であるので、出力値を得られる状態でより SCA の環境に近づけた実験といえる。攻撃対象ラウンドは差分解読によって攻撃可能性が示された第 2 ラウンド、第 3 ラウンドを対象とした。そして実験 3 では実験 1、2 で推測された攻撃ラウンドが実際に攻撃可能であるか確かめるために測定した波形を用いて SCA を行った。

実験結果を図 4 に示した。

	SCA で用いる値	
	推定値	出力値
実験 1	直接の出力	直接の出力
実験 2	電力モデル HD	電力モデル HD
実験 3	電力モデル HD	測定電力

図 3 実験で用いた条件

	2R	3R	4R
実験 1	500	80000	不可
実験 2	2000	100000	不可
実験 3	160000	不可	不可

図 4 実験結果

5. まとめ

本稿ではブロック暗号の概要と、SCA について述べた。また漏えい対策をそのラウンドまで施すべきか明確にする必要があることを説明した。この問題を解決するために数学的な SCA の攻撃評価の考えを説明し、それに基づいた実験を提案した。実験の結果アンロールド実装に対する SCA においても第 2、第 3 ラウンドでは攻撃に成功する可能性があり、第 4 ラウンドでは安全であることが証明された。

今後の展望として同じブロック暗号であり、漏えいがより確認しやすい軽量暗号 PRINCE などの他の暗号アルゴリズムに対して同様の実験を行い、評価を行うことが挙げられる。

文献

- 1) V. Yli-Mäyry, R. Ueno, N. Miura, M. Nagata, S. Bhasin, Y. Mathieu, T. Graba, J.-L. Danger, and N. Homma, “Diffusional side-channel leakage from unrolled lightweight block ciphers: a case study of power analysis on prince,” IEEE Transactions on Information Forensics and Security, vol. 16, pp. 1351–1364, 2020.
- 2) 中嶋彩乃, 上野嶺, and 本間尚文, “アンロールド実装された aes ハードウェア特有のサイドチャネル情報漏洩の評価,” 電子情報通信学会技術研究報告; 信学技報, vol.121, no. 413, pp. 135–140, 2022.
- 3) V. Rijmen and J. Daemen, “Advanced encryption standard,” Proceedings of federal information processing standards publications, national institute of standards and technology, vol. 19, p. 22, 2001.

修士学位論文要約（令和6年3月）

機械学習を用いた上りリンク通信方式選択手法に関する研究

福士 凜人

指導教員：西山 大樹

A Study on Uplink Communication Scheme Selection Technique Using Machine Learning

Rinto FUKUSHI

Supervisor: Hiroki NISHIYAMA

Recently, a communication method called non-orthogonal multiple access (NOMA), which has higher frequency utilization efficiency than the conventional orthogonal multiple access (OMA) and can achieve higher rates, is attracting attention. Furthermore, NOMA with cooperative successive interference cancellation (SIC) is attracting attention as a technology that can better demonstrate the performance of NOMA under inter-cell interference. In this study, we consider an uplink communication system that allows the selection of NOMA with cooperative SIC or traditional OMA as a communication method. However, there is a challenge in achieving a higher rate than the conventional OMA, as NOMA with cooperative SIC may experience a decrease in rate, making it not necessarily guaranteed to achieve higher rates than the traditional OMA. In addition, if the rate of each communication scheme is calculated before selecting a communication scheme, the communication scheme with a higher rate will change in the meantime, so it is necessary to select a communication scheme that can achieve a higher rate within a shorter time. In this study, we propose a method for selecting a communication scheme that can achieve a high rate using machine learning to select a communication scheme within a shorter time. Finally, we evaluate the effectiveness of the proposed method by computer simulations.

1. Introduction

Recently, as the number of Internet of Things (IoT) devices has been increasing, there is a growing demand for communications utilizing radio frequency efficiently. Non-orthogonal multiple access (NOMA) is a promising scheme for realizing this [1]. Different from the conventional orthogonal multiple access (OMA), NOMA can accommodate more users through the allocation of non-orthogonal resources, specifically in the form of power domains. The superimposed signals in the power domain can be decoded and separated using successive interference cancellation (SIC). Furthermore, NOMA with cooperative SIC, in which SIC is performed cooperatively among base stations (BSs) under inter-cell interference is attracting attention as a technology that can better demonstrate the performance of NOMA under inter-cell interference [2]. However, while NOMA with cooperative SIC exhibits high-frequency utilization efficiency, there are instances where rates are diminished due to inter-cell interference. Therefore, this study implements an uplink communication system capable of switching between NOMA with cooperative SIC and OMA as a communication method. Furthermore, to a-

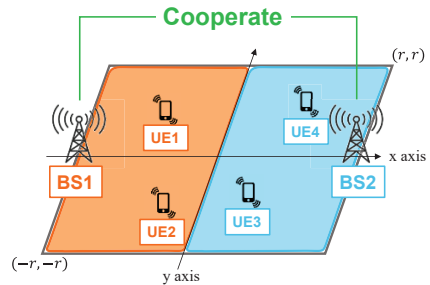


Fig. 1 System model.

chieve real-time control, we use machine learning to select a communication scheme that can achieve a high rate within a shorter time.

2. System Model

As shown in Fig 1, we consider the uplink communication between two base stations (BSs) and four user equipments (UEs). The UE sends signals to the accommodating BS. The BS acquires the signal of the UEs to be accommodated. The BS also allocates radio resources for the UEs and cooperates with the other BS for interference cancellation.

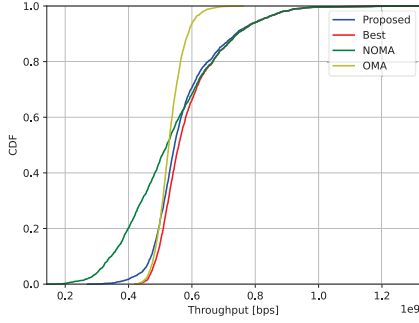


Fig. 2 Comparison in the minimum rate.

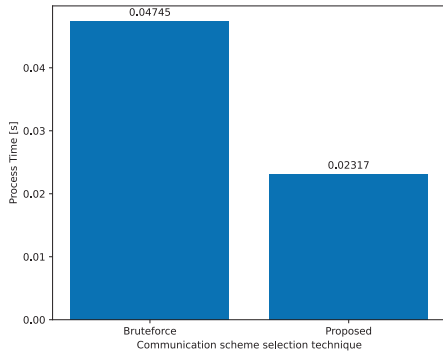


Fig. 3 Comparison in computational time.

3. Challenging Issue

There are two primary scenarios where the rate of NOMA with SIC decreases. Firstly, when the difference in radio attenuation among UEs performing NOMA is so slight that distinguishing power becomes challenging, it hinders the performance of NOMA. The second scenario occurs when BSs cannot collaborate effectively for cooperative SIC due to the order in which SIC is executed. However, determining whether the rate of NOMA with cooperative SIC is reduced in these cases is challenging without actually calculating the rates achieved by OMA and NOMA with cooperative SIC.

In the system that allows the selection of the communication scheme assumed in this study, we would like to select a communication scheme that can always achieve a high rate. Still, suppose the rate of the NOMA with cooperative SIC decreases due to these cases. In that case, we cannot know whether the rate achieved by OMA or NOMA with cooperative SIC is higher without actually calculating the rate achieved by each method.

4. Proposed Method

In this research, we propose a communication method selection technique that uses a support vector machine (SVM) to select either NOMA with cooperative SIC or OMA. SVM is a supervised learning method that performs class classification based on input features. The input is attenuations of all links from each UE to each BS, and the SVM model predicts whether the communication method with a higher rate is OMA or NOMA with cooperative SIC. This method can be performed quickly without estimating the expected rates at the UEs. SVM is trained in advance, which requires training data. The training data consists of a set of data with the amount of attenuations of all links from each UE to each BS to be used as input, a pre-calculated communication scheme that can achieve a higher minimum rate at that amount of attenuation, as the class of the correct answer.

5. Simulation Results

The simulation result is shown in Fig. 2. This indicates that the proposed method allows for the selection of a high-rate communication scheme. Moreover, Fig. 3 shows that the computation time for selecting the communication scheme and resource allocation has also been reduced.

6. Conclusion

This study proposed a communication scheme selection technique using SVM, which chooses whether NOMA with cooperative SIC or the conventional OMA to achieve a higher rate even under inter-cell interference. This work was supported in part by the Japan Society for the Promotion of Science KAKENHI under Grant No. JP20K11785.

References

- 1) M. S. Ali, H. Tabassum, and E. Hossain, "Dynamic User Clustering and Power Allocation for Uplink and Downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) Systems," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 6325-6343, Aug. 2016.
- 2) Mio Nakamura and Hiroki Nishiyama, "Potential of Cooperative SIC for Uplink NOMA in Multi-Cell Network," *IEICE Communications Express*, vol. 11, no. 8, pp. 497-502, Aug. 2022.

修士学位論文要約（令和6年3月）

空中基地局を利用した公平な上りリンク通信のための
速度制御手法と帯域割当手法に関する研究

三井 周

指導教員：西山 大樹

A Study on Speed-Control and Bandwidth Allocation Methods for Achieving
Fair Uplink Communications Using an Aerial Base Station

Shu MITSUI

Supervisor: Hiroki NISHIYAMA

Unmanned aerial vehicle (UAV) base stations have a variety of applications due to their quickly deployment regardless of road conditions. They provide a promising solution when existing terrestrial networks are damaged during a disaster and network connectivity is lost, helping to restore connectivity in disaster-affected areas. However, moving UAVs provide unfair network connectivity for ground-based user equipment. To solve this, we need to develop the speed control method and the bandwidth allocation method. Therefore, we show the algorithms further improving fairness. Finally, we use computer simulations to demonstrate their effectiveness.

1. Introduction

Terrestrial communication infrastructures may be damaged during a disaster, rendering them unable to provide network connectivity to victims. To address this issue, a potential solution is to use unmanned aerial vehicles (UAVs) as temporary aerial base stations.

In a disaster scenario, all victims must have stable network connectivity to share their information and to receive immediate rescue. So, fairness in communication is more important than usual situations. Therefore, in this study, we consider providing fair communications by UAVs.

2. Unfairness issue

There are three causes of lack of fairness. The first is the uneven spatial distribution of user equipments (UEs). The amount of data for each UE in areas where UE distribution density is large is less than that in area where that is small. To solve this, we need to develop the speed control method depending on the UE distribution density. The second is the difference in the communication range. Since the UAV's coverage is round shape, the UEs far away from the UAV's orbit has less opportunity than other UEs. The third is the difference in the communication distance. So, second and third causes depends on each UE's position, and we need to develop the bandwidth allocation

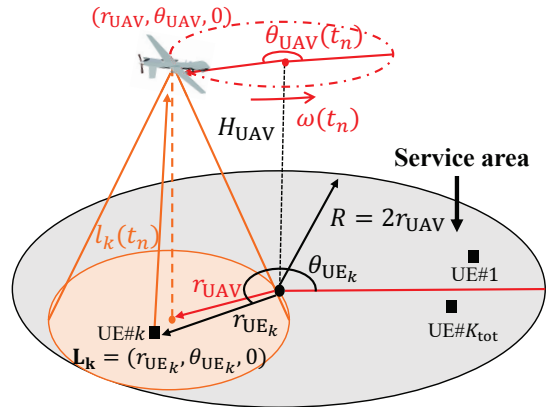


Fig. 1 System model.

method to mitigate this unfairness.

3. System model

As shown in Fig. 1, we assume the situation where a UAV-aided base station is flying in the circular trajectory and collecting data from ground-based UEs. The UAV flies at a fixed radius, altitude, and turn period. The UEs are fixed. The connection between the UAV and UEs is established using orthogonal frequency division multiple access (OFDMA). In this system, the bandwidth is divided into multiple subchannels.

4. Speed control method

Firstly, we quantify the unfairness caused by the uneven spatial distribution of UEs. We introduce the average minute amount of transmitted data, which means that the average amount of transmitted data by UEs when the UAV flies in the minute length. Then, we calculate the angular velocity at each turn angle which equalizes the average minute amount of transmitted data at all turn angles. If the angular velocity at each turn angle does not meet the speed limit, we adjust that to meet the speed limit. Finally, we calculate the angular velocity at each time based on the angular velocity at each turn angle.

5. Bandwidth allocation method

Firstly, we quantify the unfairness caused by each UE's position. We use the amount of transmitted data when the bandwidth is allocated equally. We call this "the assumed amount of transmitted data." Then, we introduce "the ideal bandwidth," which is determined by the inverse ratio of the assumed amount of transmitted data. Finally, we allocate subchannels in a manner that ensures the bandwidth for each UE closely approximates the ideal bandwidth.

6. Performance evaluation

We conducted computer simulations to evaluate the performance of our method. The UE distribution is set as shown in Fig. 2. We prepare four comparative methods. In Constant, the flying speed is always constant, and the bandwidth is allocated equally. In Only-Speed, the flying speed is determined by our speed control method, and the bandwidth is allocated equally. In Only-Band, the flying speed is always constant, and the bandwidth is allocated using our bandwidth allocation method. Speed & Band uses both proposed methods. The simulation result is shown in Fig. 3. This indicates that our methods improve the fairness among UEs, and the integrated method has the highest performance.

7. Conclusion

This study proposes a speed control method and a bandwidth allocation method to improve fairness among UEs in communication in a scenario where the UAV is employed as a flying base station to collect information from ground based UEs. The results can be attributed to establishing fair uplink communication systems using an aerial base station. This work was supported in part by the Japan Society for the

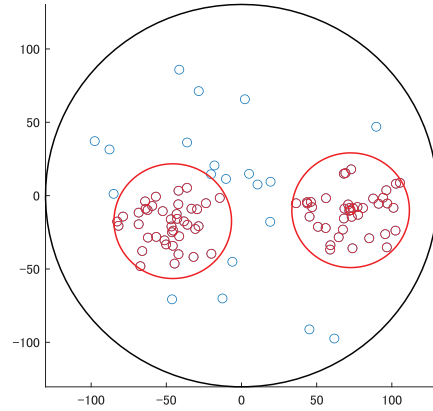


Fig. 2 An example of UE distribution.

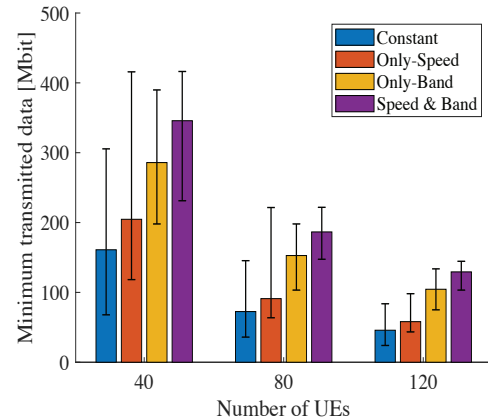


Fig. 3 The minimum amount of transmitted data.

supported in part by the Japan Society for the Promotion of Science KAKENHI under Grant No. JP20K11785.

References

- 1) G. Tajima and H. Nishiyama, "Fairness-aware Resource Allocation Technique for UAV-aided Information Collection System in a Disaster," *IEICE Communications Express*, vol. 11, no. 8, pp. 474-479, Aug. 2022.
- 2) Y. Fu, D. Li, Q. Tang, and S. Zhou, "Joint Speed and Bandwidth Optimized Strategy of UAV-Assisted Data Collection in Post-Disaster Areas," *2022 20th Mediterranean Communication and Computer Networking Conference (MedComNet)*, Jun. 2022, pp. 39-42.

修士学位論文要約（令和6年3月）

周期構造リング型光共振器による導波モード共鳴現象に関する研究

室岡 宏彌

指導教員：山田 博仁， 研究指導教員：Truong Hoang Anh

Research on waveguide mode resonance phenomena
in periodically structured ring optical resonators

Koya MUROOKA

Supervisor: Hirohito YAMADA, Research Advisor: Hoang Anh TRUONG

Optical resonators are used in many applications because of their potentially high Q-value, low energy-loss structures, and wavelength selectivity properties. This thesis demonstrates a nano-grating ring resonator (NGRR) to realize a guide mode resonance (GMR) with concentric electromagnetic-field distributions and controllable Q factors at the resonance modes. The NGRR was built based on a Si-microring Resonator (MRR) with diffraction grating structures. To study the mechanism of GMR modes in NGRR, the parameters of ring radius, ring width, and grating period were modified. A Q factor of 130,000 at the GMR resonance wavelength of 1.31 μm (circumferential mode number: 0) was achieved when the grating period was 0.616 μm , and the ring radius was 5.1 μm . In addition, structures of bus waveguide with grating structures were studied to achieve higher Q factor than that with the conventional straight bus waveguide. Finally, the NGRR was fabricated on SOI substrates using micromachining process using an electron beam lithography and an etching process.

1. はじめに

近年、情報通信、環境センシング、医療検出など様々な分野で集積型光デバイスが開発されている[1]。それぞれの用途において、偏光、波長特性、光損失などの光学特性を制御することが必要である。数ある光デバイスの中でも光共振器は、高い Q 値、低エネルギー損失構造、波長選択性などの特性を持つ可能性があるため、多くの用途で使用されている。光は一般に、Whispering Gallery Mode (WGM)と導波モード共鳴 (GMR) で伝搬する[2]。GMR は、共振スペクトルの線幅が非常に鋭く、Q 値が高いなどの利点がある[3]。GMR を用いて共振モードや光学特性を制御し、高性能な波長選択性・低損失キャビティを実現することで、通信やバイオセンシングへの応用を高める研究が行われている。本論文では、周期構造リング型光共振器(NGRR)を用いることにより、同心円状光モードを得られることが明らかにし、NGRRにおける光学特性およびその高Q値モードのメカニズムについて解明する。

2. 構造と解析方法

NGRRは回折格子構造を持つSiマイクロリング共振器(MRR)に基づいて作製されており、周期的に繰り返される側壁回折格子が構築されている(図1)。基盤がSiO₂($n_{\text{SiO}_2}=3.45$)で、共振器はSi($n_{\text{Si}}=1.45$)で構成されている。半径を5.1 μm 、 a と b は0.616 μm 、 w を0.50 μm とした。モデルの設計にはMATLABのGDS Photonics Toolboxを使用した。共振特性解析には有限差分時間

領域 (FDTD)法 (R-Soft Photonics CAD Suite 2021)を使用した。また、計算時間を短縮するために3次元構造を2次元構造に近似して解析を行った。その際、実効屈折率の計算には有限要素 (FEM)法を用いた。

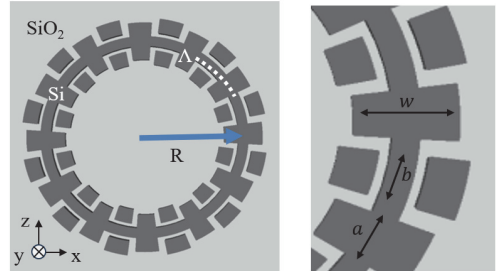


図1 提案する周期構造リング型光共振器の概要図

3. NGRRにおける共振特性の解析結果

NGRRにおける透過スペクトルとモードプロファイルの光学特性についてFDTD法を用いて調査を行った。NGRRでは共振波長ごとに異なる同心円状光モードが観測される。円周モード番号0の最大Q値は130,000であった。この結果は、MRRと比較して15倍も高い値である。また、回折格子の周期を変化させるとそれに比例して共振波長が変化することが分かった。NGRRの半径を変化させることにより、同心円状光モードとQ値が第一ベッセル関数によって記述可能であることが分かった(図2)。

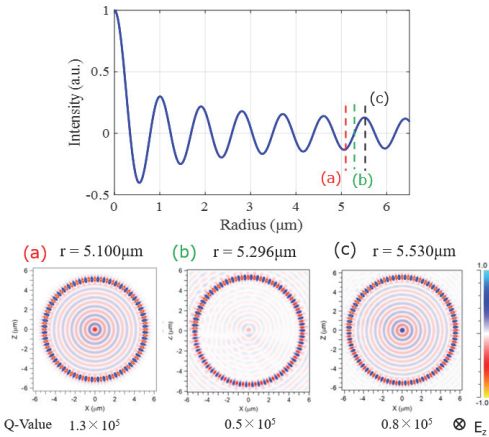


図 2 リング半径における Q 値と同心円状光モードの変化

4. NGRR の実用デバイス構造解析

実用化に向けて NGRR に光を入出力する機構が必要である。そこでバス導波路を作製し、FDTD 法による共振特性の解析を行った。本論文では、NGRR のような回折格子をバス導波路に挿入した構造を提案し、従来の矩形状バス導波路との比較を行った。解析の結果、従来のバス導波路では Drop Port における振幅ノイズにより共振ピークがほとんど観測できなかったのに対し、回折格子を挿入した構造では出力スペクトル強度が高く、ノイズもほとんどないことが分かった(図 3)。このときの Q 値は 47,000 であり、共振器のみの Q 値の半分以下であった。また、バス導波路結合部の回折格子構造が NGRR と等しい場合、Q 値が高くなる傾向が見られた。結合率については MRR と従来のバス導波路の結合率と、NGRR と回折格子を挿入したバス導波路の結合率はほとんど等しい値であった。

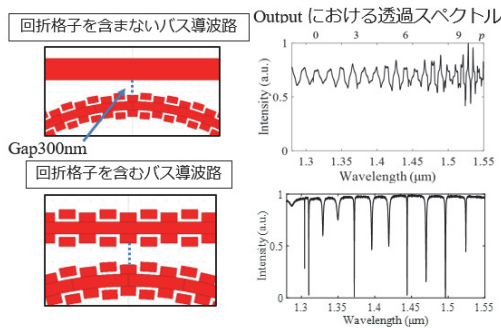


図 3 バス導波路の構造における透過スペクトル

2 次元 FDTD 法での解析では厚さ方向が均一の物質として計算される。本構造では同心円状光モードが発生するが、3 次元構造では光が散乱して同心円状光モードが出現しない可能性がある。そこで NGRR 共振器内部に Si 薄膜を挿入した構造を提案し、3 次元 FDTD での解析を行った。その結果、同心円状光モードの出現を確認できた。

5. 実用 NGRR チップの試作

電子ビームリソグラフィとエッチングプロセスを用いた微細加工プロセスにより NGRR を SOI 基板上に作製した。チップは MATLAB を用いて設計した。電子ビーム条件を最適化する結果、回折格子の作製に成功できた。しかし、設計通りに周期的回折格子がまだ形成されなかった、今後、加工プロセス(レジスト塗布、電子ビーム描画など)を最適化することは課題として研究されている。

6. まとめ

本論文では、周期構造リング型光共振器を提案し、同心円状モードが形成するメカニズムを検証した。シミュレーションの FDTD 法を用いて、同心円状モードを生成するための共振器の半径および回折周期などの条件を検証し、高 Q 値 (130,000) 共振器を得られた。共振モードでは、光がリング円周方向へ伝搬しながら、中心対称性を持つ同心円状光モードを生成する。実用に向けた光デバイスを作製するため、バス導波路の構造を検証した。そこで、従来のバス導波路と比べて、回折格子を有するバス導波路はモード損失を低減でき、共振モードでの高い Q 値を得られた。最後に周期構造リング型光共振器の試作を実施した。本研究で得られた結果、高い Q 値光デバイスの新しい共振モードを有する新構造として、光通信およびバイオセンシングの発展に寄与することを期待できる。

文献

[1] Wolfgang Sohler, Richard De La Rue, Integrated optics – new material platforms, devices and applications, Laser Photonics, 6, 4, A21–A22 (2012)
 [2] S. S. Wang, R. Magnusson, “Theory and applications of guided-mode resonance filters” Appl. Opt. 1993, 32, 2606.
 [3] Y. Ohtera, S. Iijima, H. Yamada: Guided-mode resonance in curved grating structures, Opt. Lett. 36, 1689–1691 (2011).

修士学位論文要約（令和 6 年 3 月）

InP 系光電子融合ダブルミキサトランジスタの高周波動作化とその光-テラヘルツ帯キャリア周波数下方変換応用に関する研究

渡邊 光貴

指導教員：尾辻 泰一， 研究指導教員：佐藤 昭

Study on High-Frequency Operation of InP-Based Optoelectronic Double-Mixer Transistors and their Application to Optical-to-THz Carrier Frequency Down-Conversion

Mitsuki WATANABE

Supervisor: Taiichi OTSUJI, Research Advisor: Akira SATOU

For future beyond 5G (B5G) communication networks that require full-coherent convergence between optical and wireless links, the unitraveling-carrier-photodiode-integrated high-electron-mobility transistor (UTC-PD-integrated HEMT) has been developed as a carrier frequency down-converter that converts optical data signals to millimeter-wave/terahertz (MMW/THz) data signals and further down to the intermediate frequency band. In this paper, the author developed a device model of the UTC-PD-integrated HEMT aiming at the operation frequency up to the 300-GHz band as the final goal, conducted a 300-GHz-band double-mixing measurement for the fabricated devices, and clarified issues towards realization of the 300-GHz-band operation.

1. Introduction

One of the key devices for realization of the B5G full-coherent transmission¹⁾ is an efficient carrier frequency down-converter from 1.5- μm optical data signals to MMW/THz wireless data signals. The author's group has developed an InP-based HEMT with integration of the UTC-PD structure onto its source side (UTC-PD-integrated HEMT, see Fig. 1) as a carrier frequency down-converter²⁾. The UTC-PD-integrated HEMT performs the so-called photonic double-mixing, which comprises two mixing functionalities: a usual photomixing of an optically coded carrier signal and an optical subcarrier signal to generate the difference-frequency beat-note data signal, and a RF mixing of the beat-note signal and an RF local oscillator (RF-LO) signal to generate an intermediate

frequency (IF) data signal. The author's group has succeeded in dramatical enhancement on the double-mixing conversion gain at the 120-GHz band^{2, 3)} and has demonstrated a prospect to achieve the conversion gain of -30 dB, required for the full-coherent transmission systems. On the other hand, since use of 300-GHz-band carrier frequencies is planned in 6G, the operating frequency of the UTC-PD-integrated HEMT must be extended up to the 300-GHz band. In this study, to achieve the operating frequency of the UTC-PD-integrated HEMT up to the 300-GHz band as the final goal, the author developed a device model for the UTC-PD-integrated HEMT and conducted its verification by device fabrication and performance evaluation.

2. UTC-PD integrated HEMT Design Guideline

The author discussed about the cutoff frequencies of the UTC-PD and HEMT separately. As for the UTC-PD, a simplified model for its cutoff frequency and output intensity was developed, and the principles to determine several key geometrical parameters to optimize the cutoff frequency were set; the photoabsorption layer thickness should be reduced to achieve the higher cutoff frequency at a sacrifice of a certain level of degradation of the photoabsorption efficiency (i.e., the output intensity), while the carrier-collection layer thickness should be optimized to

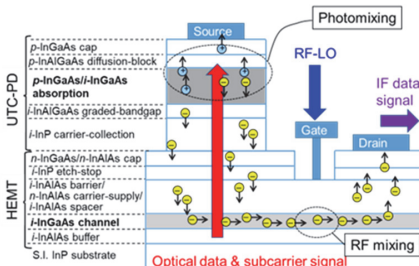


Fig.1 A schematic view of the UTC-PD-integrated HEMT.

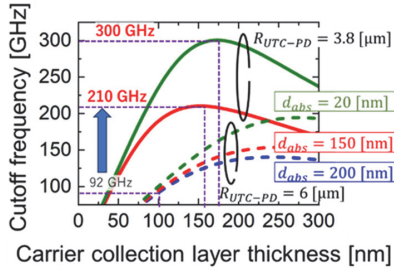


Fig.2 Dependences of the UTC-PD cutoff frequency on device geometrical/material parameters.

balance the electron transit time and RC time constant in there. In addition, the author's group introduced the Gaussian-shaped doping⁴⁾ in the photoabsorption layer and an intermediate n-type doping⁵⁾ in the carrier-collection layer, either of which maximizes the electron transit time in each layer due to the fine-tuned built-in field. Using the developed model, the author calculated the dependences of the UTC-PD cutoff frequency on the device geometrical/material parameters (Fig. 2). It was found that the cutoff frequency of 300 GHz can be achieved only with the photoabsorption layer thickness of less than 20 nm and the active-area diameter of less than 3.8 μm , at a sacrifice of the output intensity (i.e., conversion gain) dropped down by more than two orders of magnitude. This means that achieving a cutoff frequency above 300 GHz with the conversion gain more than -30 dB is impossible with the current design constraints assuming the device structure and material systems under consideration. To achieve the cutoff frequency above 300 GHz, employment of a new device structure and/or a material system are/is necessary, e.g., a guided-mode-resonance structure⁶⁾ that can enhance the photoabsorption efficiency even with a thin absorption layer.

Therefore, the author set the target cutoff frequency of this study to be 210 GHz, which can be achieved by employing the current device structure and material systems, with the photoabsorption layer thickness of 150 nm and the carrier-collection layer thickness of 160 nm. As for the HEMT, the gate length of 100 nm adapted in the previous studies^{2,3)} was kept as was.

3. 300 GHz Double Mixing Experiment

The author developed a 300-GHz-band double-mixing measurement system and conducted a double-mixing measurement on fabricated devices with the UTC-PD active-area diameter of 10 μm . A measured frequency characteristic of the double-mixing conversion gain of a fabricated device with simultaneously varying the input optical difference

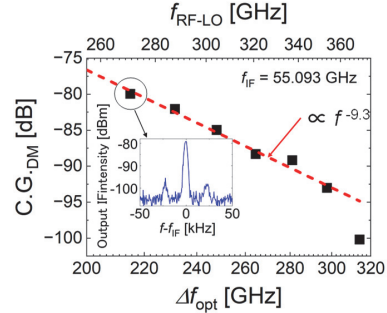


Fig.3 A measured frequency characteristic of the double-mixing conversion gain of a fabricated UTC-PD (the inset shows a typical measured spectrum of output IF signal).

frequency and RF-LO signal frequency is shown in Fig. 3. As shown in Fig. 3, the characteristic is roughly proportional to the frequency to the power of -9 , showing a steeper roll-off than expected from the roll-off characteristics. This discrepancy could be associated with the current leakage observed in the I-V characteristics, as well as a leakage of the RF-LO signal into the thick InP substrate. An estimated cutoff frequency from extrapolation of measured double-mixing conversion gains in the 120-GHz and 300-GHz bands was around 135 GHz, while a cutoff frequency estimated from the simplified model mentioned above was 56.6 GHz. This discrepancy comes from inaccuracies of the device model, estimation method using measured data, and/or device fabrication processes, which needs to be improved in the future.

4. Conclusion

The author clarified issues for realization of high-frequency operation of the UTC-PD-integrated HEMT as a carrier frequency down-converter up to the 300-GHz band and took a step toward establishing a foundation of the device design principles for high-frequency operation of the UTC-PD-integrated HEMT.

References

- 1) K. Iwatsuki *et al.*, Proc. SPIE 9387, vol. 93870J, pp. 93870J-1-8, 2015.
- 2) A. Satou *et al.*, J. Lightwave Technol., vol. 39, no. 10, pp. 3341-3349, 15 May. 2021.
- 3) T.-T. Lin *et al.*, IEEE MWP 2023, Nanjing, China, Oct. 15-18, 2023.
- 4) L. Guo *et al.*, Chinese Optics Letters, vol. 10, pp. S12301 1-4, 2012.
- 5) J.-M. Wun *et al.*, J. Lightwave Technol., vol.34, no. 4, pp.1387-1396, 2016.
- 6) R. Kojima *et al.*, TeraTech-2023, vol. 1, pp. 132-133, 2023.

修士学位論文要約（令和6年3月）

混合変調半導体レーザーの周波数チャープ特性に関する研究

浅見 昇輝

指導教員：八坂 洋

Study on Modulation Chirp Characteristics
of Hybrid Modulation Semiconductor Laser

Shoki ASAMI

Supervisor: Hiroshi YASAKA

In this study, the negative chirp operation of a hybrid modulation laser diode (HMLD) was numerically analyzed during operation with non-return-to-zero (NRZ) dynamic signals. I confirmed that the dispersion tolerance of the optical signal generated from the HMLD could be increased drastically by introducing time delay to the modulation signals applied to the gain and intra-cavity loss modulation sections. I confirmed that the dispersion tolerance can be improved up to around 40 Gbps. By reducing reflectance of the facet of ICLM region to shorten the photon lifetime, we confirm that transmission characteristics exceed those of the EA-DFB-LD for SMF transmissions distance of more than 500 m even for the higher bit rate signal of 100 Gbps.

1. はじめに

短距離高速光通信システムの大容量化に向け、半導体レーザー光源高速化の研究が進められているが、光ファイバ伝送時の群速度分散による波形劣化が課題である¹⁾。近年、半導体レーザーに電界吸収(EA: ElectroAbsorption)型変調器を集積して負チャープ動作させ、分散の抑制を図る手法が検討されているが、高い逆バイアス電圧を印加する必要があるため出力が小さくなってしまふ。この問題を解決する半導体レーザー光源として、直接電流変調方式と共振器内部損失変調(ICLM: Intra-Cavity Loss Modulation)を同時に行う混合変調半導体レーザーが提案されており、10 Gbps NRZ 信号での動作条件下において、20 km 以上の SMF 伝送で明瞭なアイ開口が確認できたことが報告されている²⁾。本研究では、混合変調半導体レーザーの更なる高速大振幅 NRZ 変調信号入力時における SMF 伝送時の分散耐性を数値解析することで、チャープ特性の検証を行った。

2. 混合変調半導体レーザーの動作原理

図1に本研究で使用した混合変調半導体レーザーの構造を示す。100 μm のDFB活性領域に50 μm の外部共振器としても作用するICLM領域を集積した構成となっており、それぞれの領域の端面には反射率10%のARコーティングと反射率80%のHRコーティングを施している。DFB活性領域には注入電流に、ICLM領域には印加する逆バイアス電圧にそれぞれ変調信号を重畳することで出力光の強度変調を行っている。本数値解析では、混合変調方式を考慮し、共振器内部のキャリア密度

と電界振幅の空間的分布変化を記述するために結合波方程式を用いた³⁾⁴⁾⁵⁾。

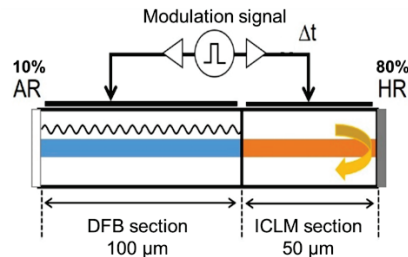


図1 混合変調半導体レーザーの概略図

3. 混合変調半導体レーザーのチャープ特性検証結果

直接変調信号とICLM変調信号間のステップ応答の時間差によってパターン効果によるオーバーシュートが生じてしまうため、各変調信号間に時間差 Δt を設けた。また負チャープ効果を検証するため、SMF伝送後の出力波形をスプリットステップフーリエ法を用いて解析することで、伝送ペナルティを計算した⁶⁾⁷⁾。伝送ペナルティの正負及び大小で出力信号光のチャープ特性の議論を行った。値が負になればSMF伝送によって逆に波形の改善が行えることを示している。図2、3に25 Gbps NRZ信号変調時のアイ開口消光比の最小値ERmin.(minimum Extinction-Ratio)及び伝送ペナルティのSMF伝送距離依存性をそれぞれ示す。比較としてEA変調器の解析結果も黒丸で示した。 Δt

を-15 ps にした際、伝送ペナルティが大きく改善されたように見えるが、これは B to B(Back to Back) 条件下での ERmin. が小さいため、実用的ではないことがわかった。また、 Δt を-10 ps 以下にすると分散耐力の向上が行えなかった。 Δt を-12 ps に設定することで B to B での ERmin. を十分確保しつつ分散耐力が最適化され、伝送距離が 10 km 程度まで伝送ペナルティを負にすることができた。

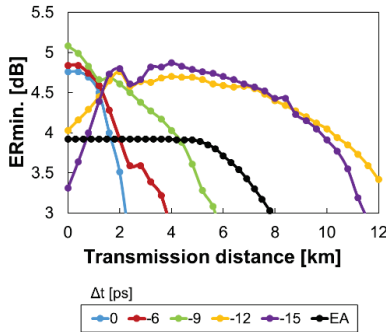


図 2 25 Gbps 変調時の ERmin.

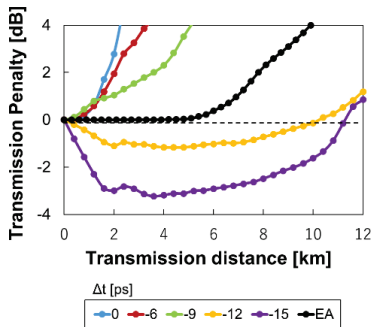


図 3 25Gbps 変調時の伝送ペナルティ

図1の構造では 40 Gbps 程度までは分散耐力の向上が確認できたが、70 Gbps 以上の高ビットレートでは分散耐力の向上が困難だった。そこで、共振器内の光子寿命に着目し、ICLM 側の端面反射率 r の低減を行い、波形の劣化の制御効果を検証した。図 4, 5 に 100 Gbps 変調時における ERmin. 及び伝送ペナルティの端面反射率 r 依存性についてそれぞれ示す。ファイバ伝送距離が 500 m 以上で EA-DFB レーザを上回る伝送特性が得られることを確認した。

4. まとめ

本研究では、短距離高速光通信システムの実現に向け、直接電流変調と共振器内部損失変調を組み合わせた混合変調半導体レーザの光ファイバ伝送特性の数値解析を行った。40 Gbps 程度までの信号速度において分散耐力の向上が行えることを確認し、端面

反射率を調整して共振器内の光子寿命を低減することで 100 Gbps の信号速度でも 500 m 以上の伝送距離において EA-DFB レーザを上回る伝送特性が得られることを明らかにした。

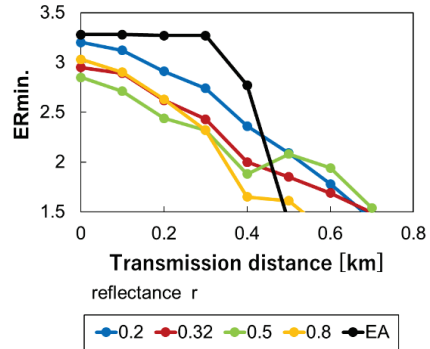


図 3 100 Gbps 変調時の ERmin. の r 依存性

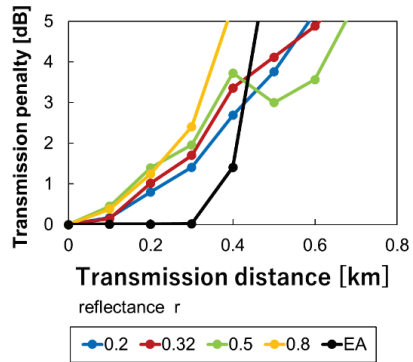


図 3 100 Gbps 変調時の伝送ペナルティの r 依存性

文献

- 1) C. R. Campos, et al. Proc. forth international conference on advances in circuits, electronics and micro-electronics (CENICS) 17 (2011)
- 2) M. Kanno, et al. IEICE Trans. Electron., E101-C 561 (2018)
- 3) J. Awrejcewicz, InTech, pp. 436-468 (2011).
- 4) T. Numai, Wiley, pp. 57-92 (2010).
- 5) J. Zhi, H. Zhu, D. Liu, L. Wang, and J.-J. He, Opt. Express, 20(3), pp. 2277-2288 (2012).
- 6) G. P. Agrawal: Nonlinear Fiber Optics (1989).
- 7) H. Yasaka and Y. Shibata: Fiber Optic Communication: Key Devices 2nd ed., pp. 359-416 (2017)

修士学位論文要約（令和6年3月）

LAPSを組み込んだ電気化学的分極システムの開発と腐食試験への応用

池田 凜太郎

指導教員：吉信 達夫， 研究指導教員：宮本 浩一郎

Development of an Electrochemical Polarization System
Incorporating LAPS and Its Application to Corrosion Testing

Rintaro IKEDA

Supervisor: Tatsuo YOSHINOBU, Research Advisor: Koichiro MIYAMOTO

Metallic products are subject to corrosion depending on the environment in which they are used. Metal corrosion is an electrochemical process that occurs and progresses through anodic and cathodic reactions, and an electrochemical measurement system is necessary to elucidate the mechanism of corrosion processes. In addition to an electrochemical measurement system, this study focused on a semiconductor pH sensor called a light-addressable potentiometric sensor (LAPS) to measure the pH changes near the working electrode. The combination of an electrochemical measurement system and a LAPS enables elucidation of the reaction processes both on the electrode surface and in the solution during the metal corrosion process. In a previous study, a control circuit was developed, in which the functionalities of a potentiostat and a LAPS measurement system were integrated. In this study, functionalities of both a potentiostat and a galvanostat were combined with a LAPS measurement system to develop more versatile control circuits that can be used in the study of metal corrosion.

1. はじめに

金属製品は使用される環境によって腐食が発生するという問題点がある。金属腐食は、アノード反応とカソード反応によって発生、進行する電気化学反応である。腐食過程の解明には電気化学測定システムが必要となる。電気化学測定システムに加え、本研究では、作用極近傍の pH 変化を測定するために、LAPS¹⁾と呼ばれる半導体化学センサを用いた。電気化学測定システムと LAPS を組み合わせることで、金属腐食過程における電極表面と溶液の両方の挙動の解明が可能となる。先行研究²⁾では、定電位分極と LAPS の同時測定により、隙間腐食の開始・進展および再不働態化と隙間内の pH 変化の関係について研究が行われた。金属腐食と pH の測定系を汎用性の高いものにするために、本研究では定電位分極に加え定電流分極を可能な LAPS 測定回路の開発を行う。

2. 原理

LAPS の模式図を図 1 に示す。LAPS はシリコン基板上に SiO₂ と Si₃N₄ の積層から成る絶縁層を形成し、Si₃N₄ 表面に測定試料である溶液を接触させた、電解質溶液、絶縁層、半導体の EIS 構造を持つ。Si₃N₄ 面が pH 感応部として機能し、外部か

らバイアス電圧を印加した状態でセンサ裏面に変調光を照射すると、光励起によって外部回路に交流光電流が流れる。この交流光電流は空乏幅に依存し、この空乏層幅は Si₃N₄ 表面の電荷が溶液の水素イオンに反応することで変化する。よって、外部回路に流れる交流電流値を測定することで光照射領域における pH 測定が可能となる。

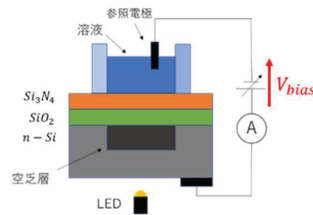


図 1 LAPS の模式図

3. 回路の設計

本研究で開発した測定システムは、4 つの電極で構成されている。LAPS 測定で得られる信号は微弱電流であるため、LAPS 測定には高精度な測定が求められる。そのため、LAPS の電位を安定させることを優先した LAPS 接地の電気化学的分極システムを 1 つ目に検討する。一方で、何らかの理由で WE の電位を接地の電位と等しくしなけ

ればならない場合にも対応できるように、WE 接地の電気化学的分極システムを2つ目の回路として検討する。この場合、WE を回路内で仮想接地するケースと、WE が建造物であるなど WE が回路の外部で既に接地されているケースの2通りが考えられ、それぞれに対応する回路を考えた。そして、各接地方式において定電位分極と定電流分極が可能な合計6パターンの回路の作製を行う。設計した回路のブロック図を図2~4に示す。

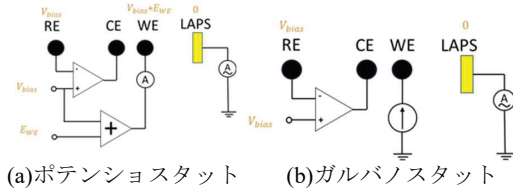


図2 LAPS 仮想接地回路のブロック図

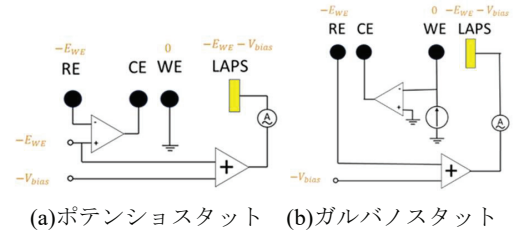


図3 WE 仮想接地回路のブロック図

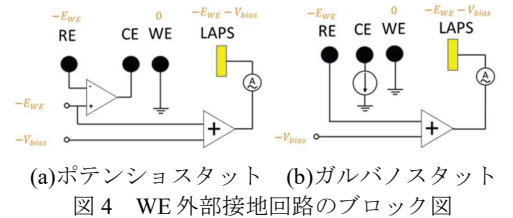


図4 WE 外部接地回路のブロック図

4.制御回路の評価

LAPS の I-V 特性測定では、バイアス電圧を変化させながら LAPS の交流電流信号を測定する。バイアス電圧を階段状に変化させたときに、定電位分極・定電流分極が過渡的にどのような影響を受けるかについて検討を行った。LAPS 仮想接地回路においてバイアス電圧を-2 V から-1 V に大きく階段状に変化させた場合のみ制御電圧 E_{WE} や制御電流 I_{WE} が影響を受けた(図5)が、通常の使用条件では問題ないことが確認された。他の2つの回路においても、バイアス電圧の変化が分極の制御に影響しないことが確認された。

開発した6パターンの回路は、WE 外部接地のガルバノスタット回路を除き、ポテンシオスタットモードにおける WE の電位や、ガルバノスタットモードにおける WE の電流を十分に高い精度で制御できることが確認された。WE 外部接地のガルバノスタット回路では、WE の電流を直接制御できないため、CE の電流を制御することで近似

しており、WE 表面の電気化学反応や外部ノイズが制御電流に影響を与えていると考えた。

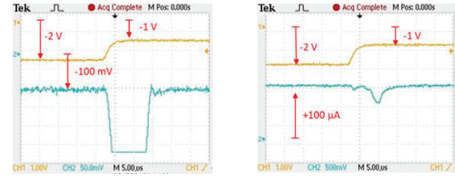


図5 LAPS 仮想接地回路で V_{bias} を-2 V から-1 V に変化させた場合の E_{WE} 、 I_{WE} の過渡応答

5.腐食試験への応用

LAPS 仮想接地のガルバノスタット回路を用いて、NaCl 水溶液中に浸漬した Fe 板の定電流 (+500 μ A) アノード分極を60分間行い、LAPS による pH 測定を10分間隔で行った。その時の腐食電位と溶液の pH 変化を図6、図7に示す。

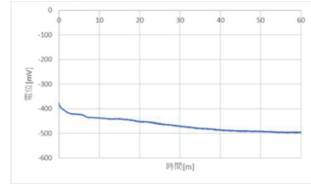


図6 腐食電位の時間変化

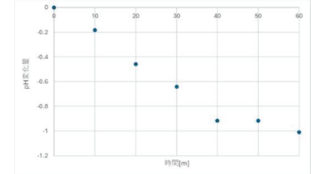


図7 分極前を基準とした pH の時間変化

以上の実験結果から、LAPS が仮想接地されたガルバノスタット回路を用いて、本研究の目的である定電流分極下の電気化学測定と LAPS による pH 測定の同時測定が可能であること、本システムを腐食試験に応用できることが示された。

6.結論

本研究では、定電位分極に加え定電流分極も可能な LAPS 測定回路の開発を行った。合計6通りの回路の作製に成功し、定電流分極中の LAPS による pH 測定にも成功した。開発したシステムは、腐食メカニズムの解明に役立つことが期待される。

参考文献

1) D.G. Hafeman, J.W. Parce, and H.M. McConnell, "Light-Addressable Potentiometric Sensor for Biochemical Systems", Science, vol. 240, pp. 1182-1185, 1988.
 2) 大嶋宏暢, "隙間腐食の発生・進展および再不動態化の化学イメージセンサによるその場観察", 東北大学工学研究科 修士論文, 2020.

修士学位論文要約（令和6年3月）

リンパ球細胞におけるプラズマ促進電氣的遺伝子導入法の高品質化

及川 和起

指導教員：金子 俊郎， 研究指導教員：佐々木 渉太

Quality Improvement in Plasma-Enhanced Electro-Transfection into Lymphocyte Cells

Kazuki OIKAWA

Supervisor: Toshiro KANEKO, Research Advisor: Shota SASAKI

Our research group has recently developed a “plasma-enhanced electro-transfection (PEET) method” that combines plasma discharge in the culture medium and pulsed electric fields (pEFs). In this study, we tried to clarify key factor(s) and optimize the treatment conditions toward developing a high-quality PEET method into blood cells. It was clarified that hydrogen peroxide (H₂O₂), a chemical stimulus by plasma, has negative effect on transfection efficiency and cell viability. In addition, effective spatial range of plasma discharge was within 3 mm from the high voltage electrode, which raises electrical and mechanical stimuli as candidate of plasma-derived key factors. Exploration experiments of pEF-derived key stimuli showed that electric current density and electric field intensity were strongly correlated with transfection efficiency. Based on these findings, high quality transfection was achieved with a transfection efficiency of 48% and a cell viability of 34%.

1. はじめに

近年、再生医療の発展やiPS細胞作成等を目的とした遺伝子導入の需要が高まっている。特に、浮遊細胞系に属する血液細胞への遺伝子導入では、血液がんや血液・免疫系の疾患治療のみならず、抗がん剤の感受性予測法の開発といったバイオマーカー応用へと貢献することができ、極めて重要とされている。しかし、従来の血液細胞への遺伝子導入法では、HeLa細胞などの主要な接着細胞株への遺伝子導入に比べて効率が低いことが知られている。また、典型的な遺伝子導入方法であるウイルスベクター法では変異体出現などの危険性があり、エレクトロポレーション法(EP法)では膜損傷が大きいなど、従来法には課題点が多く存在する。これらの難点を克服するために、我々は、培養液中のプラズマ放電とパルス幅10μs以下の短パルス電場(pEFs)を組み合わせた「プラズマ・電場複合(PEET)法」を開発した。これまで接着細胞であるヒト乳がん細胞(MCF-7)を対象に、高い細胞生存率(~80%)と高い遺伝子導入効率(~70%)の両立が可能であることを実証してきた[1]。さらに本手法は、従来のEP法と比較して、顕著に膜損傷を抑制できるという特徴も有する。しかし、一般に遺伝子導入条件が接着細胞と異なる血液細胞で本手法が適用可能かどうかは不明であった。そ

こで、本研究では、血液細胞におけるPEET法の導入因子解明・最適化・高品質化を目的として、様々な条件にて実験を行った。

2. 実験方法

PEET法では、液中でプラズマ放電処理した後、短パルス電場を印加する。液中プラズマ用電極にはセミリジッドケーブルの芯線(高電圧側)と外側(アース)にタングステンを融接したものを利用し、図1に示す回路を用いて高電圧パルスを印加することで液中プラズマを生成した[1-3]。液中プラズマ放電では、高電圧電極がジュール熱と電気分解によって気泡に包まれた後、気泡の内部でプラズマが生成される[2]。続いて、細胞懸濁液をEP用キューベット内に移し短パルス電場を印加した。処理対象細胞としてJurkat細胞を5×10⁶ cells/100μLの密度で使用した。導入遺伝子として、緑色蛍光タンパク質(GFP)がコードされているプラスミドDNAを、90μg/100μLの濃度で使用した。PEET処理の24時間後にフローサイトメトリーを用いてGFP発現による緑色蛍光を測定し、遺伝子導入効率を測定した。

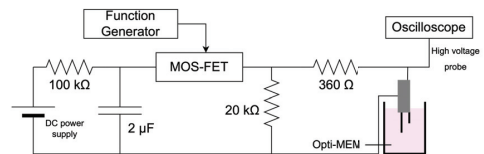


図 1. 液中プラズマ生成回路

3. 実験結果

～PEET 法における液中プラズマ由来刺激の影響～
 プラズマ由来の刺激は、化学刺激 [過酸化水素 (H₂O₂)、OH ラジカル等]、電気刺激、機械刺激に大別される。各刺激を強化・弱体化して遺伝子導入を行い、各刺激が遺伝子導入に及ぼす影響を検証した。

プラズマ由来の代表的な化学刺激である H₂O₂ を PEET 処理後に追添加したところ、遺伝子導入効率・細胞生存率ともに低下した。また、PEET 法にて、H₂O₂ の分解酵素であるカタラーゼを添加すると、細胞生存率は有意に改善したが、遺伝子導入効率は変化しなかった。これらの結果から、H₂O₂ は遺伝子導入にポジティブな影響を与えず、低濃度域であってもネガティブな影響を与えることが明らかとなった。また、プラズマ由来の別の化学刺激である OH ラジカルについても阻害剤実験を行ったが、遺伝子導入効率と細胞生存率ともに有意な影響は見られなかった。したがって、OH ラジカルは PEET 法の導入因子ではないと示唆された。

遠心分離処理によって、チューブの底に集めた細胞ペレットにプラズマ処理を行う実験により、プラズマの有効範囲取得を試みた。その際、高電圧電極と細胞間の距離 (D_{cell}) を変えて実験を行った。その結果、D_{cell} < 3 mm でのみ導入効果が観測されたことから、重要な液中プラズマ由来刺激は、プラズマ近傍で加わっていると考えられる。この有力候補として、プラズマ由来の電気刺激・機械刺激が挙げられる。

～PEET 法における pEFs 由来刺激の影響～

PEET 法にて、キュベットの平行平板電極間距離と液量を変えることで、細胞懸濁液に印加される各種電気刺激パラメータ(電圧、電界、電流、電力等)を調整した。その結果、遺伝子導入効率は電界強度・電流密度と強い相関関係があった。電界強度 2400 V/cm、電流密度 0.13 A/mm² の実験条件で最も高い導入効率を得られ、遺伝子導入効率は先行研究[1]の 4.3%から 42%まで向上させることに成功した。

～液中プラズマ (P) と pEFs (E) の処理順序～

液中プラズマ(P)→短パルス電場(E)の順番(P→E)での遺伝子導入と、短パルス電場→液中プラズマの順番(E→P)での遺伝子導入結果の比較実験を行った。その結果、導入効率に有意な差はなかったが、生存率について、E→Pの方がP→Eよりも高いという結果が得られた。これは、P 処理による膜変質効果が比較的長い時間持続することが原因ではないかと考えられる。例えば、P→Eでは、P 処理によって化学修飾を受けた細胞膜に対して、E 処理の膜損傷効果がより強く、もしくはより長い時間現れるならば、生存率は低下する。

～PEET 法の最適化～

この研究で得られた最も重要な知見は、「H₂O₂ が

遺伝子導入に悪影響を及ぼす可能性が高い」と、「pEFs 印加時の電界強度・電流密度が遺伝子導入効率と強い相関関係がある」ことであった。以上のことから、H₂O₂ 除去のためのカタラーゼ添加とキュベット間隔 1 mm による電界強度・電流密度強化による PEET 法を行ったところ、48%の遺伝子導入効率と 34%の細胞生存率が得られた(図2)。典型的な導入方法である EP 法では導入効率 20%・細胞生存率 25%であり、リポフェクション法では導入効率 3.6%・細胞生存率 38%であった。さらに、EP 法では明らかな細胞膜の損傷が観察されたのに対し、PEET 法では明らかな細胞膜の損傷は観察されなかった。

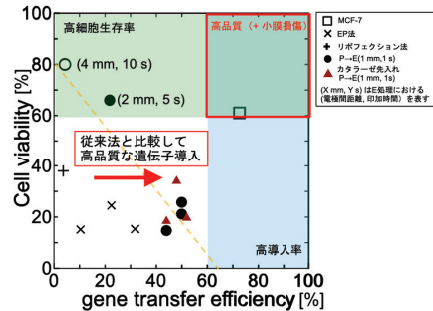


図 2. PEET 法の最適化

4. まとめ

リンパ球細胞における PEET 法の高品質化に向けて、導入効率向上に寄与する因子の同定を目的に実験を行い、以下の結論を得た。H₂O₂ は導入効率や生存率にネガティブな影響を与える可能性が高く、OH ラジカルも導入効率・生存率の向上に有意に寄与しないことが示唆された。また、プラズマの有効範囲は 3 mm 以内であったことが明らかとなり、その有力な導入因子として、プラズマ由来の電気刺激・機械刺激が考えられる。さらに、PEET 法における pEFs の電流密度及び電界強度は、遺伝子導入効率と強く相関していたため、重要な導入因子であると考えられる。「カタラーゼ添加による H₂O₂ 消去」と「pEFs 印加処理における電界・電流密度の強化」を採用した PEET 法により、遺伝子導入効率 48%・細胞生存率 34%の遺伝子導入を達成した。

文献

- 1) R. Honda, doctoral thesis (Department of Electronic Engineering, Tohoku University, 2022)
- 2) R. Honda, S. Sasaki, K. Takashima, T. Sato, and T. Kaneko, Jpn. Appl. Phys., **58** (2019) 106002.
- 3) R. Honda, S. Sasaki, K. Takashima, M. Kanzaki, T. Sato, and T. Kaneko, Jpn. Appl. Phys., **59** (2020) 040904.

修士学位論文要約（令和6年3月）

プラズマ合成五酸化二窒素によるアミノ酸の化学修飾機構解明

大場 優人

指導教員：金子 俊郎， 研究指導教員：佐々木 渉太

Elucidation of Chemical Modification of Amino Acids Induced by Plasma-Synthesized Dinitrogen Pentoxide

Yuto OBA

Supervisor: Toshiro KANEKO, Research Advisor: Shota SASAKI

To elucidate the mechanism of chemical modification of amino acids by plasma-synthesized N_2O_5 , experiments, and analyses were conducted using wet amino acid powders and mist. The treatment of 18 moist amino acid powder with N_2O_5 resulted in significant coloration of Tyr and Trp. When Trp was treated with multiple Reactive oxygen/nitrogen species, NO_x (NO/NO_2) showed little modification effect, while O_3 showed an oxidative modification pathway and N_2O_5 showed a characteristic reaction of the nitration modification pathway. In experiments using mist, approximately 430 mM NO_3^- was formed in N_2O_5 -treated distilled water mist. This suggests the formation of a unique reaction site where N_2O_5 intermediates, which are difficult to form in a strongly acidic environment or bulk, act near the interface. Furthermore, quantitative experiments using N_2O_5 -treated amino acid mist identified three amino acids (Consumption rate order: Trp > Tyr > Met) that showed significantly higher reactivity among the 18 species. This suggests the possibility of the formation of derivatives specific for N_2O_5 interfacial reactions, especially in the Trp mist.

1. はじめに

大気圧空気プラズマ技術は、100 W 以下の電力を用いて空気分子を化学反応性の高い活性酸素・窒素種 (RONS) にその場で変換でき、医療・農業分野など多方面での応用が期待されている。

RONS の中でも、五酸化二窒素 (N_2O_5) は強力なニトロ化および酸化作用をもち、極めて高い水溶解性を示すことが知られている。さらに、気液界面近傍で一時的に生成する N_2O_{5aq} 、 $[NO_2^+ \cdot NO_3^-]_{aq}$ 、 $NO_2^+_{aq}$ などの中間体による特異な反応性が特徴的である。近年、本研究室では N_2O_5 をその場選択合成可能なプラズマ源の開発に世界で初めて成功し、従来合成法より安全かつ簡便に N_2O_5 の供給が可能になった¹⁾。これにより、 N_2O_5 の応用研究が容易になり、 N_2O_5 の殺菌・殺ウイルス効果や植物免疫活性化効果等が明らかになってきている^{2,3)}。しかし、その作用機序には不明点が多く、生物の基本要素であるアミノ酸やタンパク質との反応に関する知見はほとんど無い。

そこで本研究では、18 種類のタンパク質構築アミノ酸 (L-Tyr、L-Trp、L-Phe、L-Cys、L-Met、L-Val、L-Leu、L-Ile、L-Ala、L-Ser、L-Pro、L-Lys、L-Glu、L-His、L-Asp、Gly、L(+)-Arg、L(-)-Thr) の N_2O_5 による化学修飾機構解明を目指し、プラズマ合成 N_2O_5 を用いて、アミノ酸湿潤粉体またはアミノ酸含有ミストに対してガス処理する実験と詳細な分析を行った。

2. 実験方法および分析手法

図1にアミノ酸湿潤粉体処理の実験概要図を示す。少量の純水 (DW) を添加した湿潤粉体を N_2O_5 生成器から供給される RONS ガス (NO_x 、 O_3 、 N_2O_5 、 \dots) で5分間処理した。詳細に分析したいものは DW に溶解してフォトダイオードアレイ付高速液体クロマトグラフィー質量分析計 (LC-PDA-MS) を用いて分析した。

図2にアミノ酸含有ミスト処理の実験概要図を示す。アミノ酸含有ミストを発生させ、RONS ガスと混合・反応させる。その後、配管外部に放出されるミストを回収し、LC-PDA-MS を用いて分析した。

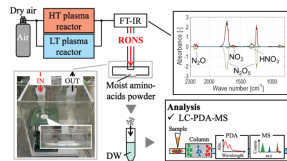


図1 アミノ酸湿潤粉体の N_2O_5 ガス処理実験概要図

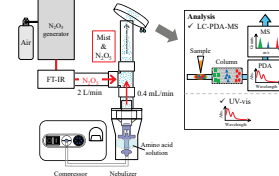


図2 アミノ酸含有ミストの N_2O_5 ガス処理実験概要図

3. 18種類のアミノ酸湿潤粉体への N₂O₅ ガス処理

図3に18種類のアミノ酸湿潤粉体へ N₂O₅ ガスで5分間処理した際の結果を示す。TyrとTrpのみが顕著な着色を示すことが明らかになった。両者とも徐々に黄変し、最終的に Trp はやや橙色になった。

中でも Trp の反応に着目し、他の RONS との反応の違いを比較した。その結果、図4に示すように、乾燥空気(Control)と NO_x (NO/NO₂) では着色しないのに対して、O₃ 処理では褐色の着色反応が見られた。さらに、LC-PDA-MS のデータを詳細に分析すると、主に N₂O₅ 処理では 5-ニトロトリプトファンを含む数種類のニトロ化物、O₃ 処理ではキヌレンニンなどの酸化物が生成したことがわかった。これは、Trp への N₂O₅ 処理における主要な化学修飾経路がニトロ化修飾を介しているのに対し、O₃ 処理による主な修飾経路は酸化修飾であり、N₂O₅ は特異な反応性を持つことが示された。

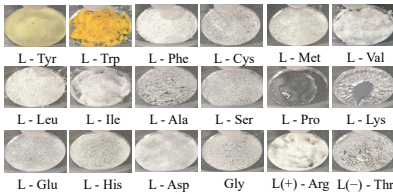


図3 アミノ酸湿潤粉体へ5分間 N₂O₅ ガス処理した際の写真

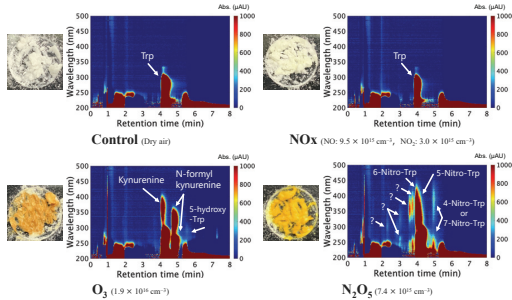


図4 Trp 湿潤粉体へ乾燥空気・NO_x・O₃・N₂O₅ 処理した際の写真と PDA カラーマップ

4. N₂O₅ 処理ミスト中で形成される界面反応場

ミストへ流入する N₂O₅ のフラックス $\Gamma_{N_2O_5}$ を見積もることを目的に、N₂O₅ 処理 DW ミスト中の NO₃⁻ 体積平均濃度を測定した。NO₃⁻ は約 430 mM、 $\Gamma_{N_2O_5} = 5.1 \times 10^{20}$ 個/(cm²・s)と算出された。この結果は、界面近傍で pH < 0 のバルクでは形成困難な“Reactive” N₂O₅ の界面反応場が形成されていることを示唆するものであった。

5. N₂O₅ 処理アミノ酸含有ミストを用いた反応性定量評価

N₂O₅ 処理アミノ酸含有ミストを LC-MS で分析し、検出した MS クロマトグラムからアミノ酸ごとの反応性をアミノ酸消費率から定量的に検証した。

その結果、図5に示すように、Met が 29.5%、Tyr が 34.6%、Trp が 56.9%と有意な消費を示し、この3つが N₂O₅ と選択的に反応する可能性を見出した。さらに、最も反応性が高かった Trp の結果を解析したところ、湿潤粉末処理では検出されなかった派生物の生成が明らかになった。これは、ミストを用いたことによる N₂O₅ 界面反応の顕在化によって、気液界面での得意な反応経路が生じていることを示唆している。

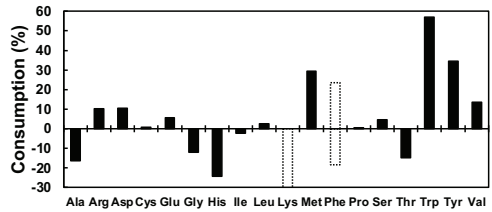


図5 N₂O₅ 処理によるアミノ酸ごとの反応性(消費率)

6. まとめ

プラズマ合成 N₂O₅ によるアミノ酸の化学修飾機構解明に向けて、アミノ酸湿潤粉体およびミストへの N₂O₅ 処理実験と解析を行った。

18種類のアミノ酸湿潤粉体へ N₂O₅ 処理したところ、Tyr と Trp が顕著に着色した。特に Trp 湿潤粉体へ複数の活性種で処理した結果、NO/NO₂ はほとんど修飾作用を示さなかった一方で、O₃ は主に酸化修飾経路、N₂O₅ は主にニトロ化修飾経路が進行することが明らかとなり、N₂O₅ は特徴的な反応を示した。

さらに、N₂O₅ 特有の界面反応顕在化を狙い、アミノ酸含有ミストを用いた実験を行った。N₂O₅ 処理後の DW ミスト中に NO₃⁻ が約 430 mM 生成され、界面近傍においてバルクでは形成困難な強酸性環境および N₂O₅ 中間体が作用する特異な反応場が形成されていることを示唆するものである。加えて、アミノ酸含有ミストの N₂O₅ 処理を用いた定量実験により、18種類の中で顕著に高い反応性を示すアミノ酸を3種類(消費率順: Trp > Tyr > Met) 同定した。特に N₂O₅ 処理 Trp ミストでは、湿潤粉体処理では見られなかった派生物を複数検出し、これらが界面反応特異的に生成される可能性を見出した。

文献

- 1) S. Sasaki *et al.*, Ind. Eng. Chem. Res. **60** (2021) 798.
- 2) S. Sasaki *et al.*, Proceedings of 25th International Symposium on Plasma Chemistry, POS-11-317, (2023).
- 3) D. Tsukidate *et al.*, PLOS ONE, **17**, (2022) e0269863.

修士学位論文要約（令和 6 年 3 月）

プラズマ CVD によるグラフェンナノリボン量子デバイスの集積化合成 加藤 樹

指導教員：金子 俊郎， 研究指導教員：加藤 俊顕

Integrated Synthesis of Graphene Nanoribbon Quantum Devices by Plasma CVD Tatsuki KATO

Supervisor: Toshiro KANEKO, Research Advisor: Toshiaki KATO

Recently, we demonstrated the fabrication of graphene nanoribbon (GNR)-based quantum dot devices by advanced plasma CVD with one-dimensional Ni nanobar as a catalyst. Detailed measurements at cryogenic temperatures using liquid helium revealed the formation of a fine structure in the centre of the GNRs, which has the characteristics of quantum dots. However, the use of a confinement barrier naturally formed within GNR made its reproduction difficult. In this study, the confinement barrier height of the device was actively controlled by introducing two-step electron-beam lithography, which can change the kinds of nanobar and electrode metal. By fabricating wide GNR-Au devices with wider nanobar widths, we succeeded in suppressing the formation of fine structures and observed quantum properties originating from the confinement between junction barriers. Therefore, this study has developed a valuable technique to transform GNR devices into integrated quantum dot devices.

1. はじめに

グラフェンを1次元リボン構造にしたグラフェンナノリボン(GNR)は、高いキャリア移動度、有限のバンドギャップ、弱いスピン起動相互作用等の特性を有することから様々な量子デバイス応用が期待されている。本研究グループではこれまで、Ni ナノバーと呼ばれる金属の微小構造触媒を用いた独自のプラズマCVDプロセスを開発しており^{1,2)}、プロセスの最適化を行うことで、GNR中に形成される局所的な微小構造を起源とした単一量子ドット特性をもったデバイスの作製にも成功している³⁾。しかしながら、微小構造による合成の不安定性のため量子ドットを集積デバイスとして用いることが困難であった。そこで、本研究ではGNRデバイスの閉じ込め障壁制御による、GNR量子ドットデバイスの高効率集積化合成を目指して実験を行った。

2. 閉じ込め障壁制御

局所的な微小構造に依らない、再現性のある閉じ込め障壁形成のため、GNRと電極間に形成されるショットキー障壁に注目した。そのため、従来方法と異なり、触媒であるNiナノバーと電極を二段階で作製するプロセス(二段階EBリソグラフィ)を新たに導入した。

図1に、実際に電極種をNi, Cu, Auと変更したGNRデバイスのアレニウスプロットによる接合障壁の実測結果を示している。電極種がNi, Cu, Auの順に活性化エネルギーが増加しており、これはGNRとの仕事関数差の関係とも一致している。この結果は、本測定で得られた活性化エネルギーがショットキー障壁由来であることを示しており、二段階EBリソグラフィにより

GNR-電極間の接合障壁制御が可能であることを実証するものである。

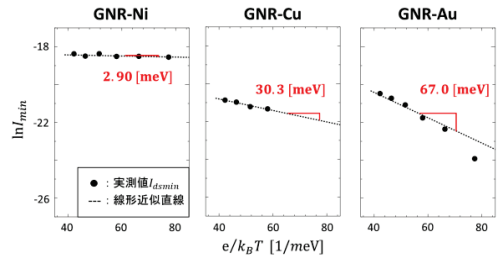


図1 GNR-Ni, Cu, Au デバイスの活性化エネルギー (e:電気素量, k_B:ボルツマン定数, T:絶対温度, I_{ds,min}:各温度でのI_{ds}-V_g最小値)

次に、制御した接合障壁の低温下における電子の閉じ込め障壁としての寄与を調査するため、16 K程度の低温下で測定を行った。測定されたソース-ドレイン電流(I_{ds})-ゲート電圧(V_g)特性を図2に示す。

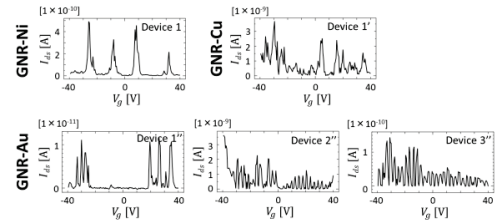


図2 GNR-Ni, Cu, Au デバイスのクーロン振動

図2より、測定した全ての電極種のデバイスで量子ドットに特徴的なクーロン振動特性が観測され、特

に GNR-Au デバイスでは細かく周期的な振動が観測された。また、GNR-Au デバイスでは従来の GNR-Ni デバイスと比較してクーロン振動の観測確率も大幅に向上 (~80%) するという結果が得られた。以上より、GNR-Au デバイスでは GNR-Ni デバイスと異なる量子構造が形成されている可能性が示唆された。

3. 幅狭 GNR-Au 量子ドットデバイス

GNR-Au デバイスにおいて、より詳細な量子輸送特性の解析を行った。図 3 に、図 2 中 Device3” (GNR 幅 25 nm, 長さ 100 nm) より観測されたクーロンダイヤモンド特性を示す。斜めに傾いたダイヤモンドが観測され、これはドットの閉じ込めに関する障壁のキャパシタンスが左右で異なることを表している。また、クーロンダイヤモンドの周期 ΔV_g より見積もられた量子ドットサイズ 120 nm^2 は設計値の GNR サイズ 2500 nm^2 よりも明確に小さいものであった。以上の結果より、観測された量子ドット特性は GNR-電極間の接合障壁と局所構造による障壁による電子の閉じ込めが起源だと予想される。従来デバイスと異なり局所構造が一つのみでも閉じ込めが起こるため、量子ドット特性の高い観測確率が得られたと考えられる。

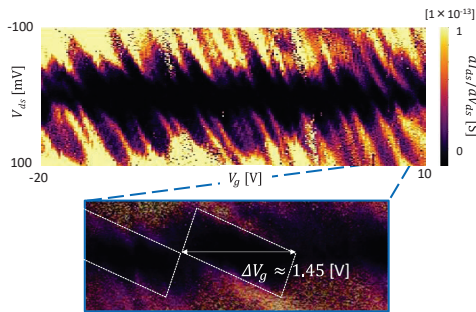


図 3 幅狭 GNR-Au デバイスで観測されたクーロンダイヤモンド特性 (V_{ds} : ソース - ドレイン電圧, dI_{ds}/dV_{ds} : 微分コンダクタンス)

4. 幅広 GNR-Au 量子ドットデバイス

局所構造を有する系では、その微小な構造からデバイスが壊れやすく、特性の再現性も低いという問題点がある。そこで、局所構造を形成しにくい幅が広い GNR を合成するため、幅広 (30 nm ~) のナノカーボン管によるデバイス作製を行った。図 4 に、液体ヘリウムを用いた 4.2 K 程度の低温下での測定結果を示す。図 4(a) より、幅広 GNR-Au において、局所構造デバイスでは見られない数 100 mV 周期のクーロンダイヤモンドを観測した。これは、量子ドットが接合障壁に由来するものであることを示唆している。また、図 4(b)(c) より、基底準位線の外側にも筋状の構造が認められ、これは励起準位によるものだと考えられる。

さらに、局所構造 GNR と幅広 GNR-Au の比較を行った。図 5 より、幅広 GNR-Au ではほとんどのデバイスが高コンダクタンスに位置し、全てで量子特性が観

測された。これは、幅広 GNR では局所構造が形成されにくく、また幅広 GNR-Au 量子ドットが接合障壁同士の閉じ込めに由来することを裏付けるものである。

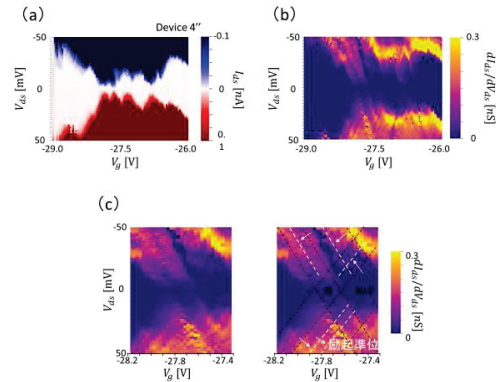


図 4 幅広 GNR-Au デバイスにおける励起準位の観測結果。(a)電流値と(b)微分コンダクタンスの二次元プロット、(c)(b)の拡大図。

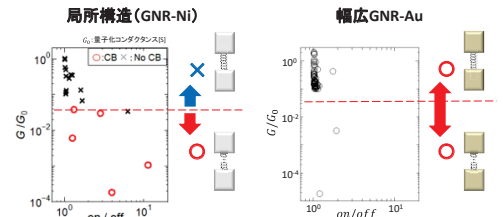


図 5 局所構造 GNR 量子ドットと幅広 GNR-Au 量子ドットにおける正規化コンダクタンス (G/G_0) - 室温での on/off プロット (○と×は量子特性観測の有無)

まとめ

本研究では、GNR 量子デバイスの実用化に向けて、プラズマ CVD による GNR 量子デバイスの集積化合成を目的に実験を行った。二段階 EB リソグラフィプロセスを確立に成功し、電極種によって接合障壁を制御できることを実証した。幅広 GNR デバイスの作製により、局所構造形成の抑制に成功し、接合障壁由来と考えられる量子特性の観測が可能となった。以上より、本研究において、均質かつ良質な量子ドットを高効率で作製する手法の開発に成功したといえる。

文献

- 1) T. Kato and R. Hatakeyama, Nature Nanotechnology 7 (2012) 651.
- 2) H. Suzuki, T. Kaneko, Y. Shibuta, M. Ohno, Y. Maekawa and T. Kato, Nature Communications 7 (2016) 11797.
- 3) T. Kato, T. Kitada, M. Seo, W. Okita, N. Sato, M. Shinozaki, T. Abe, T. Kumasaka, T. Aizawa, Y. Muto, T. Kaneko, and T. Otsuka, Communications Materials 3, 103 (2022).

修士学位論文要約（令和6年3月） h 2024)

双方向超音波加振による正弦変位量のネットワークアナライザを用いた計測による組織粘弾性特性評価法に関する研究

小松 祐也

指導教員：金井 浩， 研究指導教員：荒川 元孝

A Study on Evaluation Method of Viscoelastic Properties of Biological Tissues by Measuring Sinusoidal Displacements Generated by Dual Ultrasound Excitation Using a Network Analyzer

Yuya KOMATSU

Supervisor: Hiroshi KANAI, Research Advisor: Mototaka ARAKAWA

In this study, we proposed a novel method for measuring sinusoidal displacements using continuous waves with a network analyzer to stably measure small sinusoidal displacements generated in an object by ultrasonic excitation. As a result, this method can accurately measure the sinusoidal displacements ranging from 0.5 to 50 μm at frequencies between 10 and 300 Hz. Moreover, the viscoelastic properties of the tissue mimicking biological phantoms were estimated by measuring the sinusoidal displacements on their surfaces generated by the amplitude-modulated acoustic radiation force using a network analyzer. As a result, the ratios of elasticity G to viscosity η , G/η were estimated to be 210, 730, and 1,500 rad/s for the three phantoms with Asker C hardness values of 0, 5, and 15, respectively. Since the elastic modulus G increases as the phantom becomes harder, the estimated G/η were reasonable.

1. Introduction

Quantitative measurements of the viscoelastic properties of biological tissues are important for the early diagnosis and detection of lesions. We developed a method to continuously generate a sinusoidal displacement in a local region at an arbitrary frequency Δf using dual amplitude-modulated acoustic radiation force. Moreover, by measuring the frequency characteristics of the sinusoidal displacement generated by ultrasonic excitation force, the viscoelastic parameters were estimated by indirectly obtaining the frequency characteristic of the ratio of strain to stress and fitting it to a Voigt model. However, under the safety guidelines of the biological tissue, the stable measurement of the displacement is difficult because the displacement amplitude caused by ultrasonic excitation force is minute (a few μm), which decreases the reproducibility of the estimated viscoelastic properties.

In the present study, we propose an ultrasonic method to stably and accurately measure the sinusoidal displacements on the order of micrometers using a network analyzer¹⁾. Moreover, the viscoelastic properties of the biological phantoms were estimated by analyzing the sinusoidal displacements on their surfaces generated by the amplitude-modulated acoustic radiation force.

2. Ultrasonic method for measuring the sinusoidal displacement by network analyzer¹⁾

Figure 1 shows a schematic diagram of when a sinusoidal displacement with frequency Δf occurs on

the object at a depth L_0 from the concave ultrasonic transducer with the focal length of L_0 . Ultrasonic waves were irradiated onto the object from the ultrasonic transducer driven by the network analyzer. Then, the S parameter for the first ultrasonic reflected wave received from the object's surface was measured in the frequency domain. In this study, the S parameter and its inverse Fourier transform were formulated theoretically. Figure 2 shows the amplitude characteristic of the S parameter in the time domain. There is the main peak corresponding to the ultrasonic propagation time when the object is stationary and the two side peaks corresponding to the sinusoidal displacement components. The maximum amplitude of the sinusoidal displacement of the object is estimated from the logarithmic amplitude decrease of the side peak to the main peak.

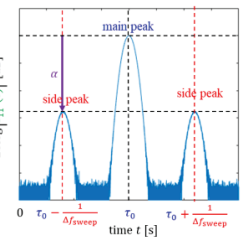
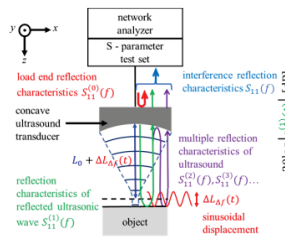


Fig.1. Schematic diagram of the measurement of the S parameter using a network analyzer.

Fig. 2. Amplitude properties of the S parameter in the time domain.

The proposed method was applied to measure sinusoidal displacements on the object in an order of micrometers from 10 to 300 Hz through a water tank experiment. Furthermore, the same displacements were measured using a laser displacement meter and used as references to evaluate the results of the proposed method. Figure 3 shows the relationships between the measured and reference values of the maximum amplitudes of the sinusoidal displacements for each Δf . As shown in Fig. 3, the measured sinusoidal displacements agreed well with the reference values. The average errors in measuring sinusoidal displacements from 0.5-1 μm , 1-15 μm and 15-50 μm were 0.11 μm , 0.38 μm and 1.00 μm , respectively. Therefore, the proposed method could accurately measure the amplitude of sinusoidal displacements on the micrometer order, even though 1-MHz ultrasonic waves were used.

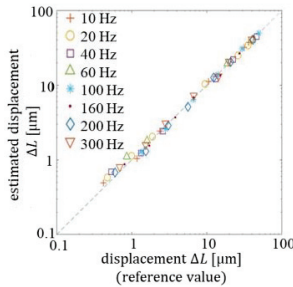


Fig. 3. The relationships between the measured and reference values of the maximum amplitudes of the sinusoidal displacements.

3. Experimental evaluation of viscoelastic properties of a phantom simulating biological soft tissue

Figure 4 shows an experimental system to estimate the viscoelastic parameter of the phantom. The sinusoidal displacement of frequency Δf on the surface of a biological phantom was generated by irradiating the phantom with the amplitude-modulated acoustic radiation force from two point-focusing ultrasonic transducers TR_1 and TR_2 . The maximum amplitude of the sinusoidal displacement was measured using a network analyzer and a point-focusing ultrasonic transducer TR_3 . The frequency characteristic of the maximum amplitude of the sinusoidal displacements was measured by varying the excitation frequency Δf from 5 to 1000 Hz. Similarly, the frequency characteristic of the acoustic radiation force was measured by exciting an accelerometer. The acceleration and displacement exhibit proportional relationships to stress and strain, respectively. Therefore, the frequency characteristic of the complex compliance was relatively calculated from their frequency characteristics. Thereafter, the viscoelastic parameter was estimated by fitting the relative frequency characteristic of the complex compliance to that of the Voigt model.

The phantoms simulating biological soft tissues were prepared by mixing graphite in a ratio of 2% to a urethane

resin. Three phantoms with different hardnesses were prepared using gels with Asker C hardnesses of 0, 5, and 15. Figure 5 shows the measured relative frequency characteristics of the complex compliances. For all phantoms, the calculated relative compliances were constant in the low-frequency range and decreased by -20 dB/decade in the high-frequency range. The results agreed well with the frequency characteristics of the complex compliances of the Voigt model. By fitting the measured frequency characteristics to the Voigt model, the ratios of G/η were estimated to be 210, 730, and 1,500 rad/s for the three phantoms with Asker C hardness values of 0, 5, and 15, respectively. Here, G and η are the elastic and viscosity moduli, respectively. Since the elastic modulus G increases as the phantom becomes harder, the estimated G/η were reasonable.

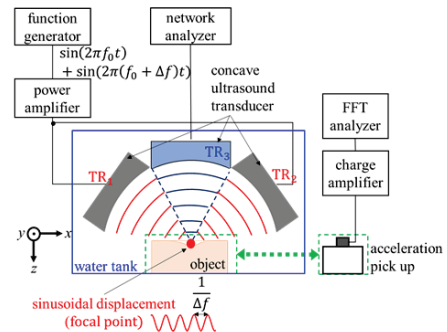


Fig. 4. Experimental system to estimate viscoelastic parameter of the phantom.

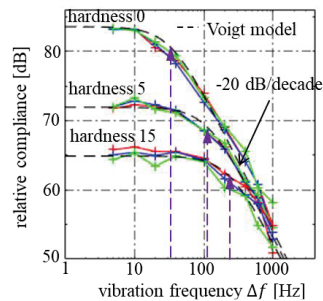


Fig. 5. Measurement results of frequency characteristics of complex compliance of the phantoms.

4. Conclusion

We proposed a method for measuring sinusoidal displacements using a network analyzer, demonstrating the capability to precisely measure displacements on the micrometer order. Moreover, the viscoelastic properties of a biological phantom were estimated using the proposed method. The estimated values were reasonable and reproducible, indicating that the viscoelastic properties of the object can be estimated stably.

Reference

- 1) Y. Komatsu, S. Mori, M. Arakawa, and H. Kanai, Rev. Sci. Instrum. **95**, 025105 (2024).

修士学位論文要約（令和6年3月）

結晶配向面の異なる Fe₄N 薄膜の異常ホール効果

佐藤 崇哉

指導教員：角田 匡清

Anomalous Hall Effect of Fe₄N Thin Films with
Different Crystallographic Orientations

Takaya SATO

Supervisor: Masakiyo TSUNODA

50 nm Fe₄N thin films were epitaxially grown on MgO(001) and MgO(110) single crystal substrates by DC reactive sputtering from a Fe target. Samples which were post-annealed could not be epitaxially grown on the MgO(110) substrates. However, samples which were substrate heated during deposition were able to be epitaxially grown on both MgO(001) and MgO(110) substrates. Of these samples, 2 samples with a good N site degree of order were chosen as the (001) and (110)-oriented samples. The transverse anisotropic magnetoresistance (Tr-AMR) and the anomalous Hall conductivity (AHC) of the (001) and (110)-oriented samples were measured. The Tr-AMR results showed that the (001)-oriented sample distorts tetragonally at low temperatures while the (110)-oriented sample distorts in a rhombic shape at low temperatures. The AHC results showed same temperature dependence regardless of crystal orientation, which suggests that if there is indeed a correspondence between the conventional understanding of AMR and the low-temperature anomaly of AHC, it does not necessarily mean that the low-temperature anomaly of AHC must always be due to tetragonal distortion.

1. はじめに

γ' -Fe₄N は fcc Fe の体心位置に N 原子が一つ入り込んだ構造をしている。Fe₄N は負のスピンの分極率を持ち、フェルミ準位 E_F での状態密度(DOS)によるスピンの分極率は-0.6 と計算されていて、大きさは他の 3d-遷移金属と大差ない。しかし、E_F での伝導電子のスピンの分極率は-1 に近い値になることも計算されている¹⁾。また、Fe₄N は比較的大きい異常ホール電導度(AHC)を示し²⁾、伝導電子のスピンの分極率からも Fe₄N はスピンの軌道トルク(SOT)磁化反転用スピンの流源としてのポテンシャルがある³⁾。

また、(001)配向した Fe₄N 薄膜の特徴として磁気輸送特性の低温異常が挙げられる。50K 以下で、異方性磁気抵抗(AMR)効果が大きく変化し^{4,5)}、異常ホール伝導度も同様に 50K 以下で急激に減少する⁶⁾。AMR 効果の低温異常は薄膜と基板の熱膨張係数差によって、Fe₄N の結晶格子が低温で立方晶から正方晶へと変化することが原因とされており⁷⁾、理論計算も実験結果と合致する⁷⁾。しかし、X線回折(XRD)による構造解析では低温での急激な格子歪みは実験の精度内で確認できていない⁴⁾。本研究では、(001)及び(110)配向した Fe₄N エピタキシャル薄膜の AMR 効果と異常ホール効果(AHE)の温度変化を測定することで、Fe₄N の格子歪みと磁気輸送特性との関係を議論した。

2. 実験方法

DC 反応性スパッタ法で MgO(100)と MgO(110)基板上に Fe₄N 薄膜を 50nm 成膜した。Fe ターゲットと Ar と N₂ の混合ガス(窒素流量比は 0~40%)を用いた。成膜後熱処理した試料(T_{an}=100~400°C)と、基板加熱成膜(T_{sub}=300~450°C)した試料を作成した。

作成した試料は XRD で結晶構造解析した後、ホールバーに加工し、物理特性測定システム(PPMS)で 4 端子法を用いて電流(I)/[100]の Transverse AMR(Tr-AMR)効果と AHE を測定した。

3. Fe₄N 薄膜の構造

成膜後熱処理した試料の in-plane XRD から、MgO(001)基板上の試料はエピタキシャル成長が確認できたが、MgO(110)基板上の試料ではエピタキシャル成長が確認できなかった。基板加熱成膜の試料では、in-plane XRD から MgO(001)と MgO(110)基板上の両方でエピタキシャル成長が確認できた。MgO(110)基板上の試料が成膜後熱処理ではエピタキシャル成長せず、基板加熱成膜でエピタキシャル成長する理由としては次のようなことが考えられる。

Fe₄N が成膜される最初の段階で、N がランダムに配置すると bcc 対称の Fe 骨格格子が成長するが、N が規則化されていると fcc 対称の Fe 骨格格子が基板上に成長する。MgO(110)基板上で bcc 対称の Fe 骨格格子は双晶成長をするため、薄膜全

面でのエピタキシャル成長を阻害する。また成膜後熱処理では双晶成長した bcc 対称の骨格格子を薄膜全面にわたってエピタキシャル関係が成り立つ fcc 骨格格子へと作り変えるためのエネルギーが足りない。一方で、基板加熱成膜では、基板に到達した Fe 原子が動き回るためのエネルギーが十分にあるため、Fe 格子中の N 位置が規則化され、骨格格子が fcc へと変化でき、Fe₄N がエピタキシャル成長しやすくなると考えられる。

以降では、基板加熱成膜された試料の中でも最も膜の出来が良い(001)配向試料(窒素流量比=25%, T_{sub}=350°C)と(110)配向試料(窒素流量比=25%, T_{sub}=400°C)について議論する。

4. (001)配向試料と(110)配向試料の Tr-AMR

図1に作成した(001)配向試料と(110)配向試料の Tr-AMR 曲線とそのフーリエ係数を示す。θ は電流と垂直な面内に印加した磁場の方向であり、立方晶 Fe₄N 格子の a 軸方向を基準として、(001)配向試料では膜面垂直方向、(110)配向試料では膜面垂直から 45° 傾いた方向を 0° と定義した。(001)配向試料では先行研究⁵⁾と同様、立方晶では存在しない cos²θ 成分が 50K 以下で急激に現われ、Fe₄N の格子が正方晶に歪んだものと考えられる。他方、(110)配向試料では低温での急激な cos²θ 成分の増大は認められず、その代わりにわずかな sin²θ 成分が生じた。このことは、温度低下に伴って Fe₄N の格子が単斜立方体(菱形柱)に歪んだ結果であると考えられる。

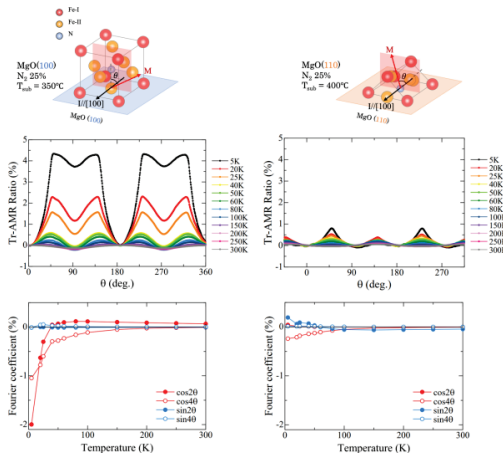


図1: (001)配向試料と(110)配向試料の Tr-AMR 比とそのフーリエ係数

5. (001)配向試料と(110)配向試料の AHC

図2に(001)配向試料と(110)配向試料の AHC を示す。AHC の温度変化に関しては(001)配向試料と(110)配向試料の両者で差はなく、先行研究⁶⁾と同様

な 50K 以下で急激な減少が認められた。このことは AMR 効果の低温異常の原因が格子歪による 3d 軌道の分裂と考えられる⁷⁾のに対して、AHC の低温異常の原因は格子歪によるものではないことを示唆している。

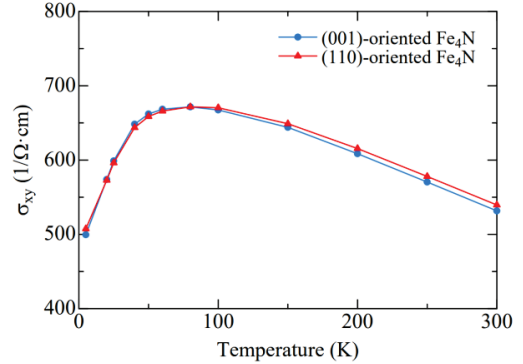


図2: (001)配向試料と(110)配向試料の AHC

6. まとめ

基板加熱成膜で(001)配向と(110)配向の Fe₄N エピタキシャル薄膜を作成した。それらの Tr-AMR 測定から、(001)配向試料では低温で正方晶に歪み、(110)配向試料では低温で菱形柱に歪むことが考えられた。配向により異なる結晶歪みが生じているため、d 軌道の縮退の解け方が変化し、AHC の低温異常にも変化が現れるとした予想に反して、(001)配向試料と(110)配向試料の AHC はほぼ一致した。これは AHC の低温異常の起源は AMR と異なるものであることを示唆している。

文献

- 1) S. Kokado, *et al.*, Phys. Rev. B 73, 172410 (2006)
- 2) K. Kabara, *APEX* 7 063003 (2014)
- 3) T. Taniguchi, *PR Appl.* 3, 044001 (2015)
- 4) M. Tsunoda, *et al.*, *APEX* 3, 113003 (2010)
- 5) K. Kabara, *et al.*, *AIP Adv.* 6, 055818 (2018)
- 6) K. Kabara, *et al.*, *AIP Adv.* 6, 055801 (2018)
- 7) S. Kokado, *et al.*, *JPSJ.* 84, 094710 (2015)

修士学位論文要約（令和6年3月）

電流計測プラットフォームを用いた高容量密度トレンチキャパシタの統計的計測に関する研究

鈴木 達彦

指導教員：黒田 理人， 研究指導教員：間脇 武蔵

A Study on Statistical Measurements of High Capacitance Density Trench Capacitors Using Current Measurement Platform

Tatsuhiko SUZUKI

Supervisor: Rihito KURODA, Research Advisor: Takezo MAWAKI

A newly designed current measurement platform, adaptable to various devices, was developed, and statistical measurements of gate leakage current and trap characteristics of trench capacitors were validated. The gate leakage currents closely aligned with results from the semiconductor parameter analyzer, demonstrating the platform's capability to measure tiny currents ranging from 10^{-16} to 10^{-13} A. Additionally, in trap characteristic analysis, a mean depth of trap level of 0.087 eV and a standard deviation of 0.017 eV were obtained, validating the statistical measurement capability. From the experimental results, it was considered that the trench structure increases the trap density at the Si/SiO₂ interface by approximately an order of magnitude compared to the gate stack structure. By utilizing the current measurement platform to measure current characteristics of various devices in a fast, precise, and large-scale manner, significant contributions to semiconductor research and development are anticipated.

1. はじめに

キャパシタ素子は半導体デバイスに必要不可欠であり、さらなる性能向上のために高容量密度化が求められている。Si 基板に溝を掘り 3 次元方向に容量を拡大するトレンチ構造は高密度容量化に有効である一方で、信頼性に関する研究報告は少なく統計的な評価が求められる。半導体素子の電流特性を統計的な評価可能な技術として電流計測アレイ回路が提案されている¹⁾。電流計測アレイ回路は 8 万のトランジスタのゲートリーク電流を 10^{-17} A の精度において約 80 秒で計測可能なテスト回路である。本研究では電流計測アレイ回路を発展させ、様々な素子に適用可能な電流計測プラットフォームを設計、トレンチキャパシタの高速・高精度・統計的な計測を検証した。

2. 半導体素子の高速・高精度・統計的計測手法

電流計測プラットフォームは被測定素子(DUT: Device Under Test)を形成した単位セルをアレイ状に配置してデジタル制御により計測を行う。図1に単位セルの回路図とトレンチキャパシタのモデル図を示す。トレンチの深さは 2 μ m、膜厚 7nm であり SiO₂ 膜が成膜されている。DUT に生じた電流は赤矢印に沿って積分キャパシタに蓄積し、式 1 のように電流-電圧変換されて各単位セルから信号出力される。

$$I_{INT} = C_{INT} \cdot dV_{INT}/dt \quad (1)$$

先行研究と比較して、DUT の正・負双方の微小電

流が計測可能かつ、各 DUT に生じる正味の電圧をモニタリングできる回路設計をしており様々な素子に適用可能なテスト回路である。図2に電流計測プラットフォームの回路図と全体の写真を示す。アレイセル 352^H×257^V の内 344^H×24^V にトレンチキャパシタを実装しており、水平・垂直シフトレジスタを動作させて各単位セルの信号を順次取得し、共通読み出し回路、出力バッファを経てチップ外部に読み出される。

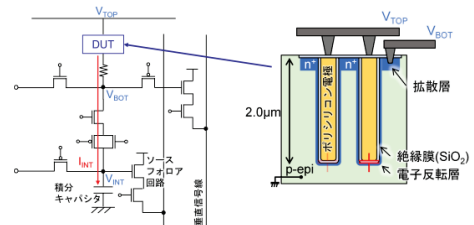


図1 単位セル図とトレンチキャパシタのモデル図

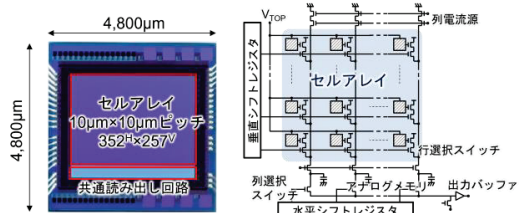


図2 電流計測プラットフォームの写真と回路図

3. トレンチキャパシタの電流特性に関する解析と考察

図3(a)に電流計測プラットフォームを用いて計測したトレンチキャパシタの電流-電圧測定結果を示す。グラフには外れ値として電流の最大・最小5%ずつを除いた平均値をプロットしている。ゲートリーク電流は $V_{DUT}=3.5V$ から指数関数的に増加し、 $10^{-16}\sim 10^{-13}A$ の範囲で計測している。(b)にトレンチキャパシタを100個並列接続したディスクリートTEGを半導体パラメータアナライザで計測した結果との比較を示す。赤枠部で両者の特性がよく一致していることから、電流計測プラットフォームを用いてトレンチキャパシタの高精度な微小電流計測を実証した。

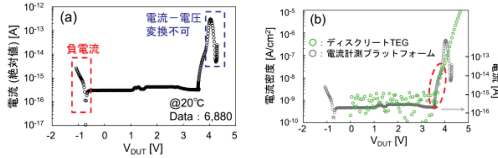


図3 トレンチキャパシタの電流-電圧特性結果

続いて、トラップ特性の計測手法の1つである Discharge Current Transient Spectroscopy(DCTS)を用いてトレンチキャパシタのトラップ準位の深さを計測した²⁾。DCTSは絶縁膜に捕獲された電荷が時間経過に伴って放出され、その放出レートは温度に依存することを原理としている。放出レート e_n は式2のように表される。ただし、 $E_c - E_t$ はトラップと絶縁膜伝導帯のエネルギー準位の差分である。

$$e_n = v \cdot \exp(-(E_c - E_t)/k_B T) \quad (2)$$

また、トラップによる放電電流は式3のように表される。

$$I_{dis}(t) = qSdN_t e_n \cdot \exp(-e_n t) \quad (3)$$

$qSdN_t$ は絶縁膜中に捕獲された電荷の総量であり、指数関数的に放出されるため指数関数フィッティングによって放出レートを算出することができる。式2よりトラップ準位の深さは温度依存性であるため、異なる温度で放電電流を計測することでトラップ特性を評価することができる。DCTSを電流計測プラットフォームに適用して計測した放電電流について、測定した644セルの内無作為に選んだ4セルの結果を図4に示す。グラフより放電電流は低温下であるほどトラップ電荷の放出に時間を要することが分かる。測定セル全ての放出レートからトラップ準位を算出し、ヒストグラム化した結果を図5に示す。平均値0.087eV、標準偏差0.017eVであり正規分布に従っている。トラップが顕著として知られるSiN膜の最小の準位が0.25eVであることから本結果は非常に小さな値である³⁾。SiO₂膜の特性から算出したトラップ準位はSi/SiO₂界面のダングリングボンドに由来すると考えられる。トラップの面積密度は式(3)から算出でき、 $10^{11}cm^{-2}$ オーダーであった。一般にゲートスタック構

造のトラップ面積密度は $10^{10}cm^{-2}$ と報告されることからトレンチ構造によって1桁大きい値が算出されたと考えられる⁴⁾。

図4 放電電流の過渡応答結果

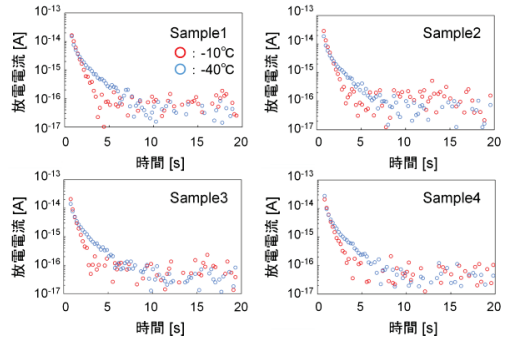
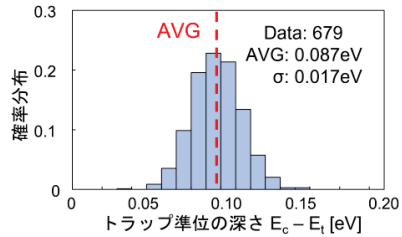


図5 トラップ準位の深さのヒストグラム



4. 結論

様々な素子への適応が可能な電流計測プラットフォームを新規に設計し、トレンチキャパシタのゲートリーク電流特性およびトラップ特性の統計的計測を検証した。ゲートリーク電流は半導体パラメータアナライザの結果とよく一致しており、電流計測プラットフォームで $10^{-16}\sim 10^{-13}A$ の微小電流を計測可能であることを示した。また、トラップ特性ではトラップ準位の深さの平均が0.087eV、標準偏差が0.017eVと得られたことにより統計的な計測を実証した。またトレンチ構造によってSi/SiO₂界面のトラップ密度がゲートスタック構造と比較して1桁程度大きくなる可能性について考察した。電流計測プラットフォームを用いて様々な素子の電流特性を高速・高精度・大規模に計測することで、半導体の研究開発に大きく貢献できる見込みである。

文献

- 1) Y. Kumagai et al., Jpn. J. Appl. Phys., 50, 106701, 2011.
- 2) H. Matsuura et al., Jpn. J. Appl. Phys., 34, L185, 1995.
- 3) H. Aozasa et al., JJAP, 2007, vol. 46, no. 9A, pp. 5762-5766.
- 4) S. M. Sze, Physics of semiconductor devices (3rd ed), John Wiley & Sons, New York, 1985.

修士学位論文要約（令和6年3月）

グラフェン-流動層界面の電位制御と発電特性

竹谷 透

指導教員：齊藤 伸， 研究指導教員：岡田 健

Potential Control of Boundary between Graphene and Flowing Water and Output Performance

Toru TAKEYA

Supervisor: Shin SAITO, Research Advisor: Takeru OKADA

Novel power generation system at the interface between graphene and flowing water that can be candidate for alternative power source for Internet of things (IoT) devices is investigated, aiming to understand roles of potential gradient at the interface. The generated electromotive force (EMF) is enhanced when negatively charged fluorocarbon (CF) films are used, indicating that the negative ζ potential induces the electric field at the interface. The generated EMF shows local maximum. The electric field perpendicular to the graphene affects carrier generation by electric field doping effect. The results of Raman measurements suggest that the different effects of doping upstream and downstream of graphene, and the different electronic states are the origin of the EMF.

1. 序論

近年インターネットオブシングス(IoT)と呼ばれる技術が広がっており、世界でネットに接続されるデバイスの数は2030年には290億に達すると予測されている。その中で環境からの情報収集に重要な役割を持つのがワイヤレスセンサーであり自立した電源が必要となる。新たな電源として、流水とグラフェンを利用した流動起電力が注目されている¹⁾。流動起電力には界面近傍の電位が重要な要素であることが示唆されているが²⁾、そのメカニズムについては議論が続いている。本論文では界面の ζ 電位と液中の電位勾配に注目し、マイクロフローチップで制御された流動状態下における起電力発生に関して研究を行った。

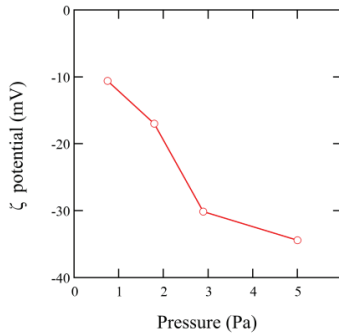
2. 実験方法

ζ 電位を制御するため炭素とフッ素からなるフルオロカーボン膜(CF膜)に注目した。オクタフルオロシクロブタン($c\text{-C}_4\text{F}_8$)を原料ガスに用いた化学気相蒸着法によって成膜した。CF膜で ζ 電位を制御した基板、およびガラス基板にグラフェンを転写し金電極を蒸着した。グラフェン/基板上にPDMS製のマイクロ流路を設置しリザーバー内の超純水や電解質水溶液をシリンジポンプで吸引することで水流を印加した。その際、電極間に外部抵抗を接続し出力が最大となるときの電圧を測定した。起電力(EMF)を算出し、チャンネル面積で規格化し、評価を行った

3. 基板の電位制御と発電特性

CF膜中の炭素とフッ素の結合状態(C-Fx およびC-CFx)は成膜圧力が高いとき増加する。その結果、

ζ 電位は負の電位に変化する(図1)。このことは前駆体分子のC-F結合解離の抑制に起因するC-F結合の分極によるものと考えられる。

図1 ζ 電位の成膜時の圧力依存性

ζ 電位を制御した基板で発電試験を行った結果、CF膜を用いると起電力が増加した(図2)。グラフェンに垂直な電界は電界ドーピング効果によってグラフェンのキャリア生成に影響を与え起電力に影響を及ぼすため、負の ζ 電位が界面近傍に急峻な電位勾配を誘起し、起電力に影響を与えたことが考えられる。

4. 溶液中の電位制御と発電特性

電解質であるNaClとMgCl₂の濃度を変化させることにより電気二重層(EDL)の厚さを制御した。発生した起電力はEDL厚さに依存し極大を示した(図3)。

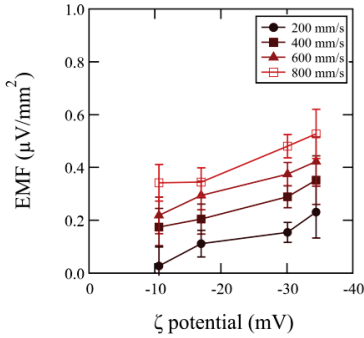


図2 起電力のζ 電位依存性

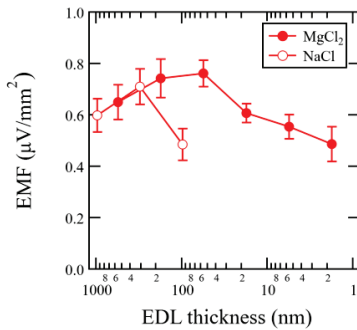


図3 起電力の EDL 厚さ依存性

薄い EDL は強い電界を誘起しグラフェンに高いドーピング効果をもたらす結果、起電力の上昇を招いていると考えられる。一方、アルカリ金属イオンのグラフェンへの物理吸着によるドーピング効果も報告されていることから³⁾、電解質によるドーピング効果については EDL とイオンの物理吸着の二つが影響すると考えられる。

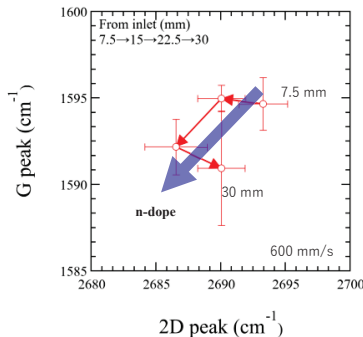


図4 流路内でのドーピング効果の変化

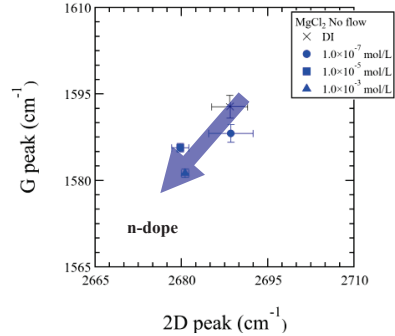


図5 電解質水溶液濃度に対するドーピング効果の変化

ラマン測定によって流れの存在下でグラフェンの電子状態を調べた結果、流れの上流と下流では電子状態が異なることが分かった(図4)。また、電解質水溶液は水流が存在しない状態においても溶液濃度に依存して n ドープされることが分かった(図5)。このことによって EDL によるグラフェン垂直電界のドーピング効果が強くなると考えられる。

このようにグラフェンの電子状態は流路内の位置と電解質濃度によって異なる。これは流動の状態によって EDL 形成が異なることためだと考察した。本実験で用いた流路では、乱流である流路入口から助走区間を経て層流にシフトしていく。乱流下では EDL 形成は抑制されるが、下流側の層流下では、グラフェン近傍の流速が0になるため、EDL が形成される。一方、電解質の濃度の増加によって EDL 厚さは薄くなり、ドーピング効果が強まる。のように、ドーピングに対する EDL の影響は流れ方向に沿って連続的に変化する。この変化はグラフェンのキャリア密度の差を生み出し、起電力の発生要因であると考えられる。

5. まとめ

本論文では発生起電力と界面電位との関係を調べることを目的に研究を行った。起電力は界面電位に強く依存した。このことから、グラフェンの垂直電界で誘起されるドーピングが発電システムの全体像を明らかにする鍵となる事が考えられる。これらの結果は最適な発電システムの設計に役立つ知見を提供する物である。

文献

- 1) K. Kuriya *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 117, no. 12, 123905, 2020.
- 2) S. S. Kwak *et al.*, *ACS Nano*, vol. 10, no. 8, pp. 7297–7302, Aug. 2016.
- 3) K. Kwon *et al.*, *J. Phys. Chem. C*, vol. 118, no. 15, 8187–8193, Mar. 2014.

修士学位論文要約（令和 6 年 3 月）

高解像度軟 X 線 CMOS イメージセンサに向けた
高効率信号読み出し画素技術に関する研究

塚田 一成

指導教員：黒田 理人

A Study on Highly Efficient Signal Readout Pixel Technology
for High-Resolution Soft X-ray CMOS Image Sensors

Issei TSUKADA

Supervisor: Rihito KURODA

This paper presents a highly efficient signal readout pixel technology as a technique to solve the trade-off between various performances of CMOS image sensor (CIS). The technology in this study enables higher precision and faster soft X-ray analysis than ever before by reducing the output data rate by two-thirds while maintaining the performance of the CIS. Therefore, it can make the best use of the high-brilliance soft X-rays available at the next-generation synchrotron radiation facility Nano Terasu, and is expected to contribute to various fields such as science, medicine, and industry.

1. はじめに

物質の微細な構造や性質の分析を可能とする放射光施設は、科学用途のみならず産業用途でも様々な課題の解決に資するツールとして欠かせない存在となっている。東北大学青葉山新キャンパスに建設中の次世代放射光施設 NanoTerasu では既存の国内放射光施設に比べ非常に高輝度な軟 X 線の利用が可能となり、分析に要する時間の短縮に伴うスループットの向上やダイナミクス観測が期待されている。中でも軟 X 線を試料に照射し、遠方においてブラウンホーフアー回折像を撮像するコヒーレント軟 X 線回折イメージング¹⁾は、磁気構造や化学状態の可視化に適した分析手法として急速に発展している。そこで高輝度な軟 X 線に対応可能な検出器が必要であり、開発中の検出器は広ダイナミックレンジ、高解像度、高フレームレートの性能を満たす見込みがある。図 1 に CMOS イメージセンサ(CIS)の性能間における関係を示す。開発を行っている検出器は高性能ゆえ出力データレートが膨大であり、画像処理システムへの大きい負荷が懸念される。そこで、本研究の目的は、CIS の性能を維持しつつ出力データレートを低減する技術を提案し、さらなる性能向上を図った軟 X 線検出器向け CIS を創出することである。

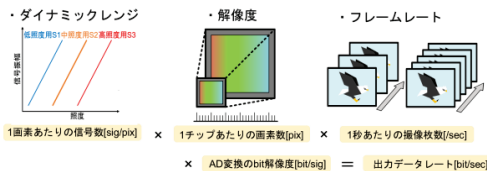


図 1: CIS の性能間における関係

2. 軟 X 線検出 CMOS イメージセンサの設計

複数の感度の信号を取得し合成することでダイナミックレンジを拡大する方式は、照度に関わらず全ての信号を出力するため、不要な信号が出力データレートの増加になっている。そこで、画素内に照度を判定する機構を設け、照度に応じた信号を読み出すことで、1画素当たりの信号数を削減でき、出力データレートを低減することが可能である。今回、開発する CIS は、低照度用信号 S1、中照度用信号 S2、高照度用信号 S3 の 3 信号を取得する方式である。3 信号から 1 信号を選択し読み出すことが理想的ではあるが、少ない素子数で実現した画素内光量判定による 1 信号読み出しでは、素子の特性ばらつきによる影響が大きく信号切り替わり点のばらつきを許容することが難しくなる。そこで S2 の信号電圧の大きさから、S1 か S3 を選択し、S2 を含む 2 信号読み出しを行うことで、ある程度ばらつきに対して余裕を持つことが可能になる。設計した光量判定回路のキーテクノロジーを図 2 に示す。S2 の信号電圧を判定する回路にソース接地回路を選択した。ソース接地回路であれば、少ない素子数で判定回路を実現できるため、限られた面積の画素内で S2 の信号電圧を High か Low で判定可能である。

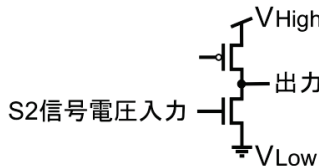


図 2: 光量判定回路のキーテクノロジー

開発したイメージセンサの画素回路図を図 3、画素駆動動作タイミングを図 4 に示す。本研究では広ダイナミックレンジ性能を達成するために2段LOFIC²技術を採用した。PD から溢れた光電子を2つのLOFIC容量に蓄積し、信号として読み出すことで、単一露光・単一PD・線形応答でのダイナミックレンジ拡大が可能である。SF1の後段部には信号保持用のアナログメモリ(AM)を配置し、グローバルシャッタ動作を可能としている。LOFIC容量やAMには高容量密度のトレンチキャパシタ³⁾を適用し、面積効率を高めている。さらに、今回設計したソース接地回路を用いた光量判定回路を設けている。光量判定回路の出力の結果からCS、CNのトランジスタを制御することで、AMへサンプリングする信号を選択する。サンプリングはS1、S2、S3の順で行う。まず、S1をAMにサンプリングを行う。S2をアナログメモリにサンプリングする際に、ソース接地回路の入力部にS2の信号電圧を入力し、光量判定回路を駆動する。低照度時、光量判定回路はLowを出力し、CSをオフにすることで、このあとサンプリングするS3はAMにサンプリングすることができずS1が保持される。高照度時、光量判定回路はHighを出力し、CSをオンにすることで、S3はAMに保持されているS1に上書きされて、サンプリングされる。N信号も同様の動作でサンプリングされる。N信号はS信号に対応するリファレンス信号であり、相関二重サンプリングにより熱ノイズを除去する。以上の動作から、低照度時はS1、S2を、高照度時はS2、S3信号の読み出しを行う。光量判定回路を導入することで、AMの個数、読み出す信号数、消費電力を3分の2に削減可能である。

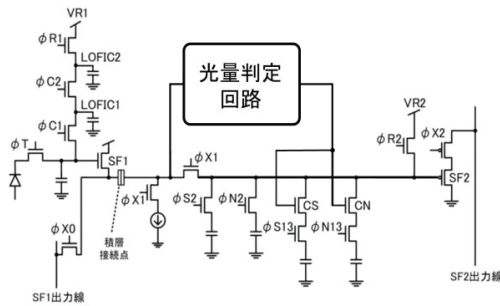


図 3:画素回路図

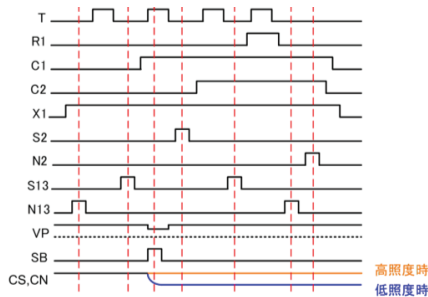


図 4:画素駆動タイミング

3. 動作検証シミュレーション

設計した CIS の動作検証シミュレーションを行った。光電変換のシミュレーションの結果を図 5 に示す。シミュレーションの結果から、S1、S2、S3 の 3 信号とも低照度側から飽和点まで、途切れることなく線形な信号を得ることができている。制御信号の電圧が判定回路の出力電圧である。制御信号の電圧が切り替わる点を読み出す信号の切り替わり点である。信号切り替わり点の照度よりも低い照度であるときは低照度と判定し、S1 と S2 の 2 信号を読み出す。高い照度の時は高照度と判定し、S2 と S3 の 2 信号の読み出しを行う。信号切り替わり点ちょうどの照度であった場合、照度の判定は行えないが、S2 は必ず読み出すことで、線形で途切れることのない信号読み出しを行うことが可能である。したがって信号の切り替わり点は、S2 の線形範囲内に収まればよく、多少信号切り替え点がばらついて、問題なく動作が実現可能である。シミュレーションの結果から、画素内光量判定を用いた高効率信号読み出しの動作が、実現可能である見込みがあると判断した。

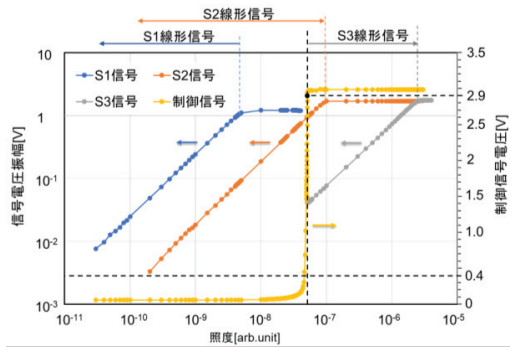


図 5:動作シミュレーション

4. まとめ

出力データレートを低減する技術として、高効率信号読み出し画素技術の開発を行った。本研究の技術は、従来以上に高精度・高速な軟 X 線分析が可能になる。そのため、次世代放射光施設 Nano Terasu で照射可能な高輝度軟 X 線を最大限活かすことが可能であり、科学、医学、産業など様々な領域において貢献できるものと考えられる。また、本研究の技術は軟 X 線向けの CIS の領域に留まらず、一般的な CIS にも適用できる技術であるため、CIS のセンシングの領域においてさらなる技術促進が考えられる。

文献

- 1) J. Miao et al., Science, vol.348, no.6234, pp. 530–535, 2015.
- 2) Y. Fujihara, et al., IEEE TED, vol.68, no.1, pp. 152–157, 2020.
- 3) M. Suzuki et al., IEDM (2017), pp. 8.5.1–8.5.4.

修士学位論文要約（令和6年3月）

光負帰還狭線幅半導体レーザーの線形周波数掃引幅拡大に関する研究

長久保 峻介

指導教員：八坂 洋， 研究指導教員：吉田 真人

Study on Linear Frequency Sweep Range Expansion of
Optical Negative Feedback Narrow Linewidth Semiconductor Laser

Shunsuke NAGAKUBO

Supervisor: Hiroshi YASAKA, Research Advisor: Masato YOSHIDA

In this study, I demonstrated an expansion of frequency sweep range of optical negative feedback narrow linewidth semiconductor laser by using a thermally frequency tunable silicon ring filter as an optical negative feedback filter. The modulation speed in a synchronous control between the semiconductor laser and the silicon ring filter was optimized at 100 Hz. Under this condition, the frequency sweep range of the optical negative feedback semiconductor laser was successfully extended to 10 GHz while the laser linewidth was narrowed from 8 MHz to 1.4 MHz.

1. はじめに

近年、センシング技術の需要拡大に伴い、光を用いた測距技術である LiDAR (Light detection and ranging) に注目が集まっている。LiDAR の中でも FMCW (Frequency-modulated continuous-wave) 方式は、出射光強度を押さえた状態で測距可能距離を広げやすく、光の強度ではなく周波数成分のみを利用するため比較的外部光の影響を受けづらいついた利点があり自動運転への応用において有望である。FMCW 方式では距離分解能の向上には周波数掃引幅の拡大が必要であり、同時に、ビート周波数から正しく距離を算出するためには、周波数掃引波形の線形性も重要となる。また、FMCW 方式で長距離測距を実現するためには FM (Frequency-modulation) ノイズを低減したスペクトル線幅の狭いレーザー光源を用いる必要がある。本研究では、半導体レーザーの発振スペクトル線幅狭窄化手法として、コンパクトな光フィルタからの帰還光を用いる光負帰還法を提案しており、本手法を用いた先行研究では FP エタロンを用いた光負帰還狭線幅半導体レーザーに直接周波数変調を施し、光負帰還状態で 162 MHz の線形周波数掃引を実現することで、260 m の距離計測に成功したことが報告されている¹⁾。しかしながら、先行研究では FP エタロンの透過特性は固定されており、その透過帯域幅によって光負帰還状態で周波数掃引できる幅が制限されていた。光負帰還用フィルタの共振周波数を半導体レーザーと同期制御することでその周波数掃引幅を広げることができれば長距離かつ高分解能な FMCW LiDAR 光源としての応用が期待される。本研究では、光負帰還用フィルタとして過熱により周波数が可変な Si リングフィル

タを用い、光負帰還狭線幅半導体レーザーの周波数掃引幅を拡大することにより、FMCW LiDAR 応用における距離分解能の向上を目指した。

2. 光負帰還法による半導体レーザー発振スペクトル線幅狭窄化

半導体レーザーの発振スペクトル線幅の狭窄化には FM ノイズパワースペクトル密度のうち特に低周波数側のノイズレベルを抑制することが重要となる。本研究では光負帰還法を用いることでこの達成を目指す。実際に Si リングフィルタを用いた光負帰還狭線幅半導体レーザー光源について、FM ノイズ特性および発振スペクトル線幅を評価する実験を行った結果、フリーラン時に比べて光負帰還時の FM ノイズパワースペクトル密度は 1 GHz 以下の周波数範囲で 1 桁程度低減していることと、測定結果と伝達関数モデルによる計算結果が概ね一致していることが確認できた。また、Si リングフィルタの透過特性を固定した状態で光負帰還狭線幅半導体レーザー光源の周波数掃引実験を行い、光負帰還が正常にかかる周波数掃引幅が約 2 GHz であることを確認した。

3. 光負帰還用光フィルタの同期制御

Si リングフィルタの共振周波数はヒータを用いて熱制御されるため、DFB レーザに比べると応答速度に限界がある。そこで、最初に周波数変調速度の最適値の検討を行った。ヒータ電圧を制御して Si リングフィルタの共振周波数を三角波変調し、そこへ周波数一定の DFB レーザ光を結合させた場合のその透過光電力を測定した。図 1(a)および(b)にそれぞれ変調周波数を 100 Hz、および 1 kHz に設定した際の透過光電力の測定結果を示す。青線が透過光電力波形、

オレンジ線が後半を折り返して前半と重ねた波形である。これらの図における前半と後半の波形の対称性から、応答速度の上限は 100 Hz であることがわかった。次に、DFB レーザと Si リングフィルタの同期制御のアルゴリズムを構築した。レーザの周波数掃引幅を負帰還がかかる範囲から外れないよう約 1 GHz ステップで徐々に大きくし、その際、フィルタの光透過電力が一定になるようにヒータ電圧でフィルタの共振周波数を同期制御した。具体的には、レーザの周波数を掃引するための注入電流とフィルタのヒータ電圧を交互に制御するプログラムを作成し、これらの同期制御を自動化した。予備実験として、DFB レーザと Si リングフィルタの間に光アイソレータを挿入し、光負帰還が無い状態で同期制御を行った。その結果、10 GHz の周波数掃引幅において 1% 以内の周波数誤差で同期制御を実現した。

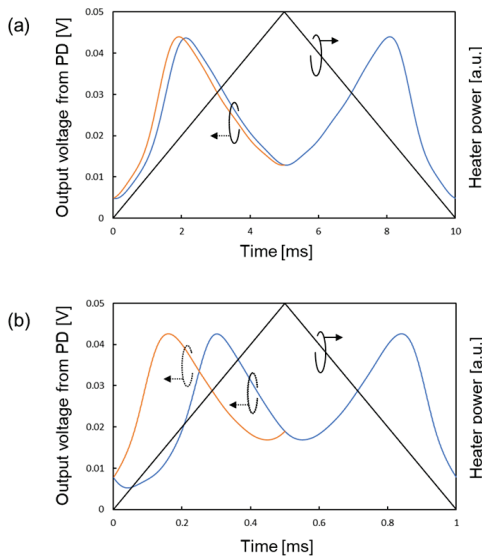


図1 Siリングフィルタ掃引特性の測定結果
(a)変調周波数 100 Hz、(b)変調周波数 1 kHz

4. 光負帰還状態での周波数同期制御特性評価

最後に、光負帰還した状態において DFB レーザと Si リングフィルタの同期制御を行った。その際、Linear update algorithm²⁾を適用して DFB レーザの周波数掃引特性の線形補正を行った。

同期制御を行った状態で 10 GHz まで周波数掃引幅を拡大した際の光負帰還狭線幅半導体レーザの周波数掃引波形を図 2 に示す。赤線が目標波形、青線が測定値である。図に示すように 1.4% の周波数誤差で線形掃引を実現することに成功した。また、この状態において遅延自己ホモダイン型コヒーレント検波法³⁾を用いて測定した DFB レーザの FM ノイズ

パワースペクトル密度を図 3 に示す。赤線と黒線はそれぞれ光負帰還時とフリーラン時の特性を示している。光負帰還条件下での FM ノイズは、フリーラン時と比較して低減し、このときレーザの線幅は 8 MHz から 1.4 MHz に狭窄化されていることが確認できた。Si リングフィルタと DFB レーザの結合効率を上げることで、さらなる FM ノイズの低減が期待できる。

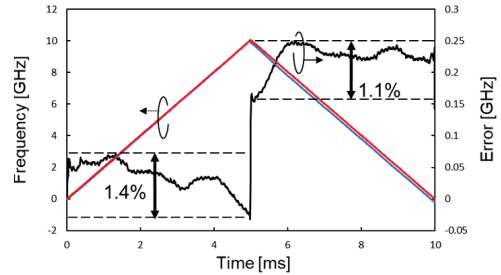


図2 周波数掃引幅拡大実験結果
(DFBレーザの周波数掃引波形)

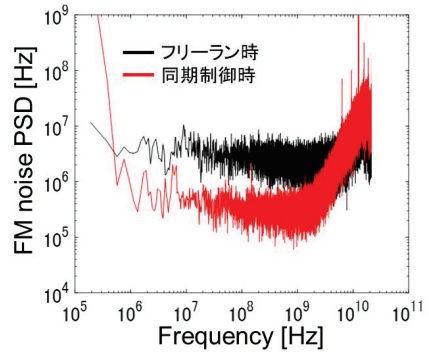


図3 同期制御状態におけるDFBレーザのFMノイズパワースペクトル密度

5. まとめ

本研究では、光負帰還狭線幅半導体レーザを FMCW LiDAR 光源へ応用する際の距離分解能の向上のため、本レーザの周波数掃引幅の拡大技術を研究開発した。光負帰還が無い状態で 10 GHz の周波数掃引幅に対して 1% 以内の誤差で Si リングフィルタと DFB レーザの同期制御が行えることを実証した。これに光負帰還を導入し、レーザ線幅を 8 MHz から 1.4 MHz まで狭窄化した状態で、1.4% の線形性誤差で 10 GHz の周波数掃引幅を実現した。

文献

- 1) N. Yokota, H. Kiuchi, H. Yasaka, Opt. Express. 30, 11693 (2022).
- 2) X. Zhang, J. Pouls, M. C. Wu, Opt. Express 27, 9965 (2019).
- 3) K. Kikuchi, Opt. Express 20, 5291 (2012).

修士学位論文要約（令和6年3月）

アンモニア触媒合成用 Al-Mo-B 層状化合物の形成

梨本 一樹

指導教員：齊藤 伸， 研究指導教員：岡田 健

Fabrication of Al-Mo-B Layered Compounds for Catalysts of Ammonia Synthesis

Kazuki NASHIMOTO

Supervisor: Shin SAITO, Research Advisor: Takeru OKADA

In this study, catalytic synthesis of ammonia at ambient-condition method as an alternative candidate for the Haber-Bosch process is investigated. Layered borides, including AlB₂ and Mo-Al-B thin films were prepared by sputtering and followed by calcination. The relationship between crystallinity and material properties, such as electrical conductivity, surface structure, and bonding states are evaluated. Single crystalline boride can be formed at optimum condition. The catalytic synthesis of ammonia from nitrogen was clearly observed by electrochemical method. These results are important factor to develop catalysis for ammonia synthesis in an ambient condition.

1. 研究背景

現在主流なアンモニア製造法であるハーバー・ボッシュ法は大量のエネルギーを消費するため、代替法の開発が望まれている。近年、触媒を用いて室温大気圧条件下で窒素を還元する電気化学窒素還元反応(NRR: Nitrogen Reduction Reaction, $N_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 2NH_3$)が注目されている¹⁾。報告されているNRR電極触媒の多くは、耐久性が低く、収率も低い。そこで、新たな触媒材料の候補として、優れた電気特性と耐久性を有し、体積当たりの表面積が大きい二次元ホウ化物に注目した。一方、遷移金属のd軌

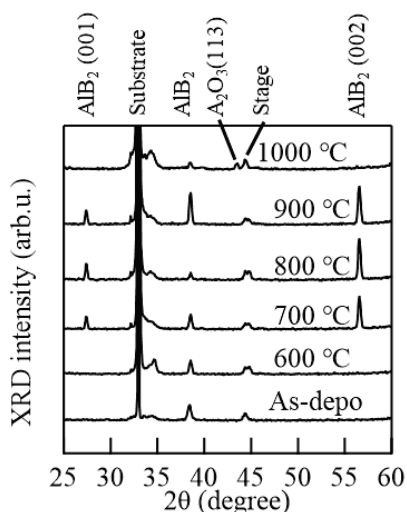
道電子はこのような触媒能力の向上に有効である。こうしたホウ化物に遷移金属を添加することで耐久性に優れた新たな触媒材料の創生が可能であると考えた。本研究では、二次元ホウ化物にAlB₂を、遷移金属にMoを用い、Al-Mo-Bの金属薄膜を作製し、その結晶構造、結晶方位、ベール面やエッジと触媒作用との関係を検証した。

2. 実験方法

薄膜は高周波マグネトロンスパッタ法により、Si基板上に成膜した。AlB₂をターゲットに用い、コスパッタリングを行う際はMoのメタルチップをエロージョン上に配置した。成膜後の薄膜は電気炉を用いて焼成した。焼成後の薄膜はXRD(X-ray Diffraction)測定、四探針法による抵抗率測定、SEM(Scanning Electron Microscopy)による表面構造観察、EBSD(Electron Backscattered diffraction)測定、XPS(X-ray photoelectron spectroscopy)測定、電気化学測定を行った。

3. 金属ホウ化物薄膜の形成

熱処理後の結晶性を評価するためにXRD測定を行った(図1)。焼成後の薄膜からピークが確認され、AlB₂薄膜は700℃程度の温度で結晶化することが分かった。27.4°、56.5°のピークは各々AlB₂(001)、(002)と同定した。1000℃焼成ではピークは観測されず、抵抗率測定結果において絶縁性を示した。このことから、高温での焼成により薄膜の結晶構造が変化、あるいは失われたと考えられる。SEMによる観察結果を図2に示す。焼成温度700℃、800℃においては表面に六角形の構造が多数析出し、900℃以上では、表面に薄片状の構造が析出した。

図1 作製したAlB₂薄膜のXRD測定結果

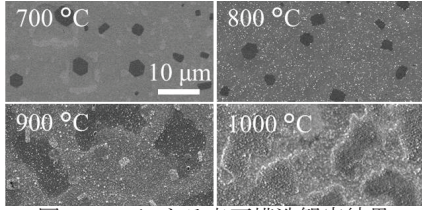


図 2 SEM による表面構造観察結果

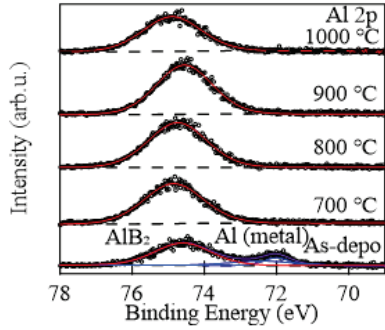


図 3 AIB₂ 薄膜の Al 2p についての XPS 測定結果

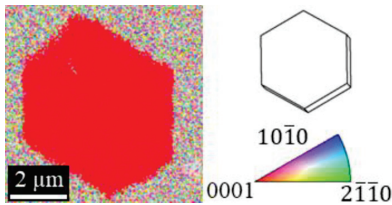


図 4 EBSD 測定結果

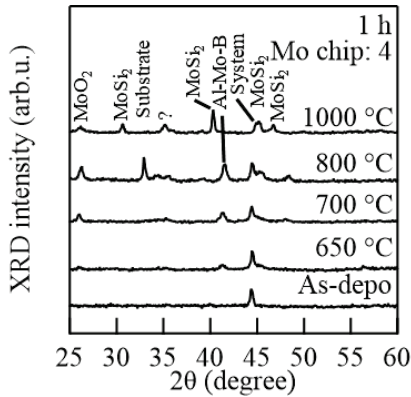


図 5 コスパッタした薄膜の XRD 測定結果

化学結合状態を分析するために XPS 測定を行った (図 3)。As-depo 膜では 72.0 eV に金属 Al、74.5 eV に Al-B のピークが確認された。700 ~ 900 °C で Al-B のピーク位置が低エネルギー側にシフトし、Al と B の電子の総作用の量が減少している。このことは膜中の B の量が減少していることを示している。1000 °C 焼成においてはピーク位置が高エネルギー側にシフトした。これは B 脱離

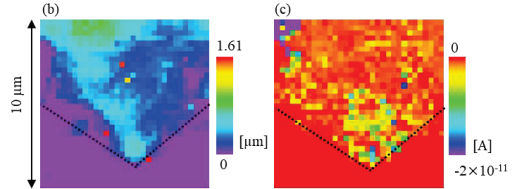
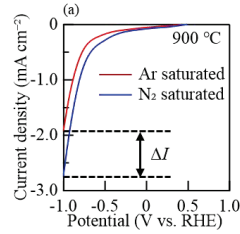


図 6 (a)900 °C で焼成した AIB₂ 薄膜を作用極に用いた LSV 測定結果 (b)SECCM 測定における Topo 像 (c)電流値イメージング測定結果

により膜表面に暴露した Al が大気中で酸化し、Al₂O₃ が形成されたことが原因だと考えられる。以上のことから、AIB₂ の結晶化は 700 °C 以上が適しており、高温では B が脱離することが分かった。

EBSD 測定では、SEM で確認された六角形の構造が AIB₂ 単結晶であることが分かった (図 4)。

Mo メタルチップを利用してコスパッタリングを行った薄膜を焼成し、XRD 測定を行ったところ、Al-Mo-B の XRD ピークが確認された (図 5)。高温では Mo が Si 基板へ拡散した。Mo 添加濃度と焼成温度を最適化させることで Al-Mo-B の三元系薄膜作製が可能であることが分かった。

4. 窒素還元触媒反応の評価

焼成後の AIB₂ 薄膜を作用極として、LSV (Linear Sweep Voltammetry) 測定を行った (図 6)。Ar 飽和溶液中では水素発生反応が、N₂ 飽和溶液中では NRR が起きていると想定される。900 °C では還元電流の値に差が見られた。これは NRR が起きていることを示している。以上のことから AIB₂ 単体で NRR 触媒能を有することが分かった。SECCM によるイメージング測定結果では、Topo 像において SEM で見られた六角形の構造と思われる部分の一部が確認され、その部分において一部還元電流が観察された。

5. まとめ

本論文ではスパッタと焼成により層状ホウ化物薄膜を作製した。最適な条件下では AIB₂ 単結晶形成に成功し、電気化学測定により NRR 触媒能が観測された。

文献

- 1) F. Yang et al., Nano-Micro Lett., 12, 1 (2020)

修士学位論文要約（令和6年3月）

半導体レーザーの広帯域・高感度光変調周波数応答評価法に関する研究

野原 友治

指導教員：八坂 洋

Study on Wide-Bandwidth and High-Sensitivity Measurement Technique of Optical Modulation Response

Tomoharu NOHARA

Supervisor: Hiroshi Yasaka

In this study, I demonstrated wide-bandwidth and high-sensitivity modulation response evaluation method for semiconductor lasers without the influence of device parasitic effect by using optical modulation and optical spectrum measurement. The important thing is the lock-in detection of the optical spectrum, including the modulated sidebands produced by envelope modulated optical pumping lasers with constant power. Using this method, I can improve the signal-to-noise ratio (SNR) by 23 dB and evaluated the modulation response up to 75 GHz even though the 3-dB bandwidth of the distributed feedback (DFB) laser under test was only 11 GHz.

1. はじめに

近年、データセンタにおける膨大なトラフィックに対応するため、小型で低コストな直接変調半導体レーザー(DML : Directly Modulated Laser)の需要は増しており、光子共鳴(PPR : Photon-Photon Resonance)効果を利用した周波数応答の広帯域化が報告されている¹⁾。PPR 効果を利用して第2の共振ピークを形成し、半導体レーザーの変調帯域幅を広げることができるが、デバイス構造や動作条件の最適化が必要となる。そのため、周波数応答特性へのデバイス寄生容量の影響を排除した動作特性を評価できれば PPR 導入効果の最適化が行える。さらに、電極パッド等の周波数特性に影響されない半導体レーザー固有の広い変調帯域幅を利用したフォトニックコンピューティングの需要も近年高まっている²⁾。これらの背景から、本研究では光変調と光スペクトル測定により、デバイスの寄生容量の影響を受けない半導体レーザーの広帯域・高感度光変調周波数応答評価法を開発した。重要なのは、一定のパワーで包絡線変調されたポンプ光レーザーによって生成される変調サイドバンドを含む光スペクトルのロックイン検出である。結果として、3 dB 帯域幅 11 GHz 程度の DFB レーザにも関わらず、信号雑音比(SNR)を 23 dB 改善し、75 GHz までの周波数応答を評価することができた。

2. 半導体レーザーの変調方法

被測定半導体レーザーに2つの周波数可変ポンプレーザーを混合して発生させた光ビート信号を入力することで、電流注入によるキャリア密度の変調を模擬し、電極パッド等の影響を排除した広帯域な変調を実現した。一方で、ポンプレーザーを変

調して参照信号として利用できれば、ロックイン検出を用いて光スペクトルの SNR を改善することができる。しかし、ポンプレーザーの平均パワーが低周波で変化すると、光励起時の熱効果により被測定半導体レーザーの光スペクトルが時間によってシフトしてしまう³⁾。この現象を抑制するため、本研究では、光弾性変調器(PEM : Photo Elastic modulator)を用いて各ポンプレーザーを一定のパワーで差動変調する特殊な変調器構成を用いた。図1に変調器構成を、図2にポンプレーザー光の差動変調結果を示す。1.47 GHz の高周波変調信号が 84 kHz で、一定の平均パワーで差動変調されていることが確認できる。

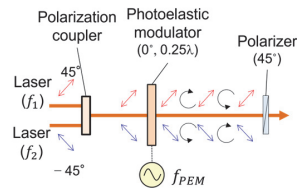


図1 差動変調器構成

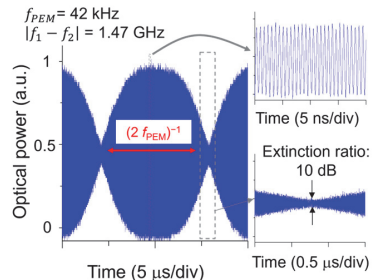


図2 ポンプ光の強度変調波形

3. 半導体レーザの周波数応答特性測定実験

図3に、半導体レーザの周波数特性測定の実験系を示す。光による広帯域な変調を実現するために、2台の1480 nm付近で動作するDFBレーザを使用しており、互いの周波数差を温度によって制御した。周波数応答の測定サンプルレーザとして、1549 nmで動作するDFBレーザを使用し、その出力光を高い周波数分解能を簡便に得られるコヒーレント OSA (OSA: Optical Spectrum Analyzer)を用いて測定した。この構成で得られた周波数分解能は約0.2 GHzであった。

図4に、変調周波数3.1 GHzにおけるロックイン検出ありとなしのスペクトルの比較結果を示す。また、参考のために、市販の回折格子型 OSA(周波数分解能1.3 GHz)を用いた測定結果も示している。コヒーレント OSAを用いることで大幅な分解能向上、さらにロックイン検出による大幅なノイズ低減(23dB)が確認できた。このノイズ低減によって、周波数変調によって発生する2次の変調サイドバンドも明瞭に確認することができた。

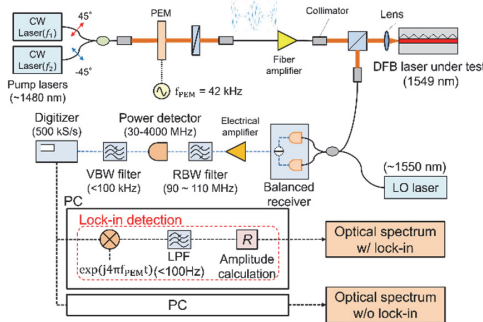


図3 周波数応答測定系

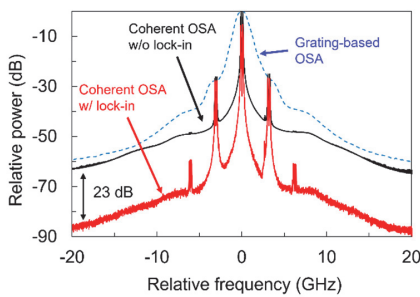


図4 変調周波数3.1 GHzにおける光スペクトルの比較

4. 半導体レーザの広帯域・高感度光変調周波数応答測定結果

半導体レーザの変調応答には振幅変調(AM: Amplitude Modulation)成分と、周波数変調(FM: Frequency Modulation)成分が含まれており、光スペ

クトルを測定することで分離することができる⁴⁾。このFM成分を除去し、AM応答の周波数依存性を評価することで、半導体レーザの周波数応答を評価した。図5に周波数応答の測定結果を示す。被測定半導体レーザの3 dB帯域幅は11 GHzであり、ロックイン検出なしのコヒーレント OSAを用いた測定では、SNRが不十分のため30 GHz以上の応答特性の評価が不可能であった。ロックイン検出を用いた測定では、SNRが23 dB改善されており、変調周波数応答を75 GHzまで測定することができている。また、典型的な半導体レーザの理論曲線とフォトダイオードと電気スペクトラムアナライザを用いて30 GHzまで測定した結果も示しており、これらが理論曲線に一致していることは、コヒーレント OSAを用いて測定したAM応答測定結果の妥当性を示している。

5. まとめ

本研究では、光変調と光スペクトルの測定による半導体レーザの広帯域・高感度光変調周波数応答評価法を実証した。2台のフリーランのCWレーザをポンプ光として測定対象の半導体レーザを光変調することで、電極パッドの影響を排除しつつ広帯域に測定対象の半導体レーザを変調し、高周波数分解能なコヒーレント OSAにロックイン検出を適用することで、高感度に光スペクトルを測定できることを確認した。測定した光スペクトルから、FM-AM 応答を分離し、AM 応答のみを導出することで、3 dB帯域幅が11 GHzの半導体レーザにも関わらず応答感度を23 dB改善し、周波数応答を75 GHzまで測定できることを実証した。

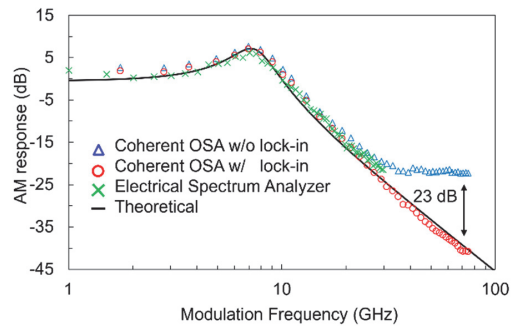


図5 半導体レーザの周波数応答測定結果

文献

- 1) M. Raziunas, et al., IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., 13 (1), pp.136-142 (2007).
- 2) G. Alagappan, et al., Photonics, 9 (2), 75 (2022).
- 3) S. Kobayashi, et al., IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. 30 (4), pp.428-441 (1982).
- 4) N. H. Zhu, et al., J. Physics D: Appl. Phys., 39 (21), pp.4578-4581 (2006).

修士学位論文要約（令和6年3月）

下腿部慣性センサによる異常歩行評価の
時空間パラメータの簡略的推定法の基礎研究

長谷川 真之

指導教員：渡邊 高志

A Basic Study on Simplified Estimation Method of Spatio-Temporal Parameters
for Abnormal Gait Assessment Using Lower Leg IMUs

Sanayuki HASEGAWA

Supervisor: Takashi WATANABE

Spatio-temporal parameters such as gait events, stride length and walking speed provide useful information for gait evaluation. The estimated stride length and walking speed obtained from the inertial measurement unit (IMU) attached to the lower leg have been reported to be stable. Therefore, the purpose of this study was to develop a simplified method for estimating spatio-temporal parameters using an IMU attached to the lower leg for circumduction gait and steppage gait. In our previous study, the stride length and walking speed estimation method required calibration. Therefore, a method was developed to estimate stride length and walking speed with the same accuracy as the method in the previous study without calibration. Next, methods for detecting initial contact (IC) and toe-off (TO) were examined. As a result, in the IMU attached to the lower part of the lower leg, IC was better detected from the minimum of the angular velocity in the sagittal plane, on the other hand, TO was better detected from the midpoint between the peak value and the zero crossing. Finally, the distance between the sensor and the ankle, necessary for estimating stride length and walking speed, was estimated by an IMU attached to the lower leg. The maximum rate of decrease in the accuracy of stride length estimation due to this distance estimation error was about 3%.

1. Introduction

In this study, a simplified method for estimating stride length, walking speed, and gait events was investigated to reduce the burden of assessing motor function in hemiplegic patients with abnormal gait, such as circumduction gait and steppage gait. Walking speed and stride length are widely used to evaluate gait in hemiplegic patients for rehabilitation. When estimation is performed using an inertial measurement unit (IMU) attached to the lower limb, accuracy is improved by correcting the velocity obtained from angular velocity to the velocity obtained from acceleration. Akatsuka et al. in our research group calculate the compensation velocity by the outer product of the posture vector, which represents the direction of travel of the lower leg, and the angular velocity vector[1]. However, one problem with the estimation method is that it requires calibration. Therefore, in this study, a simple method for estimating the stride length and walking speed of abnormal gait was investigated by eliminating the calibration requirement. In previous studies, gait symmetry, which can be calculated from the initial

contact (IC) and toe-off (TO), has been considered as an evaluation index of gait[2]. One method of detecting IC and TO with a lower leg sensor has been reported by using the minimum value of sagittal plane angular velocity during the stance phase[3]. However, the accuracy of this method has not been evaluated for detecting IC and TO in steppage gait and circumduction gait, which are typical abnormal gait behaviors seen in stroke patients. Therefore, the possibility that this method can be applied to those abnormal gait was also tested.

2. Problems with stride length and walking speed estimation methods in previous studies

In order to confirm the problem of the estimation method of stride length and walking speed by using the lower leg inertial sensor, stride length and walking speed were obtained using the estimation method by Yang et al[4], Mao et al[5], and Akatsuka et al[1]. The measurement data were obtained from six healthy male subjects, included normal gait, simulated steppage gait, and simulated circumduction gait. Three IMUs were mounted on the

lower leg. As a result, the accuracy of the method of Akatsuka et al. was found to be superior.

3. Calibration-free stride length and walking speed estimation method

Akatsuka et al. used the posture vector to calculate the correction speed and detect the correction point. For calculating the posture vector, calibration is required. Therefore, in this study, calibration was made unnecessary by approximating the posture vector. As a result, the estimation of stride length and walking speed without calibration was as accurate as the method of Akatsuka et al. As an example of the results, Table 1 shows the relative error in stride length of a simulated hemiplegic gait estimated from an IMU attached to the lower part of the lower leg.

4. Investigation of applicability of IC and TO detection method by angular velocity minima to abnormal gait

The accuracy of IC and TO detected from the minimum value of angular velocity in the sagittal plane was evaluated in normal gait, simulated circumduction gait, and simulated steppage gait. Comparison of the accuracy of the IC and TO methods was conducted by implementing an algorithm that detects IC from the maximum value of the tilt angle in the direction of extension at the lower leg[6] and TO from the midpoint between the peak value after heel-off and the zero crossing point obtained from the sagittal plane angular velocity. Experimental conditions were the same as in Chapters 2 and 3. An example of the estimation results from the IMU attached to the lower part of the lower leg is shown in Table 2. In the paralyzed leg, IC was better detected from the minimum of the angular velocity in the sagittal plane, on the other hand, TO was better detected from the midpoint between the peak value and the zero crossing.

Table 1: Stride length estimation results for hemiplegic simulated gait using lower leg sensor

Condition	Method	Relative errors[%]
Circumduction Paralyzed leg	Proposed	0.25 ± 7.05
	Akatsuka	0.44 ± 6.55
Steppage Paralyzed leg	Proposed	2.00 ± 5.64
	Akatsuka	1.64 ± 5.42

Table 2: Accuracy of IC and TO estimation by each method

	Condition	Method	Errors[ms]
IC	Circumduction Paralyzed leg	Minimum	-10.63 ± 37.71
		Tilt angle	-75.95 ± 39.12
	Steppage Paralyzed leg	Minimum	-12.49 ± 55.50
		Tilt angle	-43.74 ± 52.88
TO	Circumduction Paralyzed leg	Minimum	-21.26 ± 38.79
		Midpoint	11.75 ± 35.52
	Steppage Paralyzed leg	Minimum	-42.04 ± 35.71
		Midpoint	23.85 ± 30.47

5. Estimation of the distance from the sensor to the ankle by IMU

The stride length and walking speed estimation method described above requires measurement of the distance from the sensor to the ankle. Therefore, a method to estimate the distance from the sensor to the ankle by measuring flexion and extension movement of the knee joint while sitting on a chair was investigated. The results showed that the closer the distance between the sensor and the knee, the better the estimation accuracy. Then, the influence of the estimation error on the stride length estimation was examined. The maximum rate of decrease in the accuracy of stride length estimation due to measurement errors in the distance between the sensor and the ankle was about 3%.

References

- [1] 赤塚勝多, “下腿部慣性センサによる異常歩行の評価指標推定に関する基礎研究,” 東北大学大学院医工学研究科修士学位論文, 2020.
- [2] S. Woolley, “Characteristics of gait in hemiplegia,” *Topics in Stroke Rehabilitation*, vol. 7, no. 4, pp. 1-18, 2001.
- [3] Kamiar Aminian, et al. “Spatio-temporal parameters of gait measured by an ambulatory,” *Journal of Biomechanics*, vol. 35, no. 5, pp. 689-699, 2002.
- [4] Shuozi Yang, et al. “Inertial sensors in estimating walking speed and inclination: an evaluation of sensor error models,” *Med Biol Eng Comput*, vol. 50, no. 4, pp. 383-393, 2012.
- [5] Yufeng Mao, et al. “Estimation of stride-by-stride spatial gait parameters using inertial measurement unit attached to the shank with inverted pendulum model,” *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1391, 2021.
- [6] Noelia Chia Bejarano, et al. “A novel adaptive, real-time algorithm to detect gait events from wearable sensors,” *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabilitation Eng*, vol. 23, no. 3, pp. 1-10, 2014.

修士学位論文要約（令和6年3月）

流体濃度計測 CMOS イメージセンサの高速・高精度化に関する研究

濱谷 碧

指導教員: 黒田 理人

A Study on Speed and Precision Improvements of CMOS Image Sensors
for Fluid Concentration Measurements

Aoi HAMAYA

Supervisor: Rihito KURODA

This paper describes a high SNR, high frame rate CMOS image sensor for visualizing two-dimensional fluid concentration distributions. In various fields, including semiconductor manufacturing, visualization of the concentration distribution of fluids such as gases and liquids is required. In this study, the image sensor was successfully used to visualize the concentration distribution of ammonia water in the semiconductor cleaning process.

To further improve the performance of the image sensor, we introduced technologies to reduce circuit noise and stabilize high-speed operation. The CMOS image sensor developed in this research achieved both the highest SNR of 72.5 dB and the highest frame rate of 1000 fps. This sensor enables more accurate measurement of liquid concentration distribution.

1. はじめに

近年, CMOS イメージセンサを用いたセンシング技術への要求が高まってきている。中でもガスや液体といった動きのある流体の濃度分布をリアルタイムに測定できる技術は, 血液の非侵襲検査や農産物の品質調査, 製造業における原料ガス・薬液濃度分布計測など広い分野で必要とされている。

濃度計測手法の一つに, 物質の吸光を利用する吸光分析がある。物質に光を入射し, 入射光と透過光の強度比を求めることで, 式(1)で表されるランベルト・ベールの法則から濃度を算出することができる。

$$C = -\frac{1}{\varepsilon L} \log_{10} \frac{I_0}{I_1} = \frac{A_\lambda}{\varepsilon L} \quad (1)$$

ここで C はモル濃度 [mol/L], L は光路長 [m], ε は吸光係数 [m²/mol], I_0 , I_1 は入射光, 透過光強度である。本研究では, この吸光度をイメージセンサの各画素で算出することで濃度分布の取得を目指す。吸光分析において濃度検出の精度は式(2)で表されるセンサの信号対雑音比 (SNR) で決定される。

$$SNR = 20 \log_{10} \frac{N_{sig}}{\sqrt{N_{sig}^2 + n_{sys}^2}} \quad (2)$$

ここで, N_{sig} は信号電子数, n_{sys} はセンサの回路ノイズ電子数である。SNR の向上には, センサの飽和電子数の向上と, 回路ノイズの低減が求められる。

流体濃度分布の計測では, 動きの速い流体の微小な濃度変化を高精度に捉えることが求められる。す

なわち, イメージセンサの性能としては, 1000fps のフレームレートと, 70dB の SNR の両立が求められる。そこで, 本研究の目的を, 流体の二次元濃度分布の高精度な測定に向けた高速, 高 SNR 動作を両立する CMOS イメージセンサの創出とする。

2. イメージセンサを用いた流体濃度分布計測実験

イメージセンサを用いた流体濃度計測の実証に向け, 半導体の洗浄工程で用いられる薬液の濃度分布可視化実験を行った。半導体集積回路の微細化・高集積化に伴い, 洗浄に用いる薬液や材料ガス濃度分布の高精度な制御が求められているが, 実際に反応が起きている薬液槽やチャンバーといった箇所の流体濃度分布を直接測定することはできていない状況である。半導体プロセスにおける流体濃度分布計測により, チャンバー内で起きている現象の解明や, 新たな製造技術の創出に貢献できると考える。

本実験では, 先行研究で設計された流体濃度計測向け CMOS イメージセンサを用いる。実験系を図 1 に示す。実験系は, ハロゲン面光源, イメージセンサを搭載したカメラモジュール, 薬液槽, 薬液供給系から成る。本実験では測定対象を半導体の洗浄工程でも用いられるアンモニア水とした。まず, 既知の濃度のアンモニア水を用い, 濃度と吸光度の対応関係をとる検量線を取得した。結果を図 2 に示す。アンモニア水の濃度と吸光度の間に良好な線形性を持つ検量線を取得し, イメージセンサを用いたアンモニア水の濃度計測が可能である見込みが得られた。次に, 吸光度と薬液槽を超純水で満たし, 液槽上部からスポットで 29%アンモニア水溶液を滴下し拡散する様子を撮影

した。結果を図 3 に示す。上部から注入されたアンモニア水が超純水中を拡散する様子を可視化することに成功した。

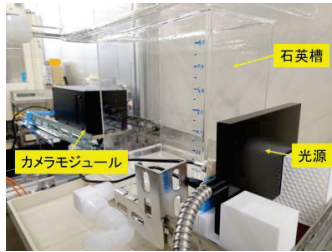


図1:液槽実験系

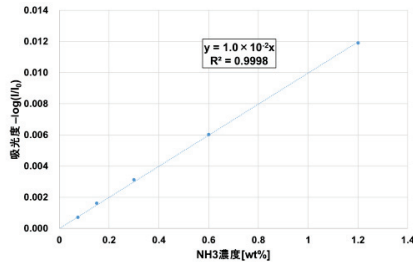


図2:アンモニア水の濃度と吸光度の検量線

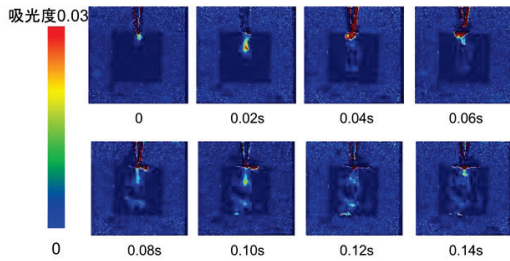


図3:アンモニア水の吸光度変化の連続画像

3. 高速・高 SNR チップの設計

2 章の実験で用いた CMOS イメージセンサは、実際に流体濃度分布計測が可能であることが明らかになった。しかしながら、新たに確認された課題も存在する。1 つは、回路の読み出しノイズが大きく、飽和電子数に対して SNR が低くなっていること、もう 1 つは 1000fps の高速動作時に信号のセリングが追いついておらず、SNR が低下していることである。これらの課題の解決に向け、列ゲイン可変アンプを用いた Dual VR 動作、マルチサンプリング動作、パイプライン読み出し方式を導入した新規イメージセンサチップを設計した。列ゲイン可変アンプを用いた Dual VR 動作では、画素のリセット電圧をリセット・リファレンスの二系統設け、リファレンス電圧は飽和レベルと吸光レベル電圧の間の値に設定する。リファレンス電圧と吸光レベルの電圧の微小な差分を、列回路に設けたアンプで増幅することで、吸光による信号の微小変化を高分解能に読み出すことができる。また、微小

な信号の増幅を、列回路に設けたアンプで行うことで、ノイズに対して信号を大きくすることができ、列回路以降の入力換算ノイズの低減が期待できる。マルチサンプリング動作では、画素内のアナログメモリを用い、信号のサンプリングを複数回行うことで、画素ソースフォロワやメモリで生じるノイズを低減することが可能である。パイプライン動作では、各信号に対しサンプルホールド回路を 2 系統設け、画素からの信号の書きこみと、水平信号線への信号読み出しを並列で行う。フレームレートを保ちつつ読み出し周波数を下げることが可能で、1000fps 動作時でも信号のセリング時間が十分確保できる。パイプライン化に伴うメモリの増設により、回路面積が大きくなりチップ面積を圧迫することが考えられるが、本研究では従来と比較して容量密度の高いトレンチキャパシタ²⁾を用いることで回路面積を増加させることなく機能の追加を実現した。

図 4 に設計したイメージセンサチップを示す。設計したチップは、グローバルシャッタセンサとして他に類を見ない最高フレームレート 1000fps での撮像と、72.5dB の最高 SNR の両立を実現した。

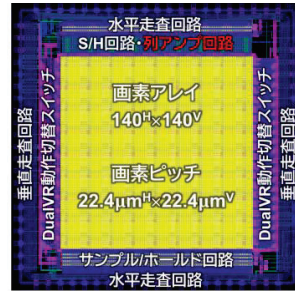


図 4: 設計したイメージセンサチップ

4. まとめ

本研究では、CMOS イメージセンサを用いたアンモニア水の濃度分布可視化実験を行い、良好な線形性を持つ検量線を取得するとともに、アンモニア水が超純水中を拡散する様子を動画でリアルタイムに測定することに成功した。

加えて、流体濃度のさらに高精度な計測に向けた高速・高 SNR 動作を両立する CMOS イメージセンサの設計を行い、1000fps の最高フレームレートと 72.5dB の最高 SNR を両立するセンサを実現した。流体濃度分布の高精度な測定により、半導体製造をはじめとする様々な分野の発展に貢献できると考える。

文献

- 1) T. Oikawa et al., IEEE TED, vol.69, No.6, pp.2965-2972, 2022
- 2) M. Suzuki et al., IEDM, pp.8.5.1-8.5.4, 2016

修士学位論文要約（令和6年3月）

チタン酸化物層によるペロブスカイト太陽電池特性の制御

平井 力

指導教員：齊藤 伸， 研究指導教員：岡田 健

Controlling Perovskite Solar Cells Characteristics by Titanium Oxide Layers

Chikara HIRAI

Supervisor: Shin SAITO, Research Advisor: Takeru OKADA

Perovskite solar cells (PSCs) are an effective renewable energy source to meet growing energy demands because of their lower cost compared to conventional silicon solar cells. In this study, the effect of TiO_x thin film properties on PSCs was investigated. It is possible to control the crystal structure and defects of TiO_x thin films in optimum sputtering and calcination conditions. This study found that the charge/discharge process at the interface between the TiO_x and perovskite layers induces hysteresis and Ti³⁺ affects the open circuit voltage and the short-circuit current. Mg doping can reduce Ti³⁺ and oxygen defects, while optimization of the doping concentration is necessary.

1. はじめに

太陽電池は急増するエネルギー需要を満たすための有望な再生可能エネルギー源の一つである。ペロブスカイト太陽電池 (PSCs) は従来のシリコン型太陽電池に比べ低コストという利点から注目を集めている。PSCs は透明電極・電子輸送層・ペロブスカイト層・正孔輸送層・電極の 5 つの層で構成される。性能向上のためにはシリコン型太陽電池に比べ効率と安定性が低いこと、電流電圧特性にヒステリシスが生じ発電効率の決定が困難になることが課題である。ヒステリシスは酸化チタン(TiO_x)が使用される電子輸送層に起因することが示唆されているが、詳細は解明されていない[1]。TiO_x は結晶構造が多様で欠陥による特性制御が可能であることからヒステリシス抑制が期待できる。そこで本論文では TiO_x の欠陥と結晶構造を制御し薄膜物性とペロブスカイト太陽電池特性の関係について研究した。

2. 実験方法

Ti をターゲットとした反応性 RF マグネトロンスパッタリング法により基板上に薄膜を堆積し、急速熱処理 (RTA) により焼成した。特性は X 線回折装置 (XRD)、X 線光電子分光法 (XPS)、抵抗率測定、紫外可視分光光度計で評価した。PSCs は透明電極に酸化インジウムスズ (ITO)、ペロブスカイト層にヨウ化鉛メチルアンモニウム (CH₃NH₃PbI₃)、正孔輸送層にポリ(3,4-エチレンジオキシチオフェン)とポリスチレンスルホン酸の複合物 (PEDOT:PSS) を用い、AM1.5 の 光を照射し電流電圧特性を評価した。

3. TiO_x 薄膜の作製と物性評価

XRD 測定の結果、成膜時の酸素分圧比と焼成雰

囲気によって TiO₂ のアナターゼ相・ルチル相、Ti₂O という異なる結晶構造の制御が可能であることがわかった。XPS 測定の結果、TiO_x 薄膜には Ti³⁺ と酸素欠陥が存在することがわかった (図 1)。これらの欠陥は酸素分圧比の増加と酸素雰囲気下焼成により減少するため、スパッタおよび焼成中の酸素種が TiO₂ 格子の酸素欠陥と置換していると考えられる。

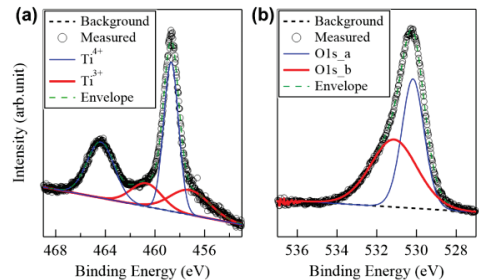


図 1 XPS 測定結果の典型例 (a)Ti2p (b)O1s

O1s_a: TiO₂ の O²⁻, O1s_b: 酸素欠陥

Ti³⁺ の増加により抵抗率と可視光透過率の両方が低下した。Ti³⁺ が電子供与体として機能することで電気伝導性を向上させ、ドナー準位を形成することで可視光吸収を増加させたと考えられる。

4. ペロブスカイト太陽電池の電流電圧特性

作製した PSCs の電流電圧特性には図 2 に示すようなヒステリシスが確認され、特に酸素欠陥の多い TiO_x とアナターゼ相で顕著であった (図 3)。このこと

は表面の酸素欠陥とアナターゼ相(101)面のステップエッジで電子がトラップされ、電荷が蓄積し誘起された内部電界による影響だと考えられる。測定遅れ時間 delay の増加に伴いヒステリシスが減少する傾向は、TiOx 層とペロブスカイト層の界面における電荷の充放電が原因であり、キャパシタンスのようにふるまうためだと考えられる(図4)。一方、開放電圧はTi³⁺の増加に伴い低下し、短絡電流は可視光透過率の増加に伴い増加した。このことはTi³⁺が再結合中心として機能することによるリーク電流の増加、および透過率増加によるフォトキャリアの増加に起因すると考えられる。

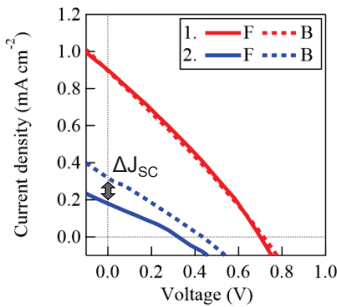


図2 ヒステリシスの典型例

(F: 電圧を正に掃引、B: 負に掃引)

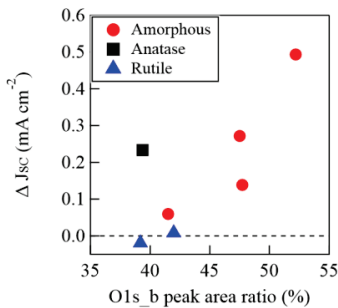


図3 短絡電流密度の差の酸素欠陥量依存性

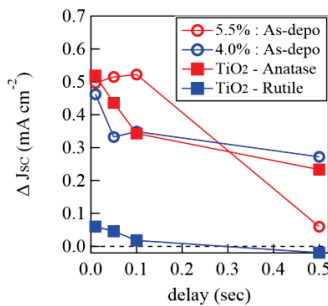


図4 短絡電流密度の差の delay 時間依存性

PSCs に影響を及ぼす欠陥の補償を目的に Mg ドープを行った。XPS 測定から Ti³⁺と酸素欠陥それぞれの Non ドープと Mg ドープのピーク面積比差を酸素分圧比に対してプロットすると、図5に示すように Mg ドープによって Ti³⁺の形成が抑制されること、および十分な酸素供給下では酸素欠陥形成も抑制されることが明らかになった。さらに、Mg ドープ TiOx 薄膜を用いたペロブスカイト太陽電池は短絡電流が減少することが分かった(図6)。これは過剰な Mg ドープに起因する電子トラップが原因であると考えられ[2]、Mg ドープ量の最適化が課題である。

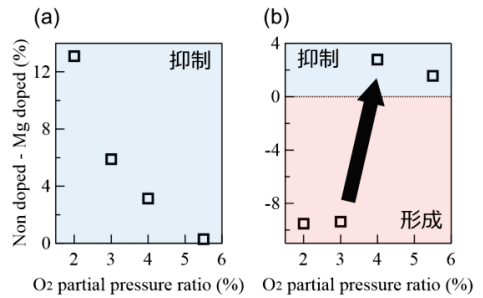


図5 Mg ドープによる欠陥への影響
酸素分圧依存性 (a) Ti³⁺ (b)酸素欠陥

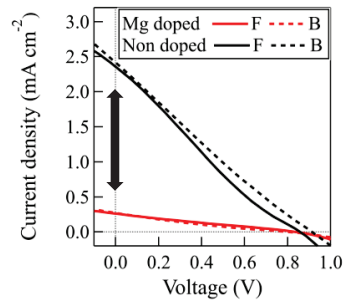


図6 Mg ドープの太陽電池特性への影響

5. まとめ

本論文では TiOx 薄膜の物性とペロブスカイト太陽電池特性の関係について研究を行った。TiOx 層とペロブスカイト層の界面における電荷の充放電プロセスがヒステリシスを引き起こし、Ti³⁺が開放電圧と短絡電流に影響を及ぼすことを見出した。さらに Mg ドープは Ti³⁺と酸素欠陥を減少させることができるが、ドープ濃度の最適化が必要であることを明らかにした。

文献

[1] Y. Rong et al., Energy Environ. Sci., 10 (2017), 11, 2383–2391
 [2] Z. Arshad et al., Energies (2022), 15, 4, 1408

修士学位論文要約（令和6年3月）

日常歩行モニタリングによる異常運動発生部位の推定に関する基礎研究

松本 優太

指導教員：渡邊 高志

A Basic Study on Estimation of Position Causing Abnormal Movement by Daily Gait Monitoring

Yuta MATSUMOTO

Supervisor: Takashi WATANABE

An assessment of motor function in daily life is important for optimized rehabilitation. In previous studies³⁾, gait function was assessed by estimating the body parts that contributed to abnormal gait using 7 inertial measurement units (IMU). This study aimed to construct an evaluation system of gait function for daily use by using two IMUs attached on each foot to estimate abnormal body parts. First, the calibration method of the sensor that takes into patient's motor ability consideration was examined. Second, acceleration signals of sensors on other body (both lower legs, both thighs, and waist) parts were reproduced by using the acceleration signals measured by sensors attached to both feet and bidirectional long short-term memory (BiLSTM). Last, the identification of abnormal body parts was conducted by assessing the feature importance through methods such as One-Class Support Vector Machine (OCSVM) and permutation importance. Many estimation results of using 2 sensors showed large correlation coefficient with those of using 7 sensors. This result suggests that estimation of body parts causing abnormal movements would be possible with 2 sensors.

1. Introduction

An assessment of motor function in daily life is important for optimized rehabilitation. Currently, IMU gain attention in motor function evaluation in daily monitoring¹⁾ because of their small size and low cost. IMU is compatible with automatic data analysis algorithms such as machine learning because IMU measures multidimensional data such as acceleration and angular velocity. So, research combining IMU and machine learning for rehabilitation purposes has been widely conducted²⁾.

In previous studies³⁾, gait function was assessed by estimating the body parts that contributed to abnormal gait. This method uses OCSVM, which is unsupervised learning, for the estimation model. The method does not require patient gait data, which are difficult to obtain. However, because seven IMUs are used, this method is less suitable for daily use. This study aimed to construct an evaluation system of gait function for daily use by using two IMUs attached on each foot to estimate abnormal body parts. In addition to reducing the number of sensors, in this study, acceleration signals were used because acceleration sensor is less expensive than gyro sensor, while angular velocity signals were used in previous studies.

2. Calculation of gait function evaluation index

In a previous study, angular velocity signals measured by seven inertial sensors (both feet, both lower legs, both thighs, and waist) were used to calculate joint Range of Motion (RoM). After that, the abnormal body parts were estimated by calculating the feature importance based on OCSVM and permutation importance. Body parts with high importance were considered to contribute to abnormal gait. Since the number of sensors was reduced in this study, the sensor signals in the remaining five body parts were reproduced based on BiLSTM to complement the information from the sensors attached to both feet used in this study. Since RoM cannot be employed as a feature for the acceleration signal, prediction error was used instead. BiLSTM was also used as the prediction model for calculating the prediction error.

3. Study on sensor calibration method

For the purpose of daily use, sensor signals were calibrated. In this study, calibration was performed by estimating a rotation matrix to align the coordinate system of a sensor with that of a reference sensor position. First, sensor signals for the calibration were measured during standing and sitting with and without small movements. Then, gait data were measured

under the gait conditions of simulated walking of an elderly person and simulated hemiplegic walking. In the gait measurement, first, training data of the model reproducing sensor data were measured. Then, additional sensors were attached to both feet and measured data used for evaluation of calibration of sensor signals and reproducing sensor signals.

Table 1 shows the RMSE of the additional sensor on the right foot before and after calibration. In most cases, the RMSE after calibration decreased, indicating the effectiveness of the calibration method used in this study.

TABLE I RMSE [m/s^2] for before and after calibration

gait		x	y	z
S-E	before	0.205±0.099	0.707±0.357	0.567±0.244
	after	0.186±0.080	0.259±0.091	0.126±0.051
S-Hem	before	0.210±0.094	0.701±0.326	0.854±0.195
	after	0.232±0.125	0.270±0.112	0.213±0.091

4. Study on reproduction of sensor signals in Lower limb body parts

Acceleration signals of sensors on other body parts were reproduced by using the acceleration signals measured by sensors attached to both feet and BiLSTM. The reproduction on was tested by conducting within-subjects learning using three different sensor signals (measured signals with reference sensors on both feet, measured signals with additionally mounted sensors, and calibrated c of additionally mounted sensors). The results showed that the RMSE was smaller for the reference sensor signals than the calibrated signals of additionally mounted sensor. However, the calibrated signals showed the smaller RMSE than the signals of additionally mounted sensor. Therefore, it was shown that the calibration was effective in reproducing sensor signals.

5. Factor estimation method of abnormal gait

Based on previous studies, estimation of body parts causing abnormal movement in gait were tested. In this study, sensor signal components causing difference from healthy gait were estimated by using prediction error of sensor signals. Estimated results by using the measured and reproduced sensor signals from the additional sensors were compared with the results by using sensor signals measured with 7 sensors. Table 2 shows the correlation coefficients between estimation

results of using 2 sensors and 7 sensors. Most of estimation results of using 2 sensors showed larger correlation coefficient than 0.9, indicating that the similarity between the two estimation results is high. This result suggests that estimation of body parts causing abnormal movements in gait would be possible with 2 sensors. For the estimation results that showed small correlation coefficient values, the cause of small correlation was examined. The results suggested that small correlation coefficient were not caused because of the low calibration accuracy of the sensor signals, but because of low reproduction accuracy of sensor signal.

TABLE II Correlation coefficients between estimation results of using 2 sensors and using 7 sensors

gait	sub1	sub2	sub3	sub4	sub5
S-E	0.931	0.999	0.999	0.885	0.955
S-Hem	0.650	0.981	0.998	0.998	0.889

6. Conclusion

In this study, an evaluation system of gait function for daily use by estimating body parts that cause abnormal movements in gait using 2 IMUs attached on the both feet. Estimation of sensor signal components causing difference from healthy gait was examined. Many estimation results of using 2 sensors showed large correlation coefficient with those of using 7 sensors. This result suggests that estimation of body parts causing abnormal movements in gait would be possible with 2 sensors.

Reference

- 1) Majumder S, Deen MJ. Wearable IMU-Based System for Real-Time Monitoring of Lower-Limb Joints. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 21, pp. 8267–8275, 2021.
- 2) Daines KJF, Baddour N, Burger H, Bavec A, Lemaire ED. Fall risk classification for people with lower extremity amputations using random forests and smartphone sensor features from a 6-minute walk test. *PLoS One*, Vol. 16, No. 4, 2021.
- 3) Teufl W, Taetz B, Miezial M, Dindorf C, Fröhlich M, Trinler U, Hogan A, Bleser G. Automated detection and explainability of pathological gait patterns using a one-class support vector machine trained on inertial measurement unit based gait data. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, Vol. 89, p. 105452, 2021.

修士学位論文要約（令和6年3月）

不揮発性メモリの統計的特性解析に向けた抵抗計測プラットフォームに関する研究

光田 薫未

指導教員：黒田 理人， 研究指導教員：間脇 武蔵

A Study on Resistance Measurement Platform for Statistical Characterization of Nonvolatile Memory Materials

Hidemi MITSUDA

Supervisor: Rihito KURODA, Research Advisor: Takezo MAWAKI

HfOx films of new memory materials are formed on the platform and it is demonstrated whether the resistance measurement platform can statistically measure the electrical properties of new memory materials. Statistical measurement of resistance values after forming was performed on three types of HfOx (1600 cells each) with different device areas and film thicknesses. It was found that the low resistance cells that lead to false readouts increased with larger device area and thicker film thickness. In addition, we demonstrated the effect of parasitic resistance removal in a new circuit that is not affected by parasitic resistance, and confirmed a reduction of 3.5Ω. It was demonstrated that the resistance measurement platform is effective for measurement and evaluation of memory materials.

1. はじめに

現在、不揮発性メモリの ReRAM、MRAM など に用いられる新規メモリ材料が注目されている。これらの新規メモリでは、抵抗値の変化をメモリの機能として利用していること、材料の特性ばらつきがメモリ自体の性能に大きな影響を与えることから、開発段階においてメモリ材料の性能・機能を評価するための Device Under Test(DUT)を多数計測し、統計的評価を行う技術が求められる。そこで、多岐にわたる材料の抵抗値を、高速・高精度に統計的評価する抵抗計測プラットフォームを開発した[2]。抵抗計測プラットフォームの回路設計・試作・回路動作の検証は既に報告されている[2]。今回は、メモリ材料の形成とメモリ材料の統計的計測について述べる。

2. 抵抗計測プラットフォーム

抵抗計測プラットフォームの構造及び単位セルの回路図を図1に示す。共通アレイテスト回路と測定対象のメモリ材料追加層で構成されている。アレイテスト回路はアレイ状に並ぶ多数のDUTの電気的特性を高速、高精度かつ統計的な計測を可能とする回路でメモリ材料に寄らず共通利用可能である。メモリ材料追加層は最上層に位置し、メモリ材料と上部電極からなる。この構造により、少ない工程でメモリ材料の測定評価が可能である。性能緒言を表1に示す。続いて、測定評価に必要な抵抗測定動作と書き込み消去動作方法について述べる。抵抗計測動作では、DUTに対して列電流源から任意の電流(Ics)を流し、上昇電圧(Vout - VTE)を読み取ることで抵抗値 $R_{DUT} + R_{PARA} = (V_{out} - V_{TE}) / I_{CS}$ を求める。DUTの抵抗値と寄生抵抗の合計値が算出される。書き込み

み・消去動作では、ストレススイッチ(VST)、上部電極間(VTE)に任意の電圧を入力することで DUT にストレス電圧(VST - VTE)を印加する。また、セクタのゲート電圧を可変にすることで過電流防止用のコンプライアンス電流が設定可能である。上記の方法でメモリ材料の測定評価に必要な基本的動作を行う。

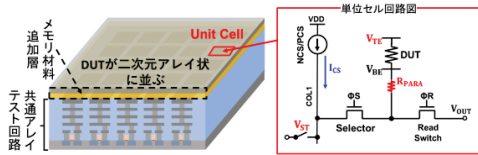


図1：構造図と単位セル回路図

表1：抵抗計測プラットフォーム性能緒言

プロセステクノロジー	0.18 μm 1-Poly-Si 5-Metal layers CMOS
メモリ材料測定用セル数	600 ^H × 600 ^V
セルピッチ	5.6 ^H μm × 5.6 ^V μm
下部電極(BE)サイズ	5 ^H μm × 5 ^V μm
測定抵抗範囲	490Ω(測定誤差1%)~10MΩ

3. メモリ材料の統計的計測

今回の測定では HfOx 膜を DUT としてプラットフォーム上に形成した。図2に追加プロセスで HfOx 膜を形成した抵抗計測プラットフォームの断面図を示す。また HfOx 抵抗変化の原理について図3示す。初期状態の HfOx 膜は絶縁性をもつが、高電圧を印加するフォーミング動作により酸素欠陥が誘起され導電性フィラメントが形成されることで抵抗値が大幅に減少する。今回の測定で用いたセルの膜厚・素子面積とフォーミング条件を表2に示す。

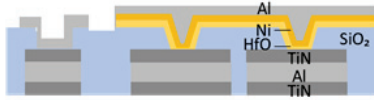


図 2: HfOx 膜形成後のプラットフォームの断面図

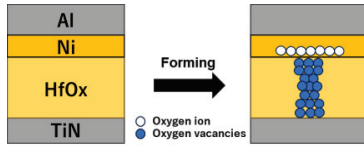


図 3: HfOx 抵抗変化原理図

表 2: Forming 動作の条件表

サンプル番号	膜厚	素子面積	印加電圧	Compliance
①	4nm	500nm/□	4V	250uA
②	4nm	700nm/□	4V	250uA
③	6nm	500nm/□	4V	250uA

サンプル番号 1~3 の各 1600 セルでフォーミング動作の抵抗値の測定をした。各サンプルの QQPLOT を図 4 に示す。次世代メモリでは 100Ω 程の抵抗値の低いセルは ON/OFF 比低下による誤読み出しに繋がるため、観測が必要である。抵抗値の低いセルの数はサンプル①に比べてサンプル②とサンプル③の方が多くなる。素子面積の異なる①と②では、素子面積の増加に伴いフィラメントが増えたことで抵抗値が減少したと考えられる。続いて、膜厚が異なるサンプル①と③では膜厚の増加に伴い抵抗値は大きくなるのが一般的であるが、一部のセルでは印加電圧の増加によって過度なストレスがかかりフィラメントの直径が通常より大きくなり抵抗値が減少したと考えられる。抵抗値の低いセルは素子面積が大きく、膜厚が厚くなることで増加していることがわかる。このような分布の端にあるセルの観測は多数素子の測定が必要のため、抵抗計測プラットフォームが有効である。以上から、抵抗計測プラットフォームがメモリ材料の測定評価に有効であることを実証した。

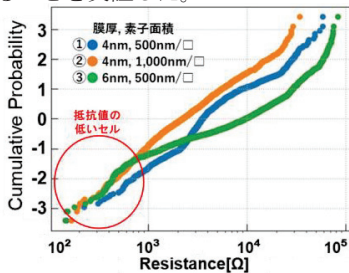


図 4: 各サンプルの抵抗値 QQPLOT

4. 新規抵抗計測プラットフォーム

既存のセル回路では抵抗測定時に寄生抵抗 R_{PARA} の影響を受けるため、測定精度が律速される。HfOx 膜の統計的計測では 100Ω 程度の抵抗値を測定しているように、次世代メモリは約 10Ω~

10MΩ と幅広い抵抗値範囲で動作しており、既存の回路では抵抗値の低い次世代メモリに対応することができない。そのため、寄生抵抗の影響を受けない抵抗計測プラットフォームを開発した。図 5 に新規回路を示す。新規回路ではケルビン接続をもちいることで、下部電極直下の電圧を読み出すことができ寄生抵抗を無視できる。抵抗値は $R_{DUT} = (V_{out} - V_{TE})/I_{CS}$ となり DUT の抵抗のみを算出可能である。寄生抵抗除去効果の実証としてケルビン接続の有無の違いを設けた短絡セルを測定した。測定結果を図 6 に示す。ケルビン接続の導入によって、抵抗値 3.5Ω の減少を確認した。今回の短絡セルはセル内部に埋め込みで設けたため、上部電圧を引き出す際にチップ内部の M4 層の配線を利用しており配線層の抵抗値 5.6Ω が読み出された。これらの結果から新規回路の寄生抵抗除去効果を実証した。新規回路では、測定抵抗範囲は 10Ω(測定誤差 1%) ~ 10MΩ となり、より多くのメモリ材料の測定評価が可能になったことがわかる。

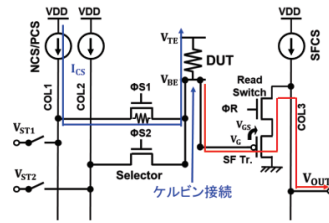


図 5: 新規セル回路図

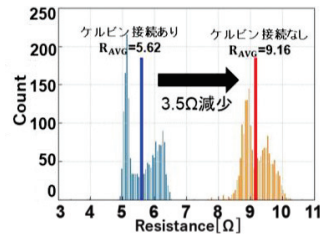


図 6: ケルビン接続あり・なしのヒストグラム

5. まとめ

HfOx 膜をプラットフォーム上に形成し、3 種類のサンプル、各 1600 セルで統計的計測を行った。誤読み出しに繋がる抵抗値の低いセルは素子面積が大きく、膜厚が厚くなることで増加することがわかった。また寄生抵抗の影響を受けない新規回路の寄生抵抗除去効果の実証を行い、3.5Ω の減少を確認した。以上から抵抗計測プラットフォームは次世代メモリ材料の測定評価に有効であり研究開発に貢献できると考えられる。

文献

- 1) Y. Kumagai et al., Jpn. J. Appl. Phys., 50, 106701, 2011
- 2) T. Maeda et al., Jpn. J. Appl. Phys., 59, SGG03, 2020

修士学位論文要約（令和6年3月）

Fe-Fe₃O₄ナノ粒子2相集合体におけるFeナノ粒子の分散および凝集状態と磁化のブロッキング現象

柳田 翔一

指導教員：齊藤 伸， 研究指導教員：小川 智之

Dispersion and aggregation states of Fe nanoparticles and magnetization blocking phenomena in Fe-Fe₃O₄ nanoparticle 2-phase assemblies

Shoichi YANAGITA

Supervisor: Shin SAITO, Research Advisor: Tomoyuki OGAWA

The dispersion state of nanoparticles (NPs) in Fe-Fe₃O₄ NPs 2-phase assemblies was controlled to elucidate the blocking phenomenon. In this study, two experiments were conducted. (1) preparation of 1 wt% single-phase assemblies of magnetic NPs and (2) preparation of Fe-Fe₃O₄ NPs 2-phase assemblies using the coagulation method + ultrasonic stirring, respectively. TEM image observation confirmed that the dispersion and homogeneous mixing of NPs were controlled in experiments (1) and (2). From the measurement of complex AC magnetic susceptibility, three blocking temperatures (T_B) of 50 K, 130 K and 230 K were observed in the Fe-Fe₃O₄ NPs 2-phase assemblies. These are isolated Fe₃O₄ NPs, adjacent Fe NPs and isolated Fe NPs with higher T_B due to magnetostatic interaction energy, respectively.

1. はじめに

近年、半導体・メモリーなどの処理速度や記憶容量の更なる向上が期待されており、高周波帯から低周波帯の幅広い範囲で、要求される性能を従来の磁性材料では達成するのが困難である。そこでナノスケールの材料開発とその基礎物性に関する研究が盛んにされている。本研究では、超常磁性や単磁区・ブロッキング現象等の特性を有する磁性ナノ粒子、特に $T_B = 200$ K を有している Fe-Fe₃O₄ ナノ粒子2相集合体に着目した。Fe-Fe₃O₄ ナノ粒子2相集合体におけるナノ粒子の分散状態を制御し、そのブロッキング現象の解明を行った。

2. 実験方法

熱分解法を用いて Fe^[1]と Fe₃O₄^[2]ナノ粒子をそれぞれ合成し、以下の2つの実験を行った。それぞれ①磁性ナノ粒子の1 wt%単相集合体の作製、②共凝集法+超音波攪拌を用いたFe-Fe₃O₄ナノ粒子2相集合体の作製である。1 wt%単相集合体は、各磁性ナノ粒子0.002 mg が分散したヘキサソール 5 ml にパラフィン 2.0 g を添加して、120°Cで加熱して作製した。ヘキサソールが完全に蒸発後、空冷した後サンプルを得る。Fe-Fe₃O₄ナノ粒子2相集合体は、合成したFeとFe₃O₄を各質量比でサンプルを作製する。FeとFe₃O₄をそれぞれ秤量後トルエン 10 ml に分散させ、その溶液にエタノール 30ml 加えて、超音波攪拌(10 min)

実施した。その後遠心分離(5000 rpm, 10 min)を行い、上澄み液を破棄、真空乾燥を行った。得られた黒色粉末が Fe-Fe₃O₄ ナノ粒子集合体である。粒径・分散状態の評価に透過型電子顕微鏡 (TEM)、磁気特性評価に交流磁化率測定を用いて評価した。

3. FeとFe₃O₄ナノ粒子の1 wt%単相集合体の結果

Fig.1, 2 に Fe₃O₄ (4.3 nm)と Fe (11.8 nm)ナノ粒子を用いたパラフィン希釈サンプルの断面TEM画像を示し、(a)が合成直後の粉末状態、(b)が1 wt%単相集合体である。Fe と Fe₃O₄ ナノ粒子共に、希釈な凝集状態においてナノ粒子が分散していることが確認できた。

Fig.3 に(a)Fe₃O₄ と(b)Fe のナノ粒子の複素磁化率 χ'' の温度依存性グラフを示す。Fe₃O₄ -1 wt%単相集合体では $T_B = 50$ K であることが確認でき、ブロッキング温度の変化は見られなかった。Fe - 1 wt%単相集合体では $T_B = 180$ K にピークを確認できた。 $T_B = (KV/k_B)\ln(\tau/\tau_0)$ の式より、磁気的に孤立したFeナノ粒子(11.8 nm)の $T_B^{Fe} = 176$ K と得られた。この時の $K_{Fe} = 4.7 \times 10^4$ J/m³ [3], $V = 4/3 \pi r^3$, ボルツマン定数 $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K, $f = 47$ Hz, $f_0 = 10^9$ Hz である。Fe-1 wt%単相集合体では、粒子間距離が拡大し、静磁気相互作用小さくなり、その結果ブロッキング現象を示したと考えられる。

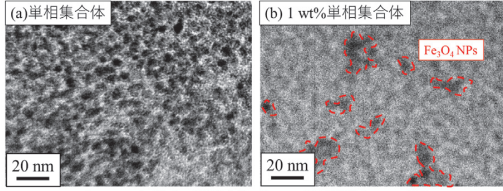


Fig. 1 Fe₃O₄ ナノ粒子の単相集合体(a)と 1wt% 単相集合体(b)のTEM画像

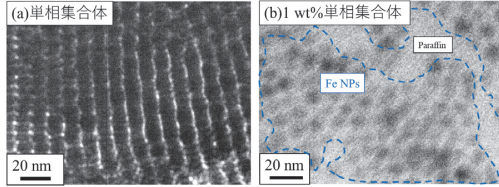


Fig. 2 Fe ナノ粒子の単相集合体(a)と 1wt% 単相集合体(b)のTEM画像

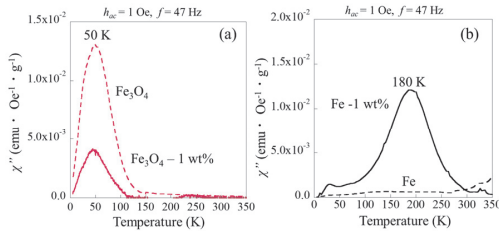


Fig. 3 (a) Fe₃O₄ と (b) Fe ナノ粒子の粉末状態と 1 wt% 単相集合体の複素交流磁化率 χ' 、 χ'' の温度依存性

4. 共凝集法+超音波によって作製した Fe-Fe₃O₄ ナノ粒子 2 相集合体の結果

Fig. 4 に(a)共凝集法と(b)共凝集法+超音波で、それぞれ作製した Fe-Fe₃O₄ ナノ粒子 2 相集合体の断面 TEM 画像を示す。Fig.4 (a)からは各ナノ粒子同士が不均一であった。Fig.4 (b)共凝集法+超音波では、Fe や Fe₃O₄ ナノ粒子が均一に混合できていることが確認できた。

共凝集法+超音波で作製した Fe-Fe₃O₄ ナノ粒子 2 相集合体の複素交流磁化率 χ' 、 χ'' の温度依存性曲線を Fig.5 に示す。T_B のピーク位置は T_{B1}、T_{B2}^{low}、T_{B2}^{high} とする。T_{B1} = 50 K 付近のピークは、Fe₃O₄ ナノ粒子のブロッキング現象に由来する成分である。T_{B2}^{low} = 130 K は、Fe₃O₄ ナノ粒子に対して、静磁気双極子相互作用エネルギーの式、 $E_{p-p} = M_S^2 V^2 / 2\pi \mu_0 R^3$ と $T_B = (KV + X \times E_{p-p} / k_B) \ln(\tau/\tau_0)$ の式を用いて考察した。この式では、 $K_{Fe_3O_4} = 1.3 \times 10^4 \text{ J/m}^3$ [4]、M_S は飽和磁化、 $V = 4/3 \pi r^3$ 、R は粒子間距離、 μ_0 は真空透磁率、X は 1 個の Fe ナノ粒子に隣接した Fe₃O₄ ナノ粒子数である。その結果、X=10 の時 Fe₃O₄ ナノ粒子の T_B (Fe-Fe₃O₄) が 119 K となった。T_{B2}^{low} = 130 K は E_{p-p} によって T_B が高温化した Fe₃O₄ ナノ粒子である。T_{B2}^{high} = 230 K は、磁氣的に孤立した Fe ナノ粒子のブロッキング現象の T_B である。T_B = (KV/k_B)ln(τ/τ₀)の式へ Fe ナノ粒子の粒径(12.9 nm)を

代入して計算すると、T_B^{cal} Fe = 221 K となり、T_{B2}^{high} = 230 K が近い値であった。

超音波処理有無によって、磁氣的孤立状態 Fe ナノ粒子と静磁気相互作用が寄与した Fe₃O₄ ナノ粒子の比率が増加したと思われる。T_{B2}^{high} の値が依存するためである。Fe-Fe₃O₄ ナノ粒子 2 相集合体の T_{B2}^{high} の値を 300 K まで高温化させる為には、単粒子の場合より大きい異方性エネルギー K また粒子体積 V が必要である。また 2 種以上の粒子が存在する場合は、粒子間の静磁気相互作用が寄与を、粒径とその比率を考慮する必要がある。

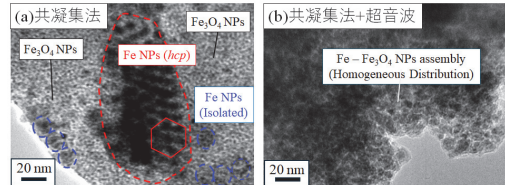


Fig. 4 Fe-Fe₃O₄ ナノ粒子 2 相集合体 (質量比 = 5:5) の TEM 画像。(a) 共凝集法のみ、(b) 共凝集法+超音波

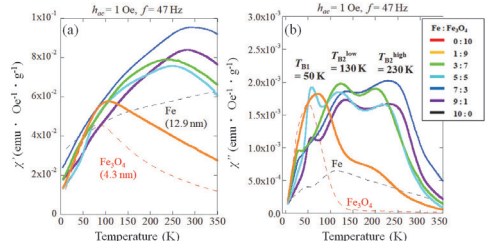


Fig. 5 共凝集法+超音波で作製した Fe-Fe₃O₄ ナノ粒子 2 相集合体。複素交流磁化率 (a) χ' 、(b) χ'' の温度依存性

5. まとめ

Fe-Fe₃O₄ ナノ粒子 2 相集合体におけるナノ粒子の分散状態を制御して、T_B = 300 K まで高温化や磁気挙動の解明を行った。Fe-Fe₃O₄ ナノ粒子 2 相集合体の凝集状態の制御を行った結果、磁性ナノ粒子 2 相集合体のブロッキング現象には、Fe と Fe₃O₄ ナノ粒子のブロッキング成分、Fe-Fe₃O₄ ナノ粒子間の静磁気双極子相互作用の成分が含まれていることが確認できた。本研究の結果から磁性ナノ粒子 2 相集合体における磁気特性モデルを解明したことによって、T_B=300 K への指針を確立した。

文献

- 1) Hiroaki Kura, et. al, *J. Phys. Chem. C*, **114**, 13, 5835–5838 (2010).
- 2) Shouheng Sun, et. al, *J. Am. Chem. Soc.* **126**, 1, 273-279 (2004).
- 3) 近角聰信, 「強磁性体の物理 (上) 葦原房, 1978 年
- 4) H. Sasaki, *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, **49**, 135(2002)

修士学位論文要約（令和6年3月）

ガス・ソース気相成長法により製膜された 数分子層二硫化タングステンへのキャリアドーピング

米窪 和輝

指導教員：佐藤 茂雄， 研究指導教員：吹留 博一

Doping of Few Molecular Layer Tungsten Disulfide Grown by Gas-source Chemical Vapor Deposition

Kazuki YONEKUBO

Supervisor: Shigeo SATO, Research Advisor: Hirokazu FUKIDOME

Transition metal dichalcogenides (TMDCs), semiconducting two-dimensional crystals, have attracted much attention as ultra-thin channel materials. Among them, monolayers of group VI TMDCs such as WS_2 , MoS_2 , and WSe_2 , which have semiconducting properties, have attracted attention as semiconductor materials for electronic devices because they have a closed shell structure, i.e., they are stable two-dimensional crystals without dangling bonds. [6] In the ultrathin region (<3 nm), the carrier mobility of TMDCs exceeds that of Si. However, it is known that when TMDCs are used as a channel, the contact resistance with the electrode is non-negligible and causes degradation of the overall electrical characteristics of the FET. Therefore, doping of WS_2 was studied to reduce the contact resistance between the metal and WS_2 .

1. はじめに

半導体二次元結晶である遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)は、超極薄のチャネル材料として注目されている。中でも半導体的性質を持つ WS_2 、 MoS_2 、 WSe_2 などのVI族TMDCの単分子層は、閉殻構造となっている。ゆえに、VI族TMDCは、ダングリング・ボンドを有さない安定な二次元結晶となり、電子デバイス用半導体材料として注目されている¹⁾。超極薄領域(<3 nm)において、TMDCのキャリア移動度はSiのそれを上回る。しかし、TMDCをチャネルとして利用する際、電極とのコンタクト抵抗が無視できないほど大きい。大きなコンタクト抵抗は、FET全体の電気特性を劣化させることが知られている。そこで、 WS_2 へのドーピングにより、金属- WS_2 間のコンタクト抵抗の削減を目的とした研究を行った。

2. ガス・ソース気相成長法による数分子層 WS_2 の成膜

硫化水素(H_2S)やフッ化タングステン(WF_6)を前駆体として用いた気相成長法により WS_2 を成膜した。この成膜法は、大面積で高品質な膜を得ることが可能であり、工業応用の点で適した方法と言える。約150 nm厚の SiO_2 層を成長させたSi基板をチャンバ内に挿入し、基板温度800°Cの状態、Arで希釈した WF_6 (WF_6 濃度約1%)、 H_2S 、Arを成長炉内に流入させることで、 WS_2 を成膜した。試料に対して、Raman散乱スペクトル測定、断面透過電子顕微鏡(TEM)観察、EDX点分析を行い、数分子層の WS_2 が基板表面全体に成膜され

ていることが確認された。

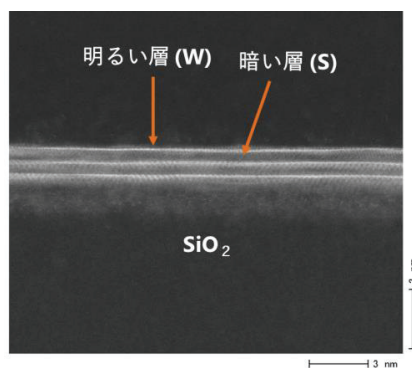


図1 WS_2 の断面TEM像

3. WS_2 への化学的ドーピング

WS_2 の金属電極とのコンタクト抵抗を低減するために、1,2-ジクロロエタン(1,2 dichloroethane, DCE)による WS_2 へのキャリアドーピングを行った。 WS_2 試料をDCEに12時間以上漬けることで、半導体表面にClが吸着され、 WS_2 へのキャリアがドーピングされる²⁾。

また、ベンジルピオロゲン(benzyl viologen, BV)による、 WS_2 へのキャリアドーピングを行った。BVはすべての電子ドナー分子の中で最も低い還元電位を持ち、中性の BV^0 分子は WS_2 に対して電子を供給し、 BV^+ へと還元されることでドーピ

ングが行われる³⁾。

Hall 効果測定で、ドーピング前後のキャリア移動度、キャリア密度の測定を試みたが、素子全体の抵抗値が非常に高く、測定結果の取得ができなかった。それぞれの試料に対して TLM 測定を行い、Ni-WS₂間のコンタクト抵抗の測定を行った。素子に対して 0.01 ~ 10 V の電圧を印加したが、使用した測定装置では、0.001nA までの電流値しか測定できず、データの取得ができなかった。つまり、素子全体の抵抗値が 10¹²Ω 以上であるとわかった。

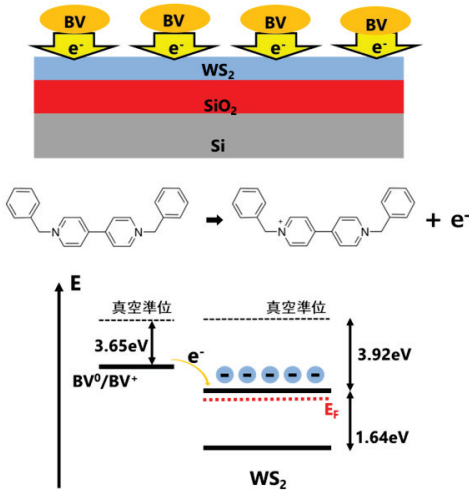


図2 BVによるWS₂へのドーピング

4. WS₂の水に対する耐性

Hall 効果測定・TLM 測定の際に、WS₂ 試料に対して電流が流れない理由の一つが、フォトリソリソングラフイープロセス中における水溶液による WS₂ へのダメージがあると考えた。この考えに基づき、WS₂ 試料を超純水に漬け、WS₂ へのダメージを調べた。超純水に 10sec 以上漬けたもので剥がれが確認された。この結果から、WS₂ 直下の SiO₂ の親水性の高さが剥がれをもたらすと推論した。

具体的には、次のように考えている。

- ① 基板上の WS₂ 欠陥部に水が入り込む。
- ② 親水性の高い SiO₂ 上で吸着されることで、SiO₂ と WS₂ 界面に水分子が入り込む。
- ③ 入り込んだ水分子が、WS₂ の剥離を誘起するこの推論が正しいとすると、WS₂ 膜の欠陥を減らすことで、水による剥がれを軽減できると考えられる。また、WS₂ 直下の SiO₂ を疎水性の材料に置き換えることで、剥がれの軽減が図れると考えられる。

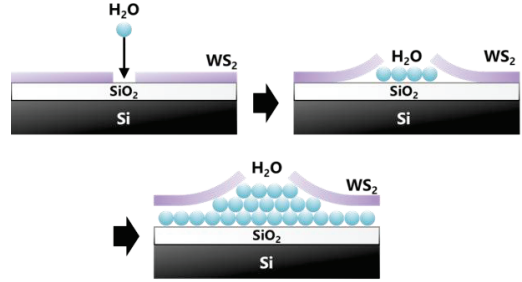


図3 WS₂の剥がれの原因

5. まとめ

ガス・ソース CVD により成膜された数分子層 WS₂ をチャンネルとして用いたトランジスタの実現に向けて、WS₂ へのドーピングを行うことで金属-WS₂ 間のコンタクト抵抗の削減を目的とし、Cl イオンのドーピングおよび WS₂ 表面への分子吸着の 2 つの方法により、WS₂ への電子ドーピングを試みた。Raman 散乱スペクトル、断面 TEM、EDX 点分析により、ガス・ソース CVD 法により成膜された WS₂ の構造を調べ、膜厚や均一性について評価を行った。WS₂ 試料の Hall 効果測定、TLM 測定を行った。しかし、素子に電圧を印加しても電流が流れず、測定ができなかった原因として、WS₂ 直下の SiO₂ の親水性に課題があると考察し改善策の提案を行った。

文献

- 1) Zehua Hu, Zhangting Wu, Cheng Han, Jun He, Zhenhua Ni, Wei Chen, Chem. Soc. Rev., 2018, 47, 3100-3128
- 2) Lingming Yang, Kausik Majumdar, Han Liu, Yuchen Du, Heng Wu, Michael Hatzistergos, P. Y. Hung, Robert Tieckelmann, Wilman Tsai, Chris Hobbs, and Peide D. Ye, Nano Lett. 2014, 14, 11, 6275-6280
- 3) Daisuke Kiriya, Mahmut Tosun, Peida Zhao, Jeong Seuk Kang, Ali Javey, J. Am. Chem. Soc. 2014, 136, 22, 7853-7856

修士学位論文要約（令和6年3月）

永久磁石を有する直交磁心型可変インダクタに関する研究

会津 翔太

指導教員：中村 健二

A Study of Orthogonal-Core-type Variable Inductor with Permanent Magnets

Shota AIZU

Supervisor: Kenji NAKAMURA

Variable inductors, which are composed of only magnetic core and primary dc and secondary ac windings, can control effective inductance of the secondary ac winding quickly and continuously by the primary dc current due to magnetic saturation effect. This paper presents a novel orthogonal-core-type variable inductor in which permanent magnets are inserted in the magnetic path of the primary DC flux. The proposed variable inductor can generate a certain reactive power when the primary DC current is zero, and it can control the reactive power from lead to lag by changing the primary DC current from positive to negative.

1. はじめに

可変インダクタは、制御巻線からの直流励磁により交流主巻線の実効的なインダクタンスを任意に調整できる。したがって、電力用コンデンサと組み合わせて系統に並列に接続することで、無効電力補償型の電圧安定化装置として応用できる。

筆者らは、これまでに田形磁心などの種々の可変インダクタの開発を進めるとともに、高圧配電系統への適用を進めてきた⁽¹⁾。その中でも直交磁心型可変インダクタは、各々1つずつの制御巻線と主巻線、そして2つのカットコアのみで構成されることから、極めてシンプルかつコンパクトである。しかしながら、可変インダクタと併用される電力用コンデンサには、高調波電流による異常過熱や異常音の問題があり、最近では電力用コンデンサを省いた装置構成も増えている。

そこで本論文では、可変インダクタの直流制御磁束の磁路に永久磁石を挿入することで、無制御時にもある一定の大きさの無効電力の供給を可能にするとともに、制御電流を正負に変化させることで、コンデンサレスで無効電力を実効的に遅れから進みまで線形かつ連続的に制御可能な新しい可変インダクタを提案し、リラクタンスネットワーク解析(RNA)、並びに試作試験の両面から検討を行ったので報告する。

2. 永久磁石を有する直交磁心型可変インダクタの解析・設計

図1に、提案する永久磁石を有する直交磁心型可変インダクタの寸法と諸元を示す。定格容量は1.67 kVA、定格電圧は200 Vである。磁心材質は厚さ0.35 mmの無方向性ケイ素鋼板である。また図2に検討した磁石配置を示す。順に積層コア内配置・カ

ットコア側部配置・カットコア上部配置と名付ける。この3つの配置に対して、ネオジウム焼結磁石・ネオジウムボンド磁石・フェライト磁石の3種類の磁石材を配置し、最適な磁石配置・磁石材料・磁石厚の組み合わせを探索する。なお、解析にはRNAを用いる。

図3に、積層コア内配置の無効電力制御特性を示す。同図より、磁石材と磁石厚が変化することにより、特性が変化することがわかる。そこで、無効電力の最大値と最小値の差を制御幅と定義し、最も制御幅の広い磁石材料と磁石厚の組み合わせを最適として特性を評価する。つまり積層コア内配置では2 mm厚のネオジウム焼結磁石を配置した際の特性が最もよい。同様の検討を他磁石配置にも行う。

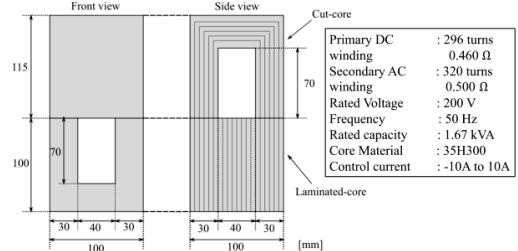


図1 永久磁石を有する直交磁心型可変インダクタの寸法と諸元

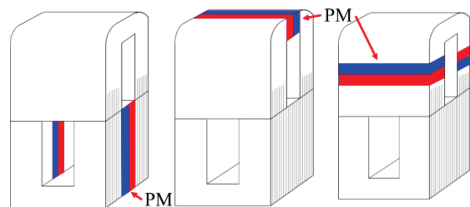
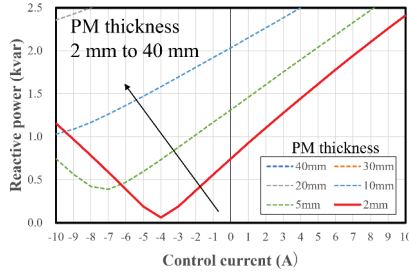
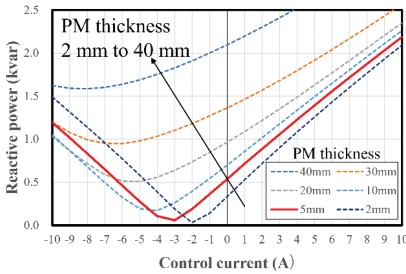


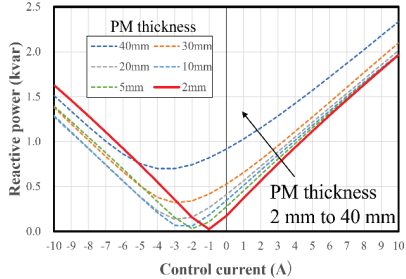
図2 検討した磁石配置



(a) ネオジウム焼結磁石



(b) ネオジウムボンド磁石



(c) フェライト磁石

図 3 積層コア内配置における各磁石材の無効電力特性

表 1 に各磁石配置において、最も制御幅の大きかった磁石材料・磁石厚の組み合わせを示す。同表より、積層コア内配置に 2 mm 厚のネオジウム焼結磁石、カットコア側部配置に 1 mm 厚のネオジウム焼結磁石を配置したときに最も特性がよくなることが明らかとなった。

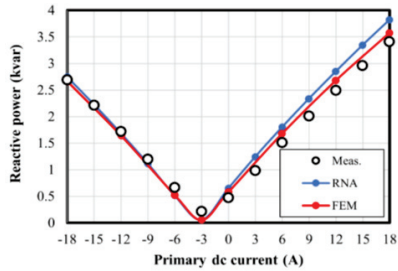
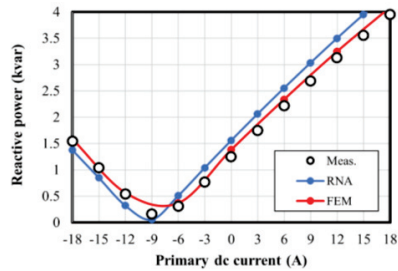
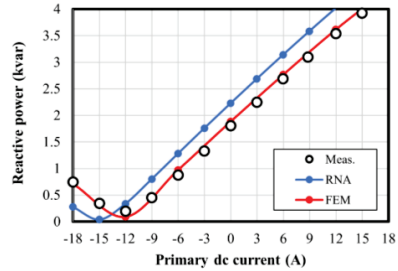
表 1 各磁石配置において最適な磁石材・磁石厚の比較

Place of magnets	Magnet	Magnet thickness	Max (kvar)	Min (kvar)	Max-Min
Inside laminated core	Neodymium sintered	2 mm	0.06	2.41	2.35
Top of cut core	Neodymium sintered	2 mm	0.06	2.16	2.10
Side of cut core	Neodymium sintered	1 mm	0.09	2.37	2.28

3. 実器検証

図 4 に、1.67kVA 器と同様の検討を行い設計・試作した 3kVA 器の寸法と諸元を示す。製作の容易さを鑑みて積層コア内配置を採用しており、磁石材料はネオジウム焼結磁石である。また定格容量は 3 kVA で、磁石厚 5 mm・3 mm・1 mm の計 3 つの実器を製作した。図 5 に実器の外観を示す。

図 6 に無効電力特性の実測値と解析による計算値を示す。同図より、実器でも概ね設計通りの良好な結果が得られることが明らかとなった。



4. まとめ

本研究では、コンデンサレスで系統電圧の昇降が可能な永久磁石を有する新しい直交磁心型可変インダクタを提案した。

まず、RNA モデルを用いて磁石配置・磁石材・磁石厚の検討を行った。次に実器を製作し、概ね設計通りの良好な特性が得られることを明らかにした。

文献

1) O. Ichinokura, T. Jinzenji, and K. Tajima : “A New Variable Inductor for Var Compensator”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 29, pp. 3225-3227 (1993)

修士学位論文要約（令和 6 年 3 月）

磁気ギヤード SR モータに関する研究

岩城 圭悟

指導教員：中村 健二

A Study of Magnetic-gear SR motor

Keigo IWAKI

Supervisor: Kenji NAKAMURA

This paper proposes a novel magnetic-gear motor (MGM) that consists of an SR motor and a flux-modulated type magnetic gear, which is called a magnetic-gear SR motor (MG-SRM). An MG-SRM was designed and, by using finite element method, it was clarified that an MG-SRM can achieve wide speed versus torque characteristics, which an SR motor and PM motors cannot achieve. In addition, the designed MG-SRM was prototyped, and experimental validation was conducted. In the experiment, the measured maximum torque was 104 N·m, which exceeded the target of 100 N·m. Moreover, additional investigations to increase the output density of MG-SRM was conducted. First, a Halbach array was applied to the magnets of the high-speed rotor to reduce the flux density of the back yoke of the high-speed rotor. As a result, the power to weight ratio increased 14%. In addition, an investigation of advancement of excitation start angle was carried out to realize a constant output characteristic, which is required for a motor of electric vehicles. By advancing the starting angle of excitation compared to normal excitation, the output increased in all speed ranges, and it was clear that the target constant output characteristic was significantly exceeded, and the maximum output became 1.9 times larger.

1. はじめに

ダイレクトドライブモータは、機械式のギヤやトランスミッションが不要であるため、電気自動車 (EV) 用のインホイールモータに適する^{1),2)}。しかし、ダイレクトドライブモータに用いられる永久磁石 (PM) モータやスイッチトリアクタンズ (SR) モータは、移動体に要求される幅広い速度-トルク特性の実現が容易ではない。そこで本稿では、現有の小型 EV への適用を目指し、磁気ギヤと SR モータを一体化したインホイール磁気ギヤード SR モータの設計、試作、実機検証および高出力密度化の検討をしたので報告する。

2. 磁気ギヤード SR モータの提案

図 1 に、提案する磁気ギヤード SR モータ (MG-SRM) の諸元を示す。MG-SRM は磁束変調型磁気ギヤの内側に SR モータが組み込まれた構造を有するため、EV のタイヤホイール内への配置が可能である。本設計を以後“初期設計”と呼ぶ。設計目標は、最大トルクを 100 N·m、最高速度を 500 rpm とした。

図 2 に、有限要素法による特性算定結果を、2 種類の PM モータおよび SR モータと比較して示している。16p18s および 32p30s はそれぞれ 16 極 18 スロット、32 極 30 スロットの PM モータを示す。2 種類の PM モータと SR モータはいずれもインホイールモータに適するアウターローター構造である。比較のため、MG-SRM, PM モータ, SR モータの直径、積み厚は等しくし、直流電源電圧 48 V、電流実効値上限 30

A_{rms} の条件で特性の比較を行った。また、MG-SRM と PM モータでは磁石使用量も統一した。同図の電流密度対トルク特性より、MG-SRM は SR モータと磁気ギヤを組み合わせたことで、PM モータと同等のトルクが得られていることがわかる。

次いで、速度対トルク特性を見ると、MG-SRM は低速側で PM モータと同等、かつ SR モータの 3 倍の 120 N·m のトルクを達成した。また、高速側では SR モータと同等、かつ PM モータの 2 倍の 500 rpm の速度を達成した。よって、提案する MG-SRM は移動体に要求される幅広い速度-トルク特性が実現可能であることが明らかになった。

さらに、設計したモータの試作を行い、実機検証を行った。図 3 に、試作機の電流密度対トルク特性お

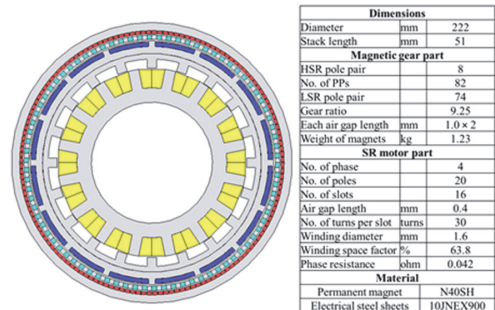


図 1 磁気ギヤード SR モータの諸元

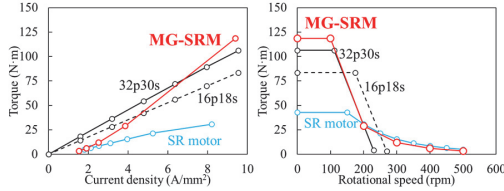


図2 電流密度対トルク特性および速度対トルク特性の算定結果

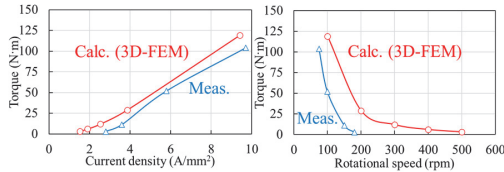


図3 電流密度対トルク特性および速度対トルク特性の測定結果

および速度対トルク特性を、先述の有限要素法による算定結果と併せて示す。電流密度対トルク特性は算定結果と傾きが概ね一致することがわかる。速度対トルク特性については、低速側で 104 N・m と目標値の 100 N・m を達成した一方で、最大速度は 180 rpm と、目標値の 500 rpm に到達しなかった。高速側の速度範囲拡大が今後の検討課題となる。

3. 磁気ギヤード SR モータの高出力密度化

次いで、初期設計から MG-SRM の出力密度を向上させるため、高速回転子の磁石へのハルバツハ配列の適用と、SR モータの励磁開始角の前倒しの2つの検討を行った。

まず、磁石の着磁方向を段階的に変化させるハルバツハ配列を高速回転子の磁石へ適用することを検討した³⁾。ハルバツハ配列は磁束が強まる面と弱まる面が存在し、強まる面を磁気ギヤ部側、弱まる面をSR モータ部に用いることで、SR モータ部に流入する磁束が削減され、バックヨークの厚み削減による軽量化および重量トルク密度の向上が期待される。

図4に、初期設計とハルバツハ配列を適用したMG-SRMの重量および重量トルク密度の比較を示す。棒グラフは重量、シンボルは重量トルク密度を示している。同図から、重量が初期設計の 9.97 kg から 9.10 kg に 8.7%削減可能で、重量トルク密度は 140 W/kg から 159 W/kg に 14%向上可能であることが明らかとなった。

次いで、初期設計において定出力特性の実現について検討を行った。EV用モータは、回転数とトルクの積である出力が高速域まで一定であることが求められ、これをSRモータの励磁開始角を初期設計時の通常励磁から前倒しを行うことで実現することを目指した。

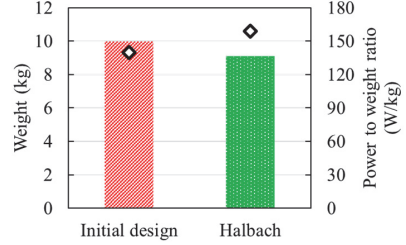


図4 ハルバツハ配列と初期設計の重量および重量トルク密度の比較

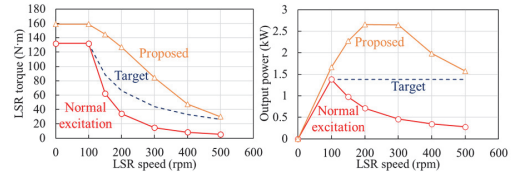


図5 励磁開始角の前倒し時の速度対トルク特性および速度対出力特性の算定結果

図5に、励磁開始角を前倒した際の速度対トルク特性および速度対出力特性を示す。通常励磁を赤、励磁開始角を前倒した結果をオレンジ、目標の定出力特性を青で示している。同図から励磁開始角を前倒すると通常励磁に比べて全速度領域でのトルク向上が可能であり、最大出力は 1.38 kW から 2.66 kW へ約 1.9 倍向上することが明らかになった。よって、励磁開始角を調整することで、目標とする定出力特性の実現が可能であることが示された。

4. まとめ

本研究では磁気ギヤとSRモータを組み合わせた新しい磁気ギヤードモータ(磁気ギヤードSRモータ)に関する検討を行った。まず、磁気ギヤードSRモータの提案を行い、提案モータはPMモータやSRモータでは実現できない幅広い速度トルク特性を実現できることを示した。次いで、設計したモータの実機検証を行い、目標トルクの 100 N・m を達成した。さらに、磁気ギヤードSRモータの高出力密度化に関する検討を行い、高速回転子の磁石配列へのハルバツハ配列の適用により重量トルク密度が 14%向上することを明らかに、また励磁開始角の前倒しにより定出力特性の実現および最高出力の 1.9 倍の向上が可能であることを示した。

文献

- 1) K. T. Chau *et al.*, *IEEE Trans. Magn.*, **43**, 6 (2007).
- 2) S. Chung *et al.*, *IEEE Trans. Ind. Elect.*, **63**, 1 (2016).
- 3) L. Jian *et al.*, *IEEE Trans. Energy Convers.*, **25**, 2 (2010).

修士学位論文要約（令和6年3月）

洋上風力発電用大型磁気ギヤに関する研究

岡崎 晃洋

指導教員：中村 健二

A Study of Large-scale Magnetic Gear for Offshore Wind Power Generation

Akihiro OKAZAKI

Supervisor: Kenji NAKAMURA

Offshore wind power generation, a method of power generation which does not emit greenhouse gases, has a problem with the high cost of power generation. In order to reduce the cost of power generation, it is essential to improve the reliability of the system, reduce its weight and the usage of magnet materials. Therefore, this study aims to construct a reliable, lightweight, and resource-saving offshore wind power generation system with magnetic gears that can transmit power without contact. First, a system for measuring flux density waveforms in the air gap of the flux-modulated-type magnetic gear was constructed, and a close relationship between the gap magnetic flux density and torque was clarified by comparing analysis and actual measurements. Next, we studied the improvement of torque density and the reduction of magnet usage in large magnetic gears for offshore wind power generation, and clarified that the application of Halbach array and multipolarization are effective.

1. はじめに

洋上風力発電は、発電時に温室効果ガスを排出しない再生可能エネルギーの一種として近年注目されている。一般的な風力発電機では風車の回転を機械式ギヤで増速して発電機に入力する。したがって、機械的な接触部を有し、定期的なメンテナンスが必要となる。風力発電設備の故障の20%はギヤ部で発生しているという報告¹⁾もあり、ギヤ部の信頼性向上は重要である。

ギヤ部の故障回避のため、風車の回転を直接発電機に入力するダイレクトドライブ機を用いた例も存在する。一方で、低回転速度でも出力を維持するには設備の大型化・大重量化が避けられない²⁾。

そこで本研究では、非接触で動力伝達可能な磁気ギヤを用い、高信頼・軽量・省資源な洋上風力発電システムを構築することを目的とし、磁束変調型磁気ギヤのギャップ磁束密度とトルクの関係の検証と洋上風力発電用大容量磁気ギヤのトルク密度向上・磁石使用量削減に関する検討をおこなった結果について述べる。

2. 磁束変調型磁気ギヤのギャップ磁束密度波形の実測と分析

図1に、検討対象とする磁束変調型磁気ギヤの試作機とそのギャップ磁束密度測定系を示す。本測定系を用いて試作ギヤのギャップ磁束密度の実測を行い、有限要素法(FEM)による解析結果との比較を行った。

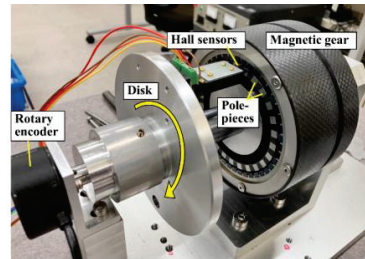


図1 ギャップ磁束密度波形の測定系の外観

図2に、平行配列磁石を適用した試作ギヤ外側回転子磁石の磁石磁束がポールピースによって変調された後の磁束密度波形の周波数成分分布を示す。同図より、外側回転子磁石極対数22と一致する成分に加え、4次成分が生じていることがわかる。これは内側回転子磁石極対数と一致し、トルク伝達に寄与する成分である。また、3次元解析値と実測値の4次成分を比較すると誤差は10%となっており、測定系が良好な精度を有していることが明らかとなった。

図3に、ハルバツハ配列磁石を適用した試作ギヤ外側回転子磁石の磁石磁束がポールピースによって変調された後の磁束密度波形の周波数成分分布を示す。同図より、ハルバツハ配列適用後の4次成分の大きさは平行配列と比較して24%増加した。

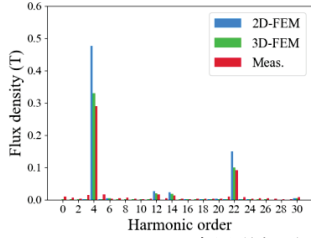


図2 パラレル配列適用磁気ギャップ磁束密度波形周波数成分

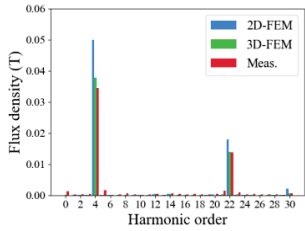


図3 ハルバツハ配列適用磁気ギャップ磁束密度波形周波数成分

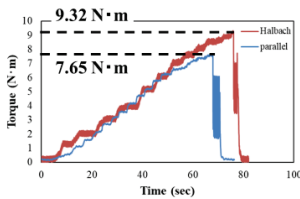


図4 パラレル配列適用磁気ギャップとハルバツハ配列適用磁気ギャップの脱調トルク実測結果

図4に、パラレル配列適用試作ギャップとハルバツハ配列適用磁気ギャップの脱調トルク実測結果を示した。ハルバツハ配列適用後の脱調トルクはパラレル配列比で22%増加した。これは変調波の周波数成分のうちトルク伝達に寄与する4次成分の増加率24%とおおよそ一致しており、磁束変調型磁気ギャップの脱調トルクとギャップ磁束密度成分のうちトルクに寄与する成分の間には密接な関係が存在することが明らかとなった。

3. 洋上風力発電用磁気ギャップのトルク密度向上・磁石量削減に関する検討

本章では、はじめに洋上風力発電用大型磁気ギャップの重量トルク密度向上に関する検討を行い、磁気ギャップを洋上風力発電用途に適用した場合に軽量化が可能であるか検証を行った。

図5に、本章で検討した洋上風力発電用大型磁気ギャップの重量トルク密度の比較を示す。内側回転子磁石・外側固定子磁石へのハルバツハ配列の適用と多極化によって重量トルク密度は大きく向上し、内外磁石へのハルバツハ配列適用と多極化を行った形状では、初期設計磁気ギャップと比較して重量トルク密度は4.7倍の531.2 N·m/kgに向上した。

以上の検討より、重量トルク密度の十分な向上が

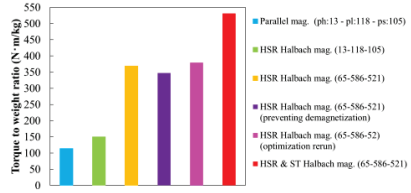


図5 重量トルク密度比較

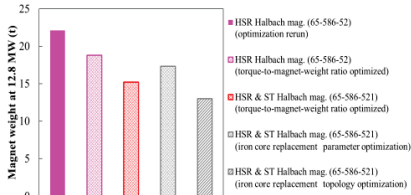


図6 磁石使用量比較

確認できたことから、次に磁石使用量の削減に関する検討を行った。重量トルク密度を最大化した形状の磁気ギャップにおいては、総磁石使用量のうち内側回転子磁石が大きい割合を占めていた。これを踏まえ、内側回転子磁石の一部を鉄心に置換し、磁気抵抗を低減することで磁石使用量を削減する検討を行った。また、前章の検討より、磁束変調型磁気ギャップにおいてトルクとギャップ磁束密度には密接な関係があることが明らかとなったため、置換鉄心形状最適化の目的関数として磁石量当たりのギャップ磁束密度を設定し、解析時間の短縮を図った。

図6に、本章で検討した洋上風力発電用大型磁気ギャップの磁石使用量の比較を示す。トポロジー最適化によって置換鉄心形状を最適化した磁気ギャップ形状の磁石使用量が最少であり、磁石の一部鉄心置換が磁石使用量削減に効果的であることが明らかとなった。

4. まとめ

磁気ギャップを用いた高信頼・軽量・省資源な洋上風力用システムの構築を目的に、磁束変調型磁気ギャップの特性向上に関する検討を行った。まず、磁束変調型磁気ギャップとギャップ磁束密度測定系を試作し、ギャップ磁束密度成分のうちトルクに寄与する成分と脱調トルクの間には密接な関係が存在することを明らかにした。次いで、洋上風力用大型磁気ギャップのトルク密度向上・磁石使用量削減に関する検討を行い、ハルバツハ配列適用・多極化・磁石の一部鉄心置換によってギャップ部の重量トルク密度と磁石使用量が改善可能であることを明らかにした。

文献

- 1) E. -J. Park, C. -S. Kim, S. -Y. Jung and Y. -J. Kim, 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 2529-2532 (2018)
- 2) A. D. Lilla, H. Dehnavifard, M. A. Khan and P. Barendse, 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 1356-1362 (2014)

修士学位論文要約（令和6年3月）

高速スイッチトリラクタン্সモータの瞬時トルク制御に関する研究

岡田 篤弥

指導教員：中村 健二

A Study of Instantaneous Torque Control Method
for High-Speed Switched Reluctance Motor

Atsuya OKADA

Supervisor: Kenji NAKAMURA

Motors are used in a wide variety of applications, and the demand for motors is increasing due to the recent shift to electrification in various fields, so it is essential to improve motor performance. One way to achieve this is to increase the speed of motors, which can produce more power than motors of the same size. A switched reluctance (SR) motor discussed in this study has a robust structure that allows a high-speed operation, but they are less efficient and prone to torque ripple due to its structure. To address this issue, previous research has proposed instantaneous phase torque distribution control (IPTDC) and demonstrated that IPTDC can reduce torque ripple at low-speed operation. In this study, I attempted to apply IPTDC to a high-speed SR motor with a maximum speed of 20,000 rpm and investigated the reduction of torque ripple.

1. はじめに

昨今では自動車や航空など各分野で電動化が進んでおり、その需要はますます大きくなっている。モータの性能向上の手法の一つとして、同一格のモータに対し出力を大きくできる高速回転化が挙げられる。スイッチトリラクタン্স(SR)モータは、構造が単純で堅牢という特長を有する一方、両突極構造に由来してトルクリプルが大きく、それに伴い振動・騒音が大きいという課題がある。上述の課題に対して先行研究では、瞬時相トルク分配制御(IPTDC)が提案され¹⁾、小型電気自動車用SRモータのトルクリプルや振動・騒音を低減可能であることが実証された。ただし、本モータの回転数はおおよそ1,000 rpm以下であり、回転数10,000 rpmを超えるSRモータに適用された事例はない。そこで本研究では、図1に示すような先に電動工具用に開発された最高回転数20,000 rpmの高速SRモータ²⁾に対して、IPTDCの適用を試みた。

2. 高速SRモータに適した制御手法の検討

先行研究で提案されたIPTDCは、励磁相切り替え

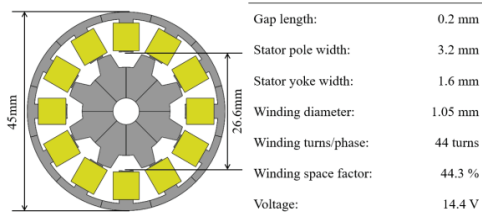


図1 12/8 高速SRモータの諸元

時に生じるトルクの谷を無くすため、切り替え前後の2つの相の合計トルクを指令値に追従させることで、リップルを低減する制御法である。IPTDCでは、設定したトルク指令値に対し、出力トルクが常に一定に追従できるようにトルク制御を行ったり、所望の角度で相電流が0 Aに減衰するよう励磁終了角を推定したりする。これにより各相で生じる負トルクの影響を最小限とし、トルクリプルを低減している。一方で、通電区間を非対向位置から対向位置までの間に制限しているため、特に高速域において励磁時間が不足し、十分なトルクを発生させることができないという課題が明らかとなった。そこで本論文では、励磁区間の拡大や励磁開始・終了時の処理を改善することで、高速領域におけるトルクを増加させ、トルク指令値に合計トルクが追従できる領域の拡大を図った。図2に示すように励磁区間を3つのセクションに分けて励磁を行うこととした。Section Iでは電流を俊敏に立ち上げるべく、強制的に励磁を行う。Section IIでは合計トルクがトルク指令値付近でほぼ一

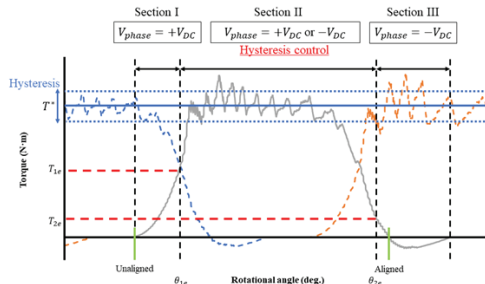


図2 IPTDCの概念図

定になるよう制御する. Section III では, 負トルクの発生を最小限に抑えるべく, 強制的にターンオフを行い, 速やかに減磁する. 以上のように, トルクを素早く立ち上げつつ励磁区間を拡張することで, 全体トルクがトルク指令値に追従する領域を広げる. これに伴い, 運転領域の拡大とトルクリップルの低減が期待される一方で, 負トルクの発生を許容するため効率の低下や制御性の悪化が懸念される. 各セクションの開始地点や終了地点を適切に設定することで, 負トルクの影響を最小にとどめている.

3. モータ特性の算定手法の検討

予備実験において, 三次元有限要素解析で導出された静止トルク特性や磁化特性が実機と乖離があることが予想された. これらの特性は励磁終了角推定や相トルク分配の処理に必要であり, トルクリップルの減少のためにはモータ特性の算定精度の向上が必要であることが認められた. 本論文では SR モータの静特性を, 実機試験を通じて測定し, 特性データの精度改善を試みた. 最初に磁化特性の導出を行った. コイルに鎖交する磁束は, コイル内に生じる逆起電力の時間積分により導出される. この逆起電力は, 測定で得られた電圧・電流波形より, 印加電圧から巻線および鉄心による電気抵抗に起因する電圧降下分を引くことで求められる. 有限要素解析と, 図3に示す実測で求めた磁化特性の比較により, 非対向位置と対向位置の両方において, 三次元有限要素解析によって得られた値と比較して, 実機の鎖交磁束が変化していることが明らかとなった. 以上で導出した磁化特性を用いて, 静止トルク特性を算定した. SR モータの出力トルクは磁気随伴エネルギー $W'_m(i, \theta)$ の角度の偏微分により求まる. また $W'_m(i, \theta)$ は図3の磁化特性の面積に相当する. これらを求めることで所望の静止トルク特性を導出した. 図4に実測の静止トルク特性と有限要素解析によって求めた静止トルク特性を比較したものを示す. これより, 実測より求めた静止トルク特性は解析で求めた特性よりも大きくなることを明らかにした.

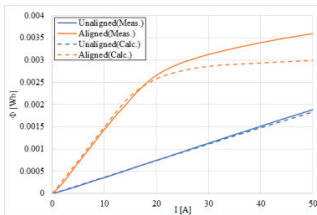


図3 磁化特性曲線

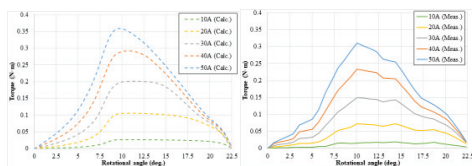


図4 静止トルク特性

4. 実証実験結果

図5にトルクリップル率 MAP を示す. トルクリップル率は, トルクの振幅を平均トルクで除したものである. 低速運転時にトルクリップル率は最小 90%まで低下したことが読み取れる. 従来の制御手法である通常励磁と比較して, ほぼすべての領域でトルクリップルが減少したことが明らかとなった. 図6に, 10,000rpm, トルク指令値 0.06 N·m でのトルク・電流波形を示す. このときのトルクリップル率は 105.7%であった. 本図より, 励磁範囲を拡大したことで, 励磁相の切り替わり地点におけるトルクの谷の発生が抑制されたことが了解される. また, 強制励磁により励磁相切り替え直後のスイッチングがなくなり, トルクが円滑に立ち上がっていることが明らかとなった.

5. まとめ

以上, 本研究では小型高速 SR モータのトルクリップル低減を実現する制御法について検討を行った. 高速 SR モータに適した IPTDC の適用により, トルクリップルが著しく低減できることを実証実験で明らかにした.

文献

- 1) H. Goto, A. Nishimiya, H. J. Guo, A. Honda, and O. Ichinokura, "Instantaneous torque control using flux-based commutation and phase-torque distribution technique for SR motor EV", The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 29, No. 1, pp.174-187 (2010).
- 2) 中村健二, 熊坂悠也, 磯部開太郎, 一ノ倉理: "電動工具用高速 SR モータの試作評価", 電気学会回転機研究会資料, RM-15-146(2015).

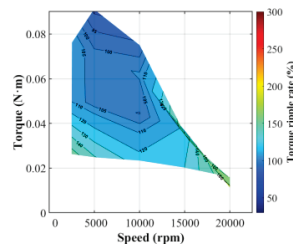


図5 トルクリップル率 MAP

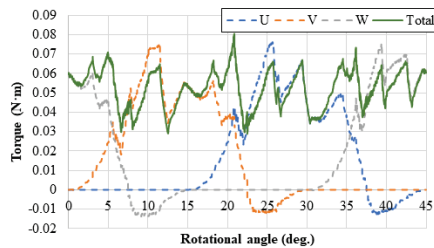


図6 トルク波形

修士学位論文要約（令和6年3月）

集中巻埋込磁石モータの性能向上に関する研究

尾花 輝哉

指導教員：中村 健二

A Study of Performance Improvement of Concentrated-Winding Interior Permanent Magnet Motor

Teruya OBANA

Supervisor: Kenji NAKAMURA

The objective of this research was to reduce the cost by reducing the amount of rare-earth magnets used in concentrated winding IPM motors. The design goal was to reduce the amount of rare earth magnets by focusing on the utilization of reluctance torque and optimization of magnet materials. It is known that the IPM motor targeted in this research has a high degree of freedom in magnet arrangement and shape, and the ratio of magnet torque and reluctance torque can be designed according to the structure. Focusing on this feature, this study optimizes the shape of the rotor barrier to improve the reluctance torque of IPM motors. Next, in order to reduce the amount of rare-earth magnets used to achieve lower cost, we studied the use of ferrite magnets in combination with neodymium magnets in the rotor magnets.

1. はじめに

埋込磁石 (IPM) モータは、永久磁石を回転子鉄心内部に埋め込んだモータの総称である。IPM モータは、マグネットトルクに加えてリラクタンストルクも利用できるため、高出力・高効率なモータとして、様々な用途に応用範囲を拡大し、適用機器の省エネルギー化に大きく貢献している。この IPM モータにおいて、レアアースの使用量削減や小型化が期待されている。図 1 に、基準とした IPM モータの諸元を示す。この IPM モータは、3 相 8 極 12 スロットの集中巻モータであり、車載や空調機器用で一般的に用いられているものである。

本稿ではまず、IPM モータのリラクタンストルク向上を目的として、2 次元有限要素法 (2D-FEM) を用いて、回転子の最適形状を探索した。次に、最適化した IPM モータにおいて、さらなる高トルク化とコスト削減を目的として、フェライト磁石の併用を検討した。なお、2D-FEM には、(株)JSOL 製の電磁界解析プログラムである JMAG Designer 21.0 を用いた。

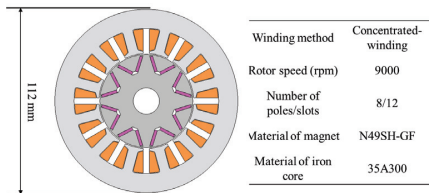


図 1 基準とする IPM モータの諸元

2. 回転子構造によるリラクタンストルク最大化の検討

本稿では、この IPM モータの固定子構成は変えずに、図 2(a)~(e)に示すように、V 字型、平板 1 層型、平板 2 層型、円弧 1 層型、円弧 2 層型の 5 種類の異なるフラックスバリアを有する回転子について、リラクタンストルクが最大となるフラックスバリアの寸法を探索した。なお、本検討ではリラクタンストルクのみに着目するため、回転子磁石は空気に置き換え、代わりに磁気ブリッジを省くことで、磁石磁束による磁気ブリッジの磁気飽和を考慮した。

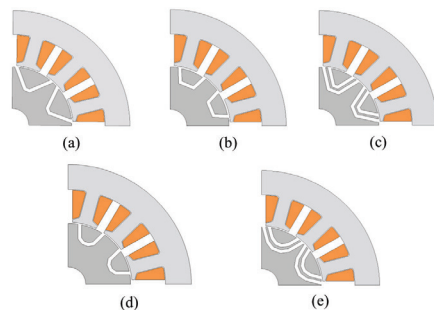


図 2 各回転子バリア形状の比較

2D-FEM を用いて、各回転子についてフラックスバリアの角度や長さ、深さなどの寸法を種々変化させ、リラクタンストルクが最大となったものを最適形状とした。解析条件は、電流位相角 45 deg., 回転数 9000 rpm, 電流振幅 15 A とした。各形状のリラクタンストルクを算定

した結果、円弧 2 層型が最もリラクタンストルクが大きく、基準モータの 1.25 倍であった。

この円弧 2 層型フラックスバリアにおいて、さらなるリラクタンストルク最大化のために遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて詳細な各種寸法を最適化した。図 3 に、GA による最適化を行った円弧 2 層型フラックスバリアに磁石を配置した IPM モータの諸元を示す。円弧 2 層型フラックスバリアを採用したことで磁石量を約 31% 削減することができた。図 4(a) に基準モータ、(b) に円弧 2 層型 IPM モータの電流位相角対トルク特性を示す。同図は最大総トルクが等しくなるように電流を調整した算定結果である。同図より、定格におけるリラクタンストルクの利用率が 22.7% で基準モータの約 3.1 倍まで向上していることがわかる。

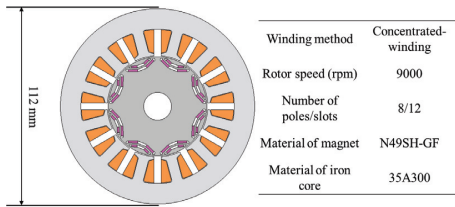


図 3 GA 最適化後の円弧 2 層型 IPM モータ

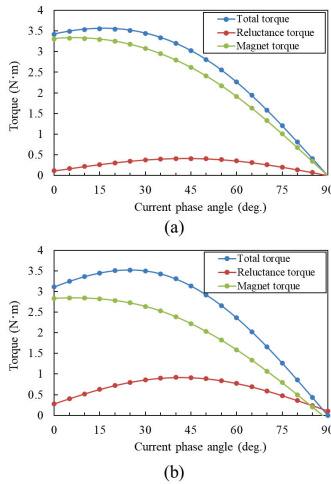


図 4 電流位相角対トルク特性

(a) 基準モータ、(b) 円弧 2 層型 IPM モータ

3. フェライト磁石併用による高トルク化と磁石量削減の検討

前節ではリラクタンストルクが最大となるように回転子のバリア形状を最適化し、磁石量を減らすことができた。さらなる磁石量削減と高トルク化を目指し、フェライト磁石の併用を検討した。本検討では、IPM モータの固定子構成を図 3 に示す IPM モータと同一にし、図 5 (a)~(f) に示すような 6 種類の異なる磁石配置を有する回転子について、トルク特性を算定した。解析

条件は、回転数 9000 rpm、電流実効値 15 A とした。

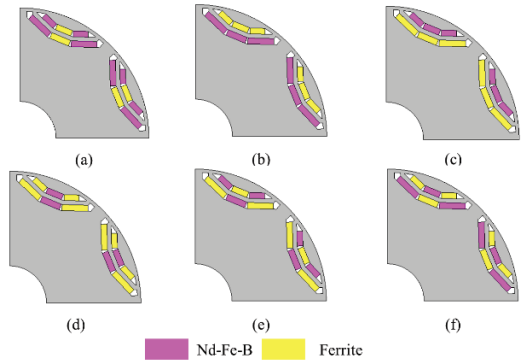


図 5 フェライト磁石を併用した各磁石配置比較

各磁石配置のトルクを算定した結果(a), (b)および(f)の磁石配置が図 3 に示す IPM モータのトルクを上回った。また、(b)および(f)の磁石配置が図 3 に示す IPM モータよりも磁石コストを削減することができた。

次いで、図 6 に(a), (b)および(f)の磁石配置について減磁解析を行った結果を示す。解析条件は定格電流の 3 倍である 45 A とした。同図より、磁石配置(b)では 2 層目両端のネオジウム磁石の端部がわずかに減磁しているのみである。したがって、トルク向上と磁石コスト、減磁耐力の観点から見て磁石配置(b)が最適な磁石配置であるといえる。

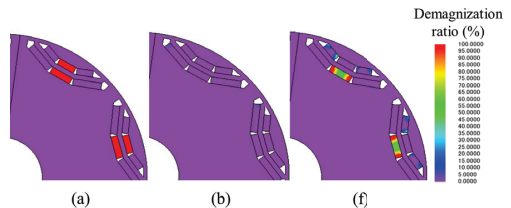


図 6 減磁解析結果比較

4. まとめ

本稿ではまず、IPM モータのリラクタンストルク向上を目指し、回転子バリア形状の最適化を行った。その結果、円弧 2 層型フラックスバリアを採用することで定格トルク時のリラクタンストルク利用率は 22.7% となり、これは基準モータの約 3.1 倍である。また、磁石量を基準モータと比較して約 31% 削減することができた。

次いで、フェライト磁石を併用した円弧 2 層型 IPM モータの最適な磁石配置の探索を行った。その結果、トルク向上と磁石コスト、減磁耐力の観点から(b)の磁石配置が最適な磁石配置であった。

今後は、リラクタンストルクのさらなる最大化を目指し、固定子構造の最適化について検討予定である。

修士学位論文要約（令和6年3月）

電動車両用分布巻埋込磁石モータの性能向上に関する研究

田村 一樹

指導教員：中村 健二

A Study of Performance Improvement of Distributed Winding Interior Permanent Magnet Motor for Electric Vehicle

Kazuki TAMURA

Supervisor: Kenji NAKAMURA

Electric vehicles (EVs) are being developed as a countermeasure to global warming. On the other hand, the depletion of resources used for main motors has become an issue, and there is a need to reduce the size and weight of motors for EVs. However, the output torque of a motor is proportional to the size of the motor, so the motor cannot be simply downsized. This study focuses on distributed wound embedded magnet motors (IPMSMs), which are commonly used in electric vehicles, and examines ways to improve the performance of these motors and increase their power density.

1. はじめに

近年、内燃機関自動車は排出する CO₂ による地球温暖化や、化石燃料の枯渇が問題視されている。これらの対策として、電気自動車 (EV) の研究開発が盛んに行われている。一方、EV の普及拡大に対して、主機用モータに使用される鉱物資源の枯渇が問題となっており、EV 用モータには小型・軽量化が要求される。しかし、モータ出力はモータ体格に比例することから、単純に小型化できない問題が存在する。

そこで本研究では、永久磁石同期モータ (PMSM) の中でも出力密度が高く、電気自動車に一般に使用されている分布巻埋込磁石モータ (IPMSM) に着目し、出力密度向上を目的としたモータの高性能化について検討する。IPMSM は磁石由来のマグネットトルクに加えて、回転子の磁氣的突極性に起因するリラクタンストルクを併用できることから、従来の PMSM 以上の性能を実現でき、磁石が回転子鉄心内にあるという構造上高速回転に向いているため、幅広い速度領域での運用が可能なるモータである。

本検討では、IPMSM の出力トルクを向上することでモータの使用材料を低減させ、出力密度を向上することを目的とする。加えて、高速回転時に問題となる交流銅損 (AC 銅損) を低減させ、効率の向上についても検討を行う。出力トルク向上では、リラクタンストルクを向上可能なフラックスバリア形状の探索、モータの多極化について検討を行った。銅損低減では、AC 銅損を分離することで効果的な低減方法について検討を行った。検討は (株) JSOL 製の電磁界解析ソフト JMAG Designer 21.0 を用いた 2 次元有限要素法 (2D-FEM) による解析で行った。

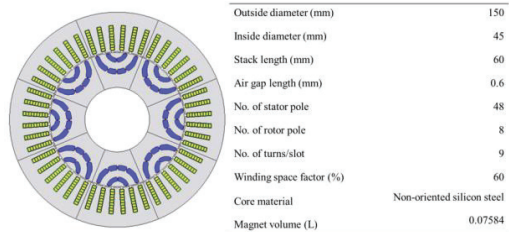
2. 埋込磁石モータの出力特性向上に関する検討

図 1 に本検討で比較対象とした Reference モータの諸元を示す⁽¹⁾。出力密度は 8.0~9.0 kW/kg、効率は Reference モータと同程度を目標とする。磁石材料は形状自由度が高く再利用可能なボンド磁石を使用する。

初めに、リラクタンストルクを向上可能なフラックスバリア形状について、平板 1 層形、V 字 1 層形、円弧 1 層形、円弧 2 層形、円弧 3 層形の 5 種類のバリア形状の最適化を行った。その結果、円弧 2 層形においてリラクタンストルクが最大となることが確認された。この結果について、円弧 1 層形、2 層形、3 層形の d 、 q 軸の磁束線図を用いて考察を行ったところ、固定子側も含めた磁束全体の流れを考えると、 q 軸方向には流れやすく、 d 軸方向には流れにくくなるようにフラックスバリアを設ける必要があることが明らかとなった。

考察より、リラクタンストルク最大化の観点から望ましいバリアは磁束の流れ、すなわち磁束線図に基づいて決めることが良いことが明らかとなった。そこで、磁束線の特徴を捉えたフラックスバリアを遺伝的アルゴリズム (GA) により作成した。その結果、円弧 2 層形から約 20%リラクタンストルクが向上することが確認された。

次に、最適化したフラックスバリア内に磁石を配置し、

図 1 Reference モータの諸元⁽¹⁾

IPMSMとしてReferenceモータと比較を行った。この時、使用する磁石量を一定とし、磁石表面積を確保するため2層目バリアを薄くした(Model 2)。続いて、さらなる出力トルク向上と使用材料低減として、モータの多極化について検討を行った。多極モータはReferenceモータをベースに8極から12極にしたモータである。この時、無負荷誘起電圧定数が同じになるようにスロット内ターン数を調整し、寸法は比例計算から定めた。

図2にReferenceモータとModel 2, 多極モータの電流位相角対トルク特性の算定結果を示す。結果より、フラックスバリアを最適化することで出力が約3%向上し、多極化することでは約20%向上することが確認された。図3にReferenceモータと多極モータの34000 rpm, 50 kW 出力時の損失の内訳と効率を示す。結果より、多極モータの銅損が大幅に増加し、効率が低下していることが確認された。

以上の検討から、バリアの最適化および多極化によって出力トルクの向上が可能であることが明らかとなった。一方、多極化では動作周波数上昇によって銅損が増加することが問題となった。

3. 交流銅損低減に関する検討

銅損増加について、AC 銅損の分離を行い、低減策について検討を行った。図4にReferenceモータと多極モータのAC 銅損の内訳を示す。分離した結果、スロット内近接効果の影響が大きいことが判明した。そこで、低減策として、スロット数増加、素線分割、軸長短縮について検討を行った。スロット数増加では、多極モータのスロット数を36スロットから2~4倍まで増やしたモデルについて銅損の算定を行った。その結果、4倍まで増やした144スロットで銅損が約50%低減できることが確認された。

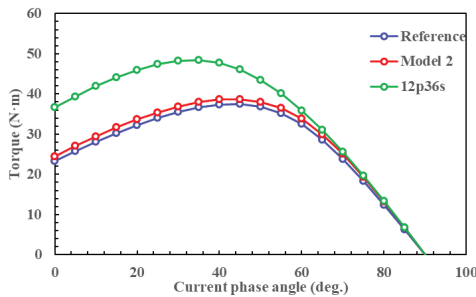


図2 電流位相角対トルク特性

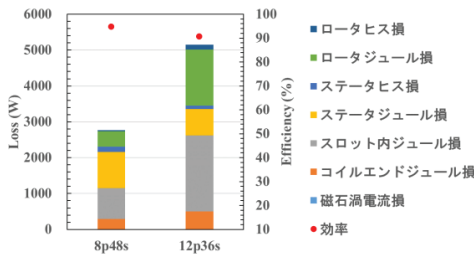


図3 損失・効率比較

素線分割でも、スロット中央までの素線を分割することで銅損が約50%低減可能であることが判明した。

軸長短縮では、出力トルクをReferenceモータと同程度となるように軸長を調整したところ、銅損が約25%、鉄損が約20%低減された。

最後に、3つの低減策を施した12p72sモータを作成し、Referenceモータと損失・効率の比較を行った。図5にReferenceモータと12p36sモデル, 12p72sモデルの損失の内訳と効率を示す。結果より、損失がReferenceモータと同程度まで低減され、効率もReferenceモータと同程度まで向上した。加えて、使用材料低減より出力密度8.94 kW/kgと目標値を満たすことが確認された。

4. まとめ

以上、本研究ではEV用IPMSMの高性能化として出力密度向上を目的に、フラックスバリア最適化と多極化、銅損低減方法について検討を行った。最適化と多極化では最大で約20%出力トルク向上が確認され、銅損低減では3つの低減策を施すことでReferenceモータと同程度の効率を実現でき、出力密度の目標値を満たすことが確認された。

文献

- 1) 成瀬賢哉, 金忠植, 萱野雅浩, 度會重起, 御手洗浩成 (愛知製鋼), 中村健二 (東北大学) 「Nd系ボンド磁石を活用した電動アクスル向け高出力密度モータの開発」
- 2) S. Kitamura, J. Kaneda, T. Kobayashi, M. Ito, and M. Komuro: "To improve the power factor of synchronous reluctance motors," Hitachi Ltd. Public License, Japan Patent Office (2002.7.12)

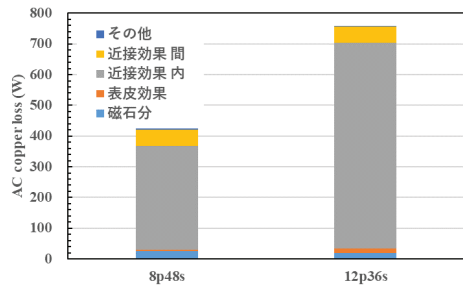


図4 AC 銅損分離結果

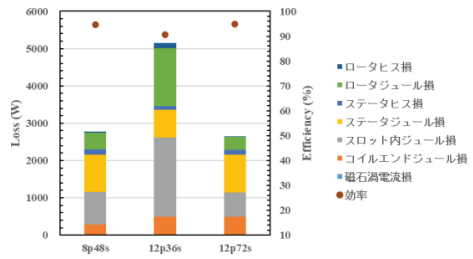


図5 銅損低減後の損失・効率比較

修士学位論文要約（令和 6 年 3 月）

小型 EV 用インホイール・アキシヤルギャップ型 SR モータの 駆動領域拡大に関する研究

西海 悠介

指導教員：中村 健二

A Study of Drive Range Expansion of In-Wheel Axial-Flux SR Motor for Compact EV

Yusuke NISHIGAI

Supervisor: Kenji NAKAMURA

In previous study, an axial-flux-type switched reluctance motor (AFSRM) was prototyped, and a compact electric vehicle (EV) with AFSRMs for the in-wheel direct drive was developed. It was confirmed that the prototype AFSRM satisfied the target torque for compact EV driving. However, the driving range of the developed EV was not large enough since its output torque decreased at the high-speed region with a conventional instantaneous phase torque distribution control (IPTDC) which is proposed in previous study. This paper presents an improved IPTDC to expand the driving range of the EV. The validity and usefulness are proved by simulation and experiment.

1. はじめに

近年、内燃機関自動車は排出する CO₂による地球温暖化や化石燃料の枯渇が問題視されている。これらの対策の一つとして、電気自動車(EV)の研究・開発が盛んに行われている。EV の駆動方式の一つとしてインホイールダイレクト駆動が提案されている。この方式は、ホイール内部にモータを格納する方式であり、二次電池の搭載スペースの拡大や、動力伝達機構の省略による機械損の低減、各駆動輪の独立制御による走行性能の向上が期待される。しかし、インホイール方式はモータの搭載スペースが限られ、さらに機械的な外乱や高温環境下での駆動に耐える堅牢性と信頼性が求められる。

そこで、本研究ではインホイールダイレクト駆動に適するモータの一つとして、スイッチトリラクタンس(SR)モータに着目した。SR モータは鉄心と巻線のみで構成されるため、堅牢且つ安価である¹⁾。また、永久磁石が不要であることから、惰行時にいわゆる引きずり損が生じず、また逆起電力も生じないため、電気的な安全性・信頼性も高い。

先行研究において図1に示す小型 EV への適用を前提とし、EV の駆動用モータとして図2に示すダブルステータ型のアキシヤルギャップ型 SR モータ (AFSRM) の設計・試作が行われた²⁾。設計時の目標トルクを実証試験において達成し、走行試験にも成功したが、従来のモータ制御手法では、高速・高負荷時におけるトルクが著しく低下することが明らかとなった。

そこで本研究では、高速・高負荷時におけるトルクを向上させ、EV 用モータとしての駆動範囲を拡大させる制御手法について検討を行った。

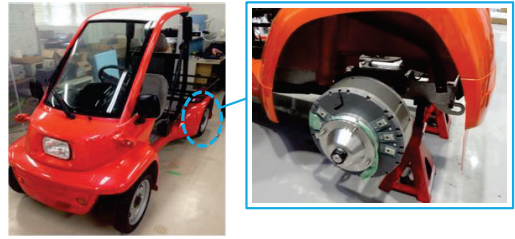


図1 インホイール AFSRM 搭載の小型 EV

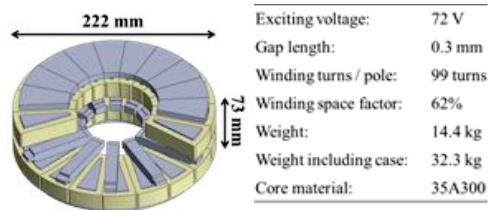


図2 試作 AFSRM の基本構成

2. AFSRM の駆動領域拡大に適した制御手法に関する検討

先行研究において、簡便で高効率な SR モータ制御手法として瞬時相トルク分配制御法 (IPTDC) が提案された³⁾。IPTDC ではアクセルからのトルク指令値に対して出力トルクが一定に追従できるようにトルク制御が行われる。また、IPTDC では所望の角度で相電流が 0A に減衰するように励磁終了角を推定している。これにより各相で生じる負トルクの影響を最小限にとどめているが、通電区間が固定されているため、高速回転時では通電時間が不足し、所望のトルクの発生に必要な電流が確保できないという

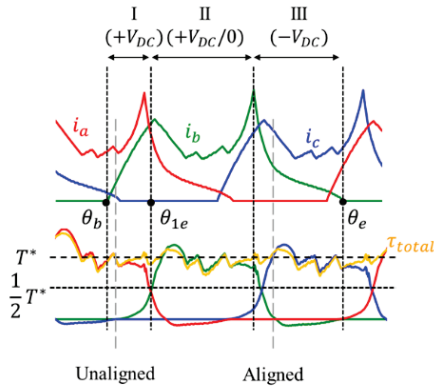


図3 提案制御手法の概念図

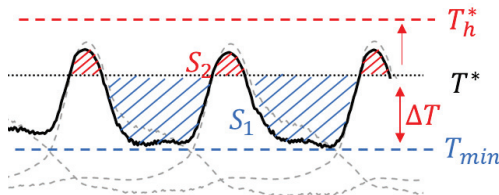


図4 平均トルク制御の概念図

課題があった。そこで本論文では、回転速度やトルク指令値などモータの駆動状況に応じて通電区間を変化させる制御手法を提案する。

図3に提案する制御手法の原理を示す。提案手法では励磁区間を3つのSectionに分けて制御する。Section Iでは $\theta = \theta_{1e}$ において相トルクがトルク指令値 T^* に対して $1/2 T^*$ を達成するように強制励磁する。Section IIではヒステリシス制御を行い、トルク指令値に対し合計トルクが追従するように制御を行う。最後にSection IIIでは次相のトルクが十分に立ち上がるまでトルクを維持する一方で、負トルクの発生を最小限に抑える必要がある。そのため、 $\theta = \theta_e$ の時に相電流が20Aとなるよう励磁終了角を算出する。

さらに、トルク制御法についても改良を行った。従来はトルク指令値に対して瞬時トルクが一定になるように制御されていたが、通電区間を可変にしてもなおトルクが追従できない領域が存在することがわかった。そこで、瞬時トルクではなく周期平均トルク指令値へ追従できるよう制御することでトルク特性の向上を図った。図4に平均トルク制御の原理を示す。トルク指令値 T^* に対して不足分のトルクを表す面積 S_1 と余剰分のトルクを表す面積 S_2 が存在するが、 $S_1 = S_2$ のとき、合計トルクは平均的に指令トルクに追従することが了解される。これを実現するため、トルク指令値 T^* と合計トルクの最小値 T_{min} との差を ΔT とすると、(1)式で定義される T_h^* をプログラム内での見かけ上のトルク目標値として制御する。ここで、 K はゲインである。

$$T_h^* = T^* + K \times \Delta T \quad (1)$$

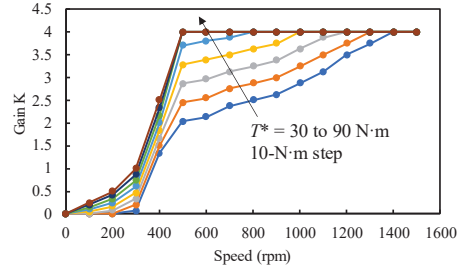


図5 実験的に導出したゲイン特性

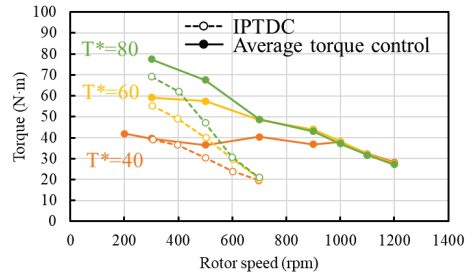


図6 平均トルク制御の速度-トルク特性

3. 実証試験結果

上記の制御手法の検証のため、モータベンチを用いて実証試験を行った。まず、(1)式にけるゲイン K について、指令値への追従性を考慮して実験的に導出した。図5に導出したゲイン特性を示す。実証試験では同図のゲイン特性を、トルク指令値と回転数を入力としゲイン K を出力とするルックアップテーブルとして実装し、EV用モータとして重要である同一プログラムでの駆動を可能とした。図6に実験により取得した速度-トルク特性を示す。同図より、IPTDCと比較して駆動領域が大幅に拡大し、700rpmでは従来の2.4倍のトルクを得られることが了解される。また、指令値への追従性も大幅に向上する結果となった。

4. まとめ

以上、本研究では小型EV用AFSRMの駆動領域拡大に適した制御手法について検討した。従来手法のIPTDCと比較して、中速域でのトルク特性が大幅に向上し、高速機でもある程度のトルクを出力できるようになったことが実証試験でも明らかとなった。

文献

- 1) R. C. Becerra, M. Ehsani, and T. J. E. Miller: "Commutation of SR Motors", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 8, pp. 257-263 (1993)
- 2) 高瀬圭祐・後藤博樹・一ノ倉理, "インホイール用ダブルステータ型アキシヤルギャップSRモータの試作試験", 電気学会回転機研究会資料, RM-15-145 (2015)
- 3) Hiroki Goto, Hai-Jiao Guo and Osamu Ichinokura: ICEMS 2006, LS4C-1(2006)

修士学位論文要約（令和 6 年 3 月）

多視点ステレオのための NeRF を用いた
デプスマップ推定の高精度化に関する研究伊藤 慎太郎
指導教員：青木 孝文Accuracy Improvement of Depth Map Estimation
Using NeRF for Multi-View StereoShintaro ITO
Supervisor: Takafumi AOKI

In this paper, we propose a method to refine the depth maps obtained by Multi-View Stereo (MVS) through iterative optimization of Neural Radiance Field (NeRF). MVS accurately estimates the depths on object surfaces, and NeRF accurately estimates the depths at object boundaries. The key ideas of the proposed method are to combine MVS and NeRF to utilize the advantages of both for estimating accurate depth maps. Through a set of experiments using the public datasets consisting of multi-view images, we demonstrate the effectiveness of the proposed method compared to conventional methods in terms of depth map estimation and 3D reconstruction.

1. はじめに

高性能な計算機の普及に伴って様々な用途で日常的に 3 次元データが活用されるようになり、高品質な 3 次元データを簡便に取得できる技術が求められている。多視点 3 次元復元は、複数の異なる視点で撮影された画像（多視点画像）のみから物体の 3 次元形状を計算機上で再構成する技術である。一般に、多視点 3 次元復元の多くは、カメラから物体までの距離（デプス）を画素値とするデプスマップを推定し、それらを統合することで物体の 3 次元形状を復元する。代表的な手法である多視点ステレオ (Multi-View Stereo: MVS)¹⁾ では、視点間のテクスチャの類似度に基づいたデプスマップ推定を行う。そのため、テクスチャの豊富な物体表面において高精度にデプスを推定できる一方で、テクスチャの乏しい領域や物体境界において推定誤差が生じやすい。また、Neural Radiance Fields (NeRF)²⁾ は、多視点画像からシーンの輝度場を推定し、カメラと対象物を結ぶ光線上の輝度場から任意視点の画像を合成する技術であり、輝度場のレンダリングにより各視点のデプスマップを合成することができる。テクスチャが乏しい領域や物体境界に対して輝度場から高精度なデプスを推定できる一方で、物体表面のデプスが必ずしも高精度であるとは限らない。本論文では、多視点ステレオと NeRF のそれぞれで得られるデプスマップの特性

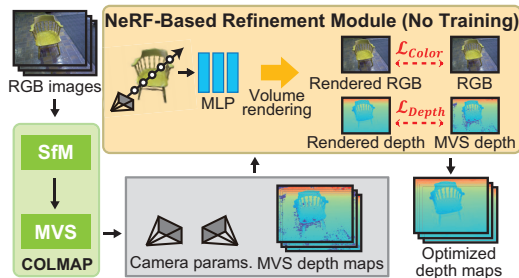


図 1 提案手法の概要

が相補的であることを利用し、多視点画像から推定されるデプスマップを高精度化する手法を提案する。提案手法では、NeRF を繰り返し最適化する洗練モジュールにより、多視点ステレオで推定されたデプスマップを高精度化する^{3) 4)}。公開データセットを用いた精度評価実験を通して、提案手法の有効性を検証する。

2. NeRF に基づくデプスマップの洗練

提案手法の概要を図 1 に示す。まず、多視点画像を入力として、COLMAP^{1) 5)} を用いて各視点のカメラパラメータとデプスマップを求める。次に、3 次元空間の輝度場を表す Multilayer Perceptron (MLP) の最適化を行う。最適化には輝度場からレンダリング

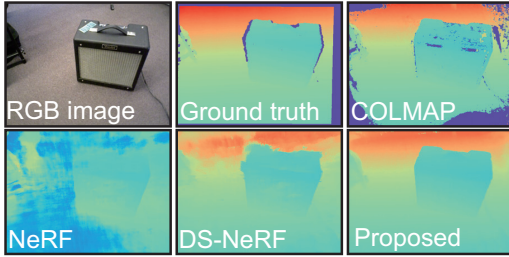


図2 各手法におけるデプスマップ推定の結果

Dataset	Method	SILog ↓ [log(mm)×100]	$\delta < 1.25$ ↑ [%]
Redwood	COLMAP ¹⁾	12.84	85.71
	NeRF ²⁾	10.54	58.10
	DS-NeRF ⁹⁾	1.617	85.83
	Proposed	0.9399	89.49

表1 デプスマップ推定の定量的評価

された値と真値の色の再構成損失 \mathcal{L}_{Color} とデプス損失 \mathcal{L}_{Depth} を用いる。 \mathcal{L}_{Color} は平均二乗誤差である。 \mathcal{L}_{Depth} はデプスの Huber 損失に基づいた目的関数である ⁴⁾。 レンダリング時の微小間隔 ϵ を閾値として、誤差が閾値より大きい場合は L1 損失を、誤差が閾値以下の場合は L2 損失を用いることで、外れ値にロバストな最適化が期待される。最後に、最適化された MLP を用いた輝度場のボリュームレンダリングにより、各視点に対するデプスマップを取得する。

3. 公開データセットを用いた精度評価実験

Redwood-3dscan (Redwood) ⁶⁾ を用いて、提案手法および比較手法によるデプスマップ推定の精度を評価する。デプスマップ推定の精度評価指標には、デプスのスケール変化に依存しない SILog ⁷⁾ と、推定値と真値の割合が閾値 t より小さい画素の画素全体に対する割合を示す $\delta < t$ を用いる。SILog は値が小さいほど推定精度が高いことを示す。 $\delta < t$ は値が大きいほど推定精度が高いことを示す。また、DTU データセット ⁸⁾ を用いて、3次元復元の精度を定性的に評価する。提案手法は従来手法と比較してデプスマップ推定の精度が向上した (表1)。提案手法により推定されたデプスマップは、COLMAP と比較して欠損が少なく、DS-NeRF と比較して物体境界付近のノイズが少ない。以上より、提案手法における多視点ステレオと NeRF の組み合わせは有効であると考えられる (図2)。提案手法により復元された3次元点群は、COLMAP と比較して煙突の近くに誤対応点が少なく、屋根の表面が正確に復元されている (図3)。これは、提案手法が物体境界付近や低テク



図3 3次元復元の結果

スチャ領域においても COLMAP より高精度にデプスマップを推定できたためだと考えられる。

4. まとめ

本論文では、多視点ステレオで推定されたデプスマップを NeRF に基づいて高精度化する手法を提案した。公開データセットを用いた精度評価実験により、提案手法の有効性を示した。今後の展望として、魚眼カメラや 360 度カメラなどを用いたユニバーサルな 3次元復元の実現が挙げられる。

文献

- 1) J.L. Schönberger, E. Zheng, M. Pollefeys, and J. Frahm, “Pixelwise view selection for unstructured multi-view stereo,” Proc. European Conf. Computer Vision, pp.501–518, 2016.
- 2) B. Mildenhall, P.P. Srinivasan, M. Tancik, J.T. Barron, R. Ramamoorthi, and R. Ng, “NeRF: Representing scenes as neural radiance fields for view synthesis,” Proc. European Conf. Computer Vision, pp.405–421, Nov. 2020.
- 3) S. Ito, K. Miura, K. Ito, and T. Aoki, “Depth map estimation from multi-view images with NeRF-based refinement,” Proc. IEEE Int’l Conf. Image Processing, pp.2955–2959, Oct. 2023.
- 4) S. Ito, K. Miura, K. Ito, and T. Aoki, “Accuracy improvement of depth map estimation from multi-view image using NeRF,” Proc. IEEE Conf. Visual Communications and Image Processing, pp.1–5, Dec. 2023.
- 5) J.L. Schönberger and J. Frahm, “Structure-from-Motion revisited,” Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.4104–4113, 2016.
- 6) S. Choi, Q. Zhou, S. Miller, and V. Koltun, “A large dataset of object scans,” CoRR, vol.abs/1602.02481, pp.1–7, 2016.
- 7) D. Eigen, C. Puhrsch, and R. Fergus, “Depth map prediction from a single image using a multi-scale deep network,” Proc. Conf. Neural Information Processing Systems, vol.27, pp.1–9, Dec. 2014.
- 8) R. Jensen, A. Dahl, G. Vogiatzis, E. Tola, and H. Aanaes, “Large scale multi-view stereopsis evaluation,” Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.406–413, June 2014.
- 9) K. Deng, A. Liu, J.Y. Zhu, and D. Ramanan, “Depth-supervised NeRF: Fewer views and faster training for free,” Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.12882–12891, June 2022.

修士学位論文要約（令和6年3月）

機械学習を用いたボトルネックリンクにおける競合フロー推定に関する研究

夏 澤 佑

指導教員：長谷川 剛

Machine learning-based estimation of the number of competing flows at a bottleneck link

Zeyou XIA

Supervisor: Go HASEGAWA

A main factor that hindered the performance of most congestion control algorithms in the current Internet is the lack of observable information about the network congestion situation. The most cost-effective and least complex way of tackling the problem of congestion detection is to implement a local solution based on the information gathered on the sender. The number of competing flows on the network bottleneck is one of the indicators of the network congestion situation. In this paper, we explore the possibility of estimating the number of competing flows in a network bottleneck using machine learning trained on locally observable information. The trained classification model results in an accuracy of 1.0 when the number of competing flows it encounters is trained in advance. And the regression method can have a MAPE of around 30 [%] in most situations for the number of competing flows that have not been trained into the model.

1. Introduction

As the modern-day network is getting increasingly complex, more and more advanced congestion control algorithms are being proposed to improve the utilization of bandwidth usage as well as the fairness between competing flows. A main roadblock to continually improving the performance of these algorithms comes from the lack of observable information about the network environment. In today's Internet communication, most senders can only detect the network congestion based on only the observable information by the sender. As such, a locally deplorable solution for congestion detection is essential.

The flows that are competing in a network path can have many effects on our own flow. One of the effects is caused by the number of competing flows in the network bottleneck. However, due to the complex and diverse nature of the network environment itself, isolating the influence of the number of competing flows on our congestion control algorithms has been a challenge, and relatively few research studies have been conducted in this regard.

[1] demonstrated the capability of machine learning models to distinguish the congestion control algorithms utilized by competing flows, showcasing

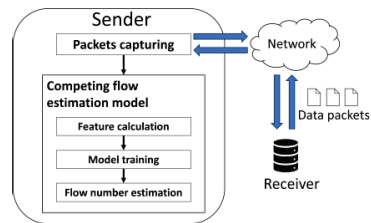


Fig. 1 Proposed method

the possibility of estimating the competing flows' properties by observing our own flows. [2] discussed the application of deep learning techniques to solve the TSC problem. However, the application of these methodologies within the domain of analyzing the network environment remains under-explored.

In this paper, we explored the possibility of estimating the number of competing flows using machine learning. We propose a method to train a machine learning model that can estimate the number utilizing only locally observable information by the data flow sender. This ensures that the implementation of the method would be local without any modification to other devices needed. Our method includes training the models with the Time Series Classification-based (TSC) method and regression-based method. Then, we

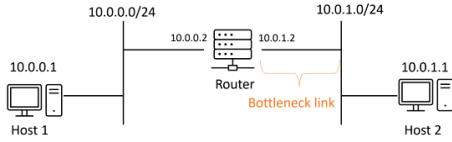


Fig. 2 Virtual environment topology

implement the proposed method in a virtualized network environment to evaluate its accuracy.

2. Methodology

Fig. 1 shows the overview of our proposed method. The main focus of our research is to experiment with the locally observable data to estimate the number of competing flows. The methodology we propose involves training a machine learning model utilizing data captured from the network interface of the data sender. Features used to train the machine learning model are calculated based on the locally captured flows.

We used 2 methods for the estimation: the Time Series Classification (TSC)-based method and the regression-based method. We employed a Convolutional Neural Network (CNN) model with 3 layers to perform the machine learning task. To evaluate the accuracy of each model, we use categorical cross-entropy as the loss function for the TSC-based method and Mean Absolute Percentage Error (MAPE) for the regression-based method.

3. Evaluation results

For the evaluation environment, we designed and executed experiments within a virtualized environment that emulates real-world scenarios for the assessment of our proposed estimation technique. The topology is shown in Fig. 2.

The packets have been sent using iperf and captured by tcpdump at Host 1. We calculate the features described before from the captured flow and assembled them into samples with 100 data points for each feature. The delay and other parameters governing the experiments are managed at the outgoing network adapter of Router to Host 2 interface using netem.

3.1 Performance of TSC-based method

The bottleneck bandwidth is set to be 10 [mbps] and the delay is set to be 50 [ms] for this test. We collected 4,500 samples of flow data for training with 15, 25, 35, ..., 155 flows of competing flows in the background. 3,000 samples of flow data were collected for testing, half of which has the same number of background flows and the other half have different number of background flows. The prediction results on testing

Tab. 1 Classification result on trained samples

True label	Prediction														
	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155
15	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0
85	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0
95	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0
105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0
115	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0
125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0
135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0
145	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0
155	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

Tab. 2 Most frequent classification result on non-trained flow samples

True label	Prediction														
	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155
10	97	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	63	0	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	90	0	0	0	0	0	5	0	0	5	0	0	0	0	0
40	0	0	26	74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	37	19	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	3	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61
70	2	76	12	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	94	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0	0	1	90	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0
110	0	0	0	0	0	1	0	0	60	0	0	17	2	0	20
120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0
130	0	0	0	0	0	17	15	14	0	0	0	11	19	0	0
140	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	33	0	0	0	0	35	0	0	0	32	0

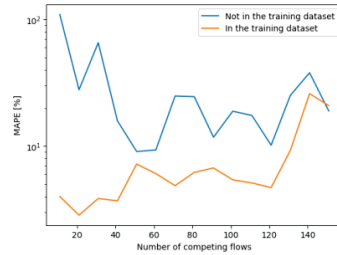


Fig. 3 Estimation results using regression-based method

dataset with trained number of competing flows achieve accuracy of 1.0, but with non-trained samples, the variance in the classification result if the number of competing flows that are not trained is obvious.

3.1 Performance of regression-based method

With regression-based method, the MAPE of the model on testing dataset with trained number of competing flows is averaging under 10 [%], as shown in the Fig. 3 with the orange line. Even with non-trained testing dataset, the MAPE is still averaging around 30 [%].

References

- 1) K. Maeta, G. Kitagata and G. Hasegawa, 2022 Thirteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), Barcelona, Spain, 2022, pp. 376-381,
- 2) Hassan Ismail Fawaz, Germain Forestier, Jonathan Weber, Lhassane Idoumghar, and Pierre-Alain Muller. 2019. Data Min. Knowl. Discov. 33, 4 (Jul 2019), 917–963.

修士学位論文要約（令和6年3月）

静脈を考慮した最適な肝切除領域推定に関する研究

来栖 弘美

指導教員：張山 昌論

Research on Optimal Estimation of Resected Regions Considering Hepatic Veins

Hiromi KURUSU

Supervisor: Masanori HARIYAMA

In liver surgery, it is common to extract regions of tumors and blood vessels from CT images by image processing before surgery, and to plan resected regions on the obtained computer graphics. This estimation of the resected regions is done manually by surgeons based on their experience, and the planning results vary from surgeon to surgeon. In this study, we aim to propose a system for estimating the optimal resected regions automatically. In a conventional method, the resected regions are estimated based on only the structure of portal vein. However, the estimated resected regions could cut the hepatic vein, and it could cause the liver functional decrease due to congestion. This article presents a software that automatically estimates optimal resected regions considering the functional decrease due to congestion of hepatic vein.

1. はじめに

肝臓外科手術では、手術前に CT 画像から腫瘍や血管の領域を画像処理により抽出し、医師がコンピュータグラフィックス上で切除領域のプランニングを行う。この切除領域のプランニングでは、切除領域の大小で「患者への負担」と「腫瘍の再発可能性」がトレードオフの関係になり、経験を重ねなくては最適な切除領域が決定できないという医師の経験が必要な非常に難しい課題がある。この問題に対して本研究では、最適切除領域を自動で推定をするシステムの提案を目指す。

また、切除領域プランニングは肝臓の血管の一つである門脈の構造に基づき行われており、静脈が切除されることによる肝機能低下に関しては考慮されてこなかった。本研究では静脈が切除された際の肝機能低下を考慮することにより、患者への負担の軽減と再発リスクの低下を実現するシステムを構築する。

2. 従来の肝切除領域推定のアルゴリズム

医師は肝臓の手術前プランニングの際には、ある医学的理論に基づいて切除領域を決定している。腫瘍は、最も距離の近い門脈から栄養をもらい成長し、さらにその下流方向へ転移するという性質を持つ。この性質から腫瘍の再発リスクのある領域、つまり切除すべき領域を推定することができ、この領域を支配領域と呼ぶ。つまり全体の切除領域を決定するためには、腫瘍に一番近い距離にある門脈（通常は複数）を選択し、その門脈の切除点から支配領域を求め、各門脈の支配領域の和集合をとればよい。これに関して独自の評価関数として腫瘍支配率(Tumor

Domination Ratio)を定義した。

$$TDR = \frac{(\text{門脈上のある点が腫瘍を支配している体積})}{(\text{腫瘍全体の体積})} \times 100$$

これは腫瘍全体の体積のうち、門脈上のある点の支配領域が腫瘍を支配している体積の割合を表すもので、すなわち TDR が大きい門脈点は腫瘍と関係が深い点ということになる。この評価関数により、腫瘍と門脈の関係の定量的な評価が可能になり、切除領域の決定をコンピュータ上で扱うことができるようになる。

外科手術におけるトレードオフの課題解決のため、システムは「患者への負担」と「腫瘍の再発可能性」を考慮する必要がある。そこで患者への負担を切除領域の大きさの制約として制約条件にし、腫瘍の再発可能性を TDR によって数値化し切除領域全体の TDR を最大化することを目的関数として数理最適化問題で数式化できる。各門脈 b の腫瘍支配率を $TDR(b)[\%]$ 、切除体積を $V(b)[cc]$ 、切除許容体積を $V_{max}[cc]$ とする。また、切除点を持つ門脈の集合を S とする。

▶目的関数

$$\sum_{b \in S} TDR(b) \rightarrow \text{最大化}$$

▶制約条件

$$\sum_{b \in S} V(b) \leq V_{max}$$

3. 静脈を考慮したアルゴリズム

ここまで門脈のみをベースとした最適切除領域推定システムを説明した。門脈のみをベースにしたシステムは、一見最適な結果であっても静脈の切除によ

る肝機能低下領域が大きく広がってしまい、患者の負担が大きくなる場合がある。この領域のことを鬱血領域と呼ぶ。こういった静脈切除による鬱血領域の影響を考え、鬱血領域を切除領域の最適化問題に組み込むことでシステムの改善を図る必要がある。

鬱血領域の肝機能低下率は α として最適化問題に組み込む。切除領域によってできる各静脈切除点 t の鬱血領域の体積を $V(p)[cc]$ とし、切除点を持つ静脈の集合を U とすると、定式は以下のようになる。

▶目的関数

$$\sum_{b \in S} TDR(b) \rightarrow \text{最大化}$$

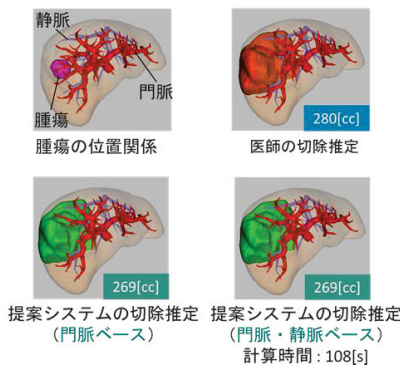
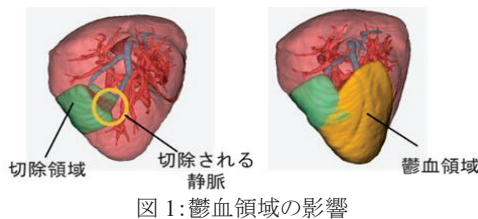
▶制約条件

$$\sum_{b \in S} V(b) + \sum_{p \in U} \alpha V(p) \leq V_{max}$$

4. 評価

提案システムは ImageJ[2][3] と呼ばれるオープンソースの画像解析ライブラリを利用して開発を行った。完成したシステムを8名の患者の症例で実験を行った。本文では、その1例を示す。

医師の切除領域推定と提案手法の切除領域推定の形状はほぼ一致していることがわかる。評価の中には医師の推定結果に比べて 37cc も小さい切除領域となる結果もあり、医学的理論に基づいたアルゴリズムを用いて計算を行うことで、医師の推定結果よりも良い結果を得ることもできた。また、今回示した例では門脈のみをベースとした場合と静脈もベースにした場合で同じ推定結果となったが、静脈の考慮によ



って大きく広がる鬱血領域に影響を受けた結果になることも多く見られた。また、鬱血領域が大きく広がる場合でも最適だということがわかったので、この結果が医師に検討の幅が広がるような新たな発見をもたらすことができると考えられる。

5. 太い静脈を保存する最適切除領域推定

鬱血領域が大きく広がる一因は太い静脈の切除にある。従来の医師の切除推定では静脈をなるべく切らず、保存する方向でプランニングが行われていた。そこで、こうした医師の手法に沿った静脈の保存を行った場合の切除領域推定結果を提案する機能を追加することで、医師の従来の思考に合った切除推定結果の提示を可能にし、より受け入れられやすい推定結果の提示やプランニングの幅の拡張を目指した。「太さ 5.0mm 以上の静脈に切除領域がかかる場合その静脈を保護するための平面を作り、切除領域を静脈側に侵入させないように遮る」ことで静脈を保存し、結果として切除領域全体の腫瘍を取り除けている割合をそれほど落とさずに鬱血領域を大きく削減することができた。

6. まとめ

静脈を考慮した肝臓外科手術における最適切除領域推定システムについて研究した。結果、患者への負担と腫瘍の再発リスクどちらも抑えた最適な切除領域の推定をするシステムの提案ができた。また、静脈の考慮により医師が考慮できていない肝機能低下領域を正確に把握できるようになり、「なるべく切らないようにする」とされてきた静脈の扱いが変わる可能性ができた。

文献

- 1) Mitsugi Shimoda, Masanori Hariyama, Yukio Oshiro, Shuji Suzuki : Development of new soft-ware enabling automatic identification of the optimal anatomical liver resectable region, incorporating preoperative liver function : Oncology Letters, Vol. 18, Issue 6, pp.6639-6647 (2019)
 - 2) Rasband WS. ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/>.(1997-2018)
-
- 図3: 太い静脈を保存するか否かでの比較

修士学位論文要約（令和6年3月）

Le Fort I 型骨切り術における骨片位置づけのための キャリブレーションフリー磁気式ナビゲーション

近藤 恵休

指導教員：張山 昌論

Calibration-free Electromagnetic Navigation System for maxillary positioning in the Le Fort I osteotomy

Ekyu KONDO

Supervisor: Masanori HARIYAMA

We propose the calibration-free navigation system for maxillary positioning surgery using electromagnetic tracking system to reduce potentiality of medical accident, surgery costs and operator's load. The system is evaluated by doctors using actual patient data. The evaluation result demonstrates that the proposed system guides the surgery smoothly with an average accuracy of within 1.0 mm.

1. はじめに

顎は食事や発音といった、生活する上で非常に重要な機能を所持している。現在は顎に関する先天的な疾患や交通事故などによる外傷によってできた機能障害に対する手術において、医師の経験に依存した定性的な手術が行われており、手術ミスが発生しうる。また既存の手術方式では、骨片の移動量が大きければ大きいほど誤差が出やすいという欠点があり、さらに専用の器具を患者毎に作製する必要があるため時間的、費用的負担も大きい。本研究では Le Fort I 型骨切り術と呼ばれる、顎骨切断を伴う骨片の位置合わせの手術を対象に、定量的かつ正確で、患者、医師共に低負担に利用可能なキャリブレーションフリーの手術ナビゲーションシステムを提案する。

2. ナビゲーションシステム

本システムでは、術中の骨片の位置、姿勢の測定に Fig.1 に示す磁気式の空間測定システムである NDI 社の Aurora 及び 6DoF のセンサーを用いる。本測定機器により、最大周波数 40Hz でリアルタイムにセンサーの三次元空間上の位置と姿勢を得ることができる。



Fig.1 Aurora と 6DoF センサー

本手術では顎骨を切断し、頭部と顎部の二部位に分離することとなる。そこで、センサーは Fig.2 のように、頭部と顎部にそれぞれ治具とマウスピースを取り付け、そこにセンサーを取り付ける。これらの治具とマウスピースは 3D プリンターを用いて作製した。

また、ナビゲーションを医師に提示するための専用のアプリケーションを開発した。このアプリは、医師が術前プランニングで決めた正しい上顎骨片の位置へ、リアルタイムで測定した上顎骨片をナビゲーションする。アプリケーションが動作している様子を Fig.3 に示す。



Fig.2 骨格にセンサーを取り付けた様子

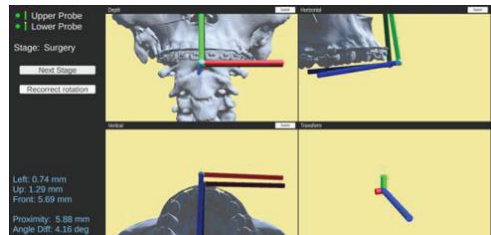


Fig.3 アプリケーションの画面

顎骨をナビゲーションするためには、手術での顎骨の移動量及び回転量が重要となる。この値は医師によるプランニングで決定されるが、医師が用いているアプリケーションではこれらを数値として出力することができない。そこで本研究では、点群マッチングアルゴリズムであるICPを用いて移動量及び回転量を算出する。このとき、ICPで求めた移動量、回転量には若干の誤差が生じることを考慮しなければならない。後述の模擬手術で使用したデータでは二乗平均平方根誤差が 5.7311×10^{-5} であり、無視しても問題ない誤差であると考えている。

本システムはキャリブレーションフリーであるため、想定されたセンサーの取り付け位置姿勢と実際の位置姿勢の違いによって誤差が生まれる。頭部のセンサーは顎部のセンサーを基準に補正されるが、顎部のセンサーは基準が存在しないため、想定と実際の取り付け位置の違いによってナビゲーションに誤差が生じる。

顎骨のセンサーの想定と実際の位置の誤差を x , 術前後での顎部の回転量を θ とすると、術後の顎骨の位置の誤差 $E(x, \theta)$ は式1で表される。

$$E(x, \theta) = 2x \sin(\theta/2) \tag{1}$$

実際の手術では $\theta \leq 5.0 \text{ deg}$ であると言われているため、現実的には最大でも $0.0872x$ の誤差しか生まれない。例えば $x=1.0\text{mm}$ であれば誤差は 0.0872mm , $x=10\text{mm}$ であっても誤差は 0.872mm となり、実用上無視しても問題ない誤差であると考えている。

3. 模擬手術

本システムの評価のため、実際の患者の骨格モデルを用いて模擬手術を行った。簡単のためプランニングは顎骨を前方に 3.0mm と 6.0mm 平行移動するだけのものとし、それぞれ4回と3回実験を行った。

術後の骨格モデルを3Dスキャンし、顎部の7つの基準点について期待された位置と実際の位置との差を測定し、その平均を取ったものをTable.1, Table.2に示す。行方向は各測定点における誤差、及びそれらの平均的な誤差を示す。単位はmmである。

全体的に誤差は 1.0mm を下回る結果が得られた。また、 3.0mm 移動の場合に比べて 6.0mm 移動の場合の方が誤差は大きく出る点は既存の手法と同様であったが、いずれにしても 1.0mm 以内の誤差であり、良好な結果であると考えている。

4. まとめ

本研究では顎骨の位置決め手術について、磁気式センサーを用いたキャリブレーションフリーなナビゲーションシステムを構築した。本システ

ムでは治具とマウスピースを患者毎に作製する必要があるが、いずれも3Dプリンターで簡単に作製可能であり、時間的・肉体的・費用的負担を軽減することができた。また模擬手術の結果、約 1.0mm 以内の誤差で手術が達成された。これは実用的な精度であると考えているが、今回は簡単なプランニングで模擬手術を行ったため、今後はより複雑な操作も含めた精度評価が必要である。

また、 1.0mm 単位の移動や回転操作を人の手で行うことは非常に難度の高い作業であるため、本システムに加えてロボットを使用することで、より高精度かつ低負担な手術支援が実現できると考えている。

Table.1 3.0mm 移動の結果

	Delta X	Delta Y	Delta Z	Proximity
Pos 1	0.19	0.05	-0.22	0.29
Pos 2	0.21	0.66	0.04	0.69
Pos 3	0.40	0.35	0.61	0.81
Pos 4	0.33	0.18	0.31	0.49
Pos 5	0.36	0.59	0.81	1.06
Pos 6	0.43	-0.02	0.49	0.65
Pos 7	0.48	-0.17	0.52	0.72
Avg	0.34	0.23	0.36	0.67

Table.2 6.0mm 移動の結果

	Delta X	Delta Y	Delta Z	Proximity
Pos 1	0.42	-0.63	-0.26	0.80
Pos 2	0.44	-0.72	0.21	0.86
Pos 3	0.37	-0.66	0.27	0.80
Pos 4	0.65	-0.63	0.02	0.90
Pos 5	0.40	-0.70	0.36	0.89
Pos 6	0.53	-0.84	0.23	1.02
Pos 7	0.58	-0.90	0.25	1.09
Avg	0.48	-0.72	0.15	0.91

修士学位論文要約（令和6年3月）

OCT 画像からの網膜層セグメンテーションに関する研究

近野 翼

指導教員：青木 孝文

Retinal Layer Segmentation from OCT Images

Tsubasa KONNO

Supervisor: Takafumi AOKI

The thickness of the retinal layers is an important criterion to diagnose ophthalmopathy. For this purpose, it is necessary to segment the retinal layers from OCT images that capture the layered structure of the retina. In this paper, we propose a retinal layer segmentation method from OCT images using 1D U-Net and 2D U-Net. The proposed method considers the retinal structures of each column using 1D U-Net and the entire structure of the retina using 2D U-Net. Through a set of experiments using public datasets, we demonstrate the effectiveness of the proposed method.

1. はじめに

網膜を構成する層（網膜層）の厚みは、眼疾患の診断における重要な指標である。網膜層の厚みの計測には、光干渉断層撮影（Optical Coherence Tomography: OCT）により撮像された網膜の断層画像（OCT 画像）が用いられる。眼科検査では、解析ツールの網膜層セグメンテーション用いて OCT 画像から網膜層を検出し、その厚みを計測しているが、解析ツールの精度が必ずしも高くない。高精度に網膜層セグメンテーションを行うために、網膜層間の境界線を検出する手法が提案されている¹⁾²⁾。これらの手法では、網膜が水平方向直線になるように OCT 画像を変形させる平坦化³⁾を行い、境界線検出を直線検出に近似している。網膜に構造的な異常が存在する眼疾患罹患者や網膜が大きく湾曲した近視の人の OCT 画像では、平坦化を適用しても境界線が直線にならないことがある。そのため、平坦化を行わず、網膜の形状に依存せずに境界線を検出する必要がある。本論文では、1D+2D U-Net⁴⁾を用いて、平坦化を必要とせずに網膜層間の境界線を検出する手法を提案する⁵⁾。OCT 画像の各列に着目すると、網膜層間の境界線は、解剖学的な順番に従ってそれぞれ 1 画素で存在する。網膜の構造が変化しても、この特徴は変わらない。そこで、提案手法では、1D U-Net により画像の各列の特徴を抽出し、2D U-Net により画像全体の特徴を抽出することで、様々な形状の網膜から境界線を検出する。公開データセットを用いた性能評価実験を通して、提案手法の有効性を示す。

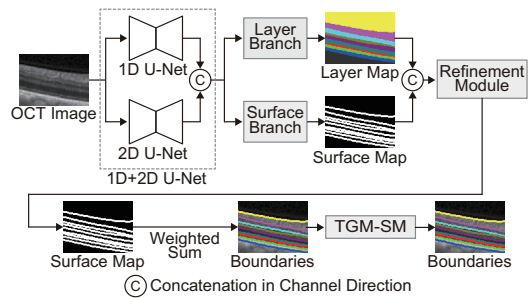


図1 提案手法の概要

2. 1D+2D U-Net を用いた網膜層セグメンテーション手法

図1に提案手法の概要を示す。まず、1D+2D U-Netを用いて、OCT 画像から特徴を抽出する。抽出された特徴量を Layer Branch と Surface Branch に入力し、網膜層のセグメンテーションマスク (Layer Map) と境界線の存在確率分布 (Surface Map) を推定する。次に、Layer Map と Surface Map を Refinement Module に入力し、Surface Map を洗練する。洗練された Surface Map の値と画像座標の重みづけ和を計算し、境界線を検出する。最後に、境界線が解剖学的な順番に従うように Topology Guarantee Module considering Surface Map (TGM-SM) を用いて、境界線の位置を修正する。

3. 公開データセットを用いた性能評価実験

本実験では、2つの公開データセットを用いて、提案手法と従来手法の、網膜層間の境界線の検出精度を比

表1 各手法の検出精度 (MAD [μm])

Dataset	MSHC		WLOA	
Flattening	✓		✓	
FCBR ¹⁾	2.78	3.87	2.35	2.03
SASR ²⁾	2.90	3.19	2.70	2.25
Proposed	2.82	2.89	2.27	1.85

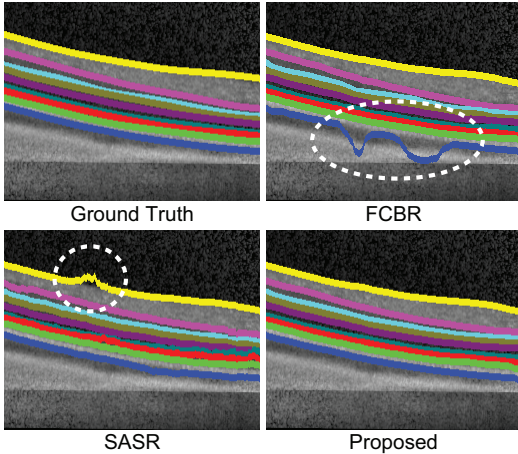


図2 平坦化を行っていない MSHC データセットの OCT 画像から各手法を用いて検出された境界線の例。白い破線の楕円で誤差が大きい領域を囲む。

較する。データセットとして、OCT MS and Healthy Control (MSHC) dataset⁶⁾ および World’s Largest Online Annotated (WLOA) SD-OCT dataset⁷⁾ を用いる。MSHC データセットでは、学習に 588 枚、検証に 147 枚、評価に 980 枚の OCT 画像を用いる。WLOA データセットでは、学習に 9,000 枚、検証に 3,000 枚、評価に 3,000 枚の OCT 画像を用いる。両方のデータセットで OCT 画像に対して平坦化を行う場合と行わない場合の検出精度を評価する。従来手法として、FCBR¹⁾ および SASR²⁾ を用いる。評価指標として、検出された境界線と真値の境界線との Mean Absolute Distance (MAD) を用いる。MAD は値が小さいほど境界線の検出精度が高いことを示す指標である。

表1に各手法の検出精度を示す。WLOA データセットでは、平坦化を行うと全ての手法で検出精度が大幅に低下する。このデータセットには、網膜に構造的な異常が存在する眼疾患罹患患者の OCT 画像が多く含まれているためであると考えられる。MSHC データセットでは、平坦化を行わないと従来手法の検

出精度が大幅に低下する。一方、提案手法の検出精度はほとんど低下しない。また、どちらのデータセットでも平坦化を行わない場合では、提案手法の検出精度が最も高い。提案手法は、平坦化を行わなくても境界線を高精度に検出できている。図2に平坦化を行っていない MSHC データセットの OCT 画像から各手法を用いて検出された境界線の例を示す。FCBR や SASR は、白い破線の楕円で囲まれた領域で誤った境界線を検出している。一方、提案手法は真値に近い境界線を検出している。

4. まとめ

本論文では、1D+2D U-Net を用いた網膜層セグメンテーション手法を提案した。公開データセットを用いた性能評価実験を通して、提案手法の有効性を実証した。今後の展望として、近視の人の大幅に湾曲した網膜に対するセグメンテーションへの応用が挙げられる。

文献

- 1) Y. He, A. Carass, B.M. Jedynek, S.D. Solomon, S. Saidha, P.A. Calabresi, and J.L. Prince, “Fully convolutional boundary regression for retina OCT segmentation,” Proc. Int’l Conf. Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention, pp.120–128, Oct. 2019.
- 2) H. Liu, D. Wei, D. Lu, Y. Li, K. Ma, L. Wang, and Y. Zheng, “Simultaneous alignment and surface regression using hybrid 2D-3D networks for 3D coherent layer segmentation of retina OCT images,” Proc. Int’l Conf. Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention, pp.108–118, Sept. 2021.
- 3) A. Lang, A. Carass, M. Hauser, E.S. Sotirchos, P.A. Calabresi, H.S. Ying, and J.L. Prince, “Retinal layer segmentation of macular OCT images using boundary classification,” Biomed. Opt. Express, vol.4, no.7, pp.1133–1152, July 2013.
- 4) O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox, “U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation,” Proc. Int’l Conf. Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention, pp.234–241, Oct. 2015.
- 5) 近野翼, 二宮高洋, 三浦幹太, 伊藤康一, 檜森紀子, P. Sharma, 中澤徹, 青木孝文, “1D+2D U-Net を用いた OCT 画像からの網膜層セグメンテーションの高精度化,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.123, no.96, pp.12–13, July 2023.
- 6) Y. He, A. Carass, S.D. Solomon, S. Saidha, P.A. Calabresi, and J.L. Prince, “Retinal layer parcellation of optical coherence tomography images: Data resource for multiple sclerosis and healthy controls,” Data Brief, vol.22, pp.601–604, Feb. 2018.
- 7) S. Farsiu, S.J. Chiu, R.V. O’Connell, F.A. Folgar, E. Yuan, J.A. Izatt, and C.A. Toth, “Quantitative classification of eyes with and without intermediate age-related macular degeneration using optical coherence tomography,” Ophthalmology, vol.121, no.1, pp.162–172, Jan. 2014.

修士学位論文要約（令和6年3月）

多数の子どもの同時計測可能な無線位置計測システムとその評価

齊藤 涼太

指導教員：張山 昌論

A system to measure locations of many children wirelessly and Its Evaluation Ryota SAITO

Supervisor: Masanori HARIYAMA

Recently, personalized childcare and education has attracted much attention in the educational to develop children’s ability to survive. To achieve this, it is important to assess each child’s character and analyze its behavior. Behavior analysis in the educational field has a problem that it is based on manual recording by childcare workers or teachers, and this causes difficulties on recording all children. This system achieves multiple and simultaneous recording and automatic measurement at low cost by using small wireless tags and information technology which is represented by filtering and message communication protocol.

1. はじめに

近年、教育現場では子どもたちの生き抜く力を養うために、個別最適な保育・教育に対する関心が高まっている。そのためには、子ども一人ひとりに対して個性を押し量り、寄り添う必要があるとされている。個性推定の手段として行動解析が挙げられるが、現状、保育士・教員による手動記録が主になっており、どうしても目が届かず観測されない子どもが発生するという問題を抱えている。本研究では、情報技術の活用により、低い負荷での多数同時記録や自動測定によりすべての子どもを記録することを可能にするものとして、小型タグを使った多数の子どもの無線位置計測システムを提案する。

2. システムの採用機器・構成

システムには図1に示したTWELITE CUE という小型の無線タグ、MONOSTICK という受信機を用いる。これらは、IEEE802.15.4¹⁾準拠の無線製品で、ノイズロバスト性や低消費電力性に強みをもっている。TWELITE CUE はケースを含めてもペットボトルキャップ程度の大きさで小型で、ボタン電池で動作するため、子どもの動きを制限せず、負担が軽いことが特徴である。MONOSTICK にはUSB 端子がついており、USB 端子でコンピュータにデータを転送できる。TWELITE CUE ・MONOSTICK ともに、簡単な設定を事前に済ませておけば、電池を入れるだけ、コンピュータにつなぐだけで簡単に使用できる。

本システムの概要図を図2に示す。子どもにはTWELITE CUE を付け、MONOSTICK はUSB 端子でマイクロコンピュータ(Raspberry Pi)等に接続して使用する(以後これを「基地局」と呼ぶ)。TWELITE CUE は基地局と無線で接続されていて、各基地局は TWELITE CUE から受信した電波の強度から位

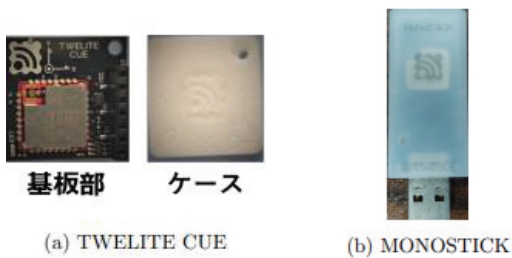


図1 TWELITE 使用機器一覧

表1 各機器の諸元

機器	縦/横/高さ [mm]	重さ [g]	実勢価格 [円/個]
TWELITE CUE 基板部	25/25/10(最厚部)	4	3000
TWELITE CUE ケース	30/30/15	6	
MONOSTICK	50/22/8(USB 端子部除く)	10	3000

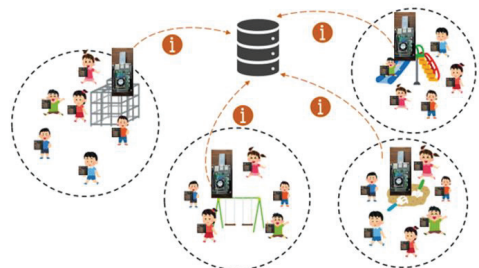


図2 システム概要図

位置情報を推定する。受信した位置情報はWi-Fiを用いて一か所に集められる。基地局は保育園やプレーパークにおける各遊具に設置することを想定している。

3. システム設計

多数同時位置計測には、輻輳を防止して多数のタグの情報を同時に取得すること、取得したデータに対し位置情報を推定することが重要となる。

輻輳防止のために、3つの観点で最適化を行った。1つ目はタグからの送信データ軽量化であり、アプリケーションの改変により、タグ・基地局間の通信データ長を削減した。2つ目は送信間隔のランダム化であり、タグのスリープ時間を一定の範囲内でランダムにすることにより、特定の2つのタグが欠損を繰り返す現象の軽減を図った。3つ目は周波数チャネルの多重化である。IEEE.802.15.4の仕様を活用し、周波数のわずかに違う互いに重複しない16チャネルを必要に応じて活用することにより、チャネル数分タグの同時使用可能数を増やすことができる。

計測したデータは、計測場所に構築されたWi-Fiによるローカルネットワークと小型デバイス間でのメッセージ交換用に設計されたMQTT²⁾プロトコルを使用し、リアルタイムで一か所に集約する。MQTTの通信成功率は理想環境では100%であり、測定された最大レイテンシも227msと非常に小さいため、簡便にリアルタイム情報通信を行うことができる。

先述の方法により取得したデータに対し、最近傍基地局推定を施し、位置情報とした。これは、電波の減衰により、電波強度が距離に対して単調減少となることを活かした推定方法である。一方、取得したデータには、タグと基地局の間の一時的な障害物、角度のずれなどの影響によりノイズが発生した。このノイズを軽減するために、カルマンフィルタによるノイズ除去を行った。理想環境での実験においてカルマンフィルタを適用した結果は図3に示す通りであり、基地局推定の精度が上がり、十分使用に耐えるシステムとなっていることが示されている。

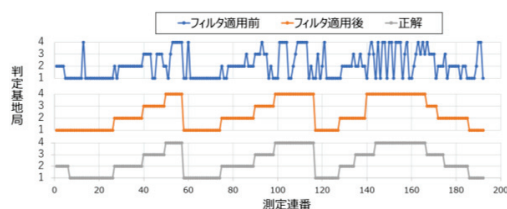


図3 カルマンフィルタの適用結果

4. 実環境におけるシステムテストと課題

屋外のプレーパーク(2022年10月8、9日・ハダシランド in ゆめ花マルシェ 2022)でシステムテストを行った。基地局は各遊具近傍に置き、タグは、別途用意したカードホルダーに入れ、プレーパークに遊びに来た子どもの首の後ろにクリップで付けた。子どもたちには自由に動いてもらい、その際の位置情報を取得した。各基地局を配置するセットアップの所要時間は1時間半程度で、子どもにタグをつける作業も短時間で済ませることができた。6時間のシステムテストで、タグの同時使用数は最大で32個、受信した位置情報の総数は191、465個となった。膨大な情報を送受信したものの、理想環境での評価と同様に送受信に成功した。

一方、今後の課題として、設置高さが十分ではなかった一部の基地局において、周囲の人間のボディシールドにより電波強度が下がり正確な位置情報が得られなかったこと、カードホルダーが服からぶら下がる形での取り付けとなったため、小型とはいえず子どもに違和感を抱かせてしまったことが挙げられた。そのため、今後は子どもへの違和感のなさや十分な精度を両立したタグおよび基地局設置の方法確立を目指す。

5. まとめ

子どもの行動解析を簡便かつ多数同時に行うために、小型無線タグモジュールTWELITEを使った無線位置計測システムを提案した。輻輳防止のための最適化や測定データのノイズ除去により理想環境において多数の正確な位置推定を可能とし、さらに、実際に屋外で行ったシステムテストでもシステムは正常に動作した。一方、判定やタグ取り付けに課題も残る結果となり、今後の改善が期待される。

また、本研究において取得した記録データから遊具滞在割合や移動の重なり、追従を解析することにより属性を与え、個別最適な教育につなげることができる。今後の展望としては、これらを実現するためのクラスタリング等の手法の適切な活用が求められる。

文献

- 1) IEEE SA "IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks", <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.4/7029/>
- 2) IBM "IBM MQ Telemetry Transport format and protocol", <https://www.ibm.com/docs/en/ibm-mq/9.3?topic=reference-mq-telemetry-transport-format-protocol>

修士学位論文要約（令和6年3月）

LPWA を用いたネットワーク機器管理における コマンドの出現分布に着目した高効率トラフィック圧縮手法

田邊 広大

指導教員：長谷川 剛

An Efficient Traffic Compression Method for Remote Network Management over LPWA based on Command Appearance Distribution

Kodai Tanabe

Supervisor: Go Hasegawa

In our research, we focus on enhancing the effective data rate for network equipment management over Low Power Wide Area (LPWA) networks, which are typically characterized by their low power consumption and extensive communication range, offering reduced operational expenses. However, the inherent low data rate of LPWA networks poses a challenge to efficient remote management of network equipment. To address this, we propose a novel approach that significantly improves the effective data rate of LPWA by applying highly efficient compression using command history. We introduced a command tree to track command frequencies and their encoded representations, utilizing Huffman coding to exploit command usage biases for improved compression. Our findings reveal a compression ratio of approximately 3.5%, significantly outperforming traditional methods, while it has enough small memory usage and computation overhead. Additionally, we designed and implemented a system using the proposed method, conducting experiments to validate its effectiveness.

1. Introduction

Network equipment management, crucial for modern communication systems, can be remotely conducted via in-band or out-of-band methods. In-band management is cost-effective but lacks the fault tolerance of out-of-band management, which remains operational even if the main network fails. However, out-of-band management often incurs high costs due to wired network setups or the need for extensive Wi-Fi coverage. To overcome these limitations, our research focuses on utilizing LPWA networks for out-of-band management. LPWA networks offer long communication distances and low operational costs but suffer from low data rates that degrade management quality. We propose an efficient compression method for operational commands to enhance LPWA's data rate, using a "command tree" to optimize command sequence representation. This approach aims to make LPWA networks a viable option for remote network equipment management by addressing their data rate challenges.

2. Compression Method for Commands of Remote Network Management

To manage operational commands in network management, we introduce a command tree, depicted in Fig. 1, where each node represents a word from the commands and holds two

additional information; the frequency of the appearance of the word and assigned code used for coding. This tree reflects the sequence and position of words in commands, with paths from the root to a leaf node indicating complete commands. We introduce two methods for constructing this tree: CPC (Compression with a Pre-Constructed command tree) and CAC (Compression with an Adaptively-Constructed command tree), differing in their update mechanisms. CPC involves a pre-configured tree including all possible commands, while CAC starts with an empty tree, adding nodes as new commands are input by the administrator.

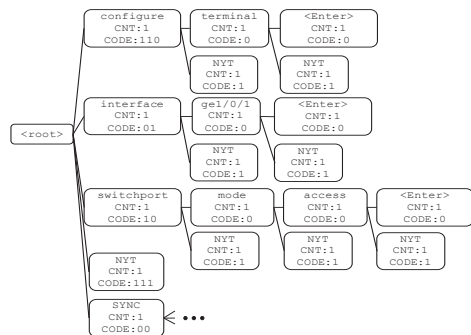


Fig. 1: Example of Command Tree

For encoding and decoding, an initial empty command tree is

prepared, with nodes added or updated based on the appearance frequency of each word in operational commands. The encoding process involves traversing the command tree to obtain codes for each word, which are then concatenated and transmitted. If a word is not in the tree in CAC, it's added along with its ASCII-encoded sequence. Decoding involves matching the received codes to tree nodes to reconstruct the original command.

3. Evaluation Results and Discussion

We conducted an evaluation using a prototype that implements the proposed method. Note that the command histories used in the evaluation were difficult to obtain, and therefore the commands were mechanically collected from the Cisco Catalyst 2960-S[1] and prepared from this by random generation according to the Zipf distribution[2].

We encoded 1,000,000 commands with two methods: CPC, which uses a pre-constructed command tree, and CAC, which dynamically builds the tree based on command history. Both methods update node frequencies with each command to optimize compression. Fig. 2 plots the mean of the compression ratio of the last 10,000 commands as a function of the source size of input commands. As the diversity of input commands increases, the compression ratio decreases due to the expansion of the command tree and the lengthening of Huffman codes. Despite CAC's slightly lower compression ratio compared to CPC—attributed to the overhead from NYT nodes—it was noted that CPC is more efficient in memory and computation. At a source size of 2^{10} , the compression ratio is about 3.5 %, effectively increasing the data rate for remote network management by approximately 29 times.

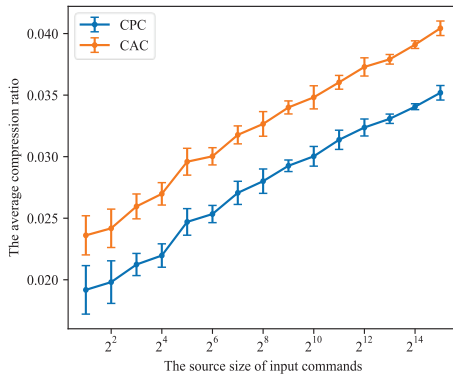


Fig. 2: Evaluation Results of Compression Ratio

Execution time and memory usage were measured during the experiment, and the average execution time for Encode and Update for each method is plotted in Fig. 3, and the memory usage consumed by the command tree is plotted in Fig. 4. From these results, the execution time is at most 0.5 ms under all conditions, which is fast enough. The CAC method was

found to be superior in terms of memory usage.

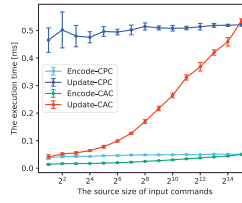


Fig. 3: Execution Time

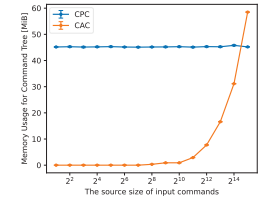
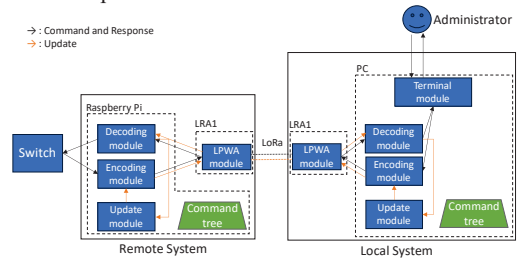


Fig. 4: Memory Usage

4. Implementation

We designed and implemented an architecture for remote management of network devices using the proposed method, as shown in Fig. 5. The managed object in the implementation is Cisco Catalyst 2960-S. The program is implemented locally on a PC and remotely on a Raspberry Pi 4 Model B. The LPWA communication is with Private Lora. The experiments using this implementation evaluated updates' impact on network load, response compression ratios, and response times. Results indicated that it is very effective not only in compressing commands, but also in compressing responses. On the other hand, the communication time of LPWA accounts for a certain portion of the overall system execution time and reducing the number of communications is necessary for more effective operation.



5. Conclusion

In this study, we proposed a method to effectively compress commands in remote management of network equipment using the command tree, which efficiently represent command histories, and evaluated the effectiveness of this method.

Future work will explore enhancing LPWA's data rate and extending the proposed compression method's application to other data structures like text, log, and JSON files.

References

- 1) Cisco Systems, Inc., Cisco Catalyst 2960-S Series Switches Data Sheet, 2023.
- 2) G. K. Zipf, Human Behavior and the Principle of Least Effort: An Introduction to Human Ecology. Addison-Wesley Press, 1949.

修士学位論文要約（令和6年3月）

顔領域のマルチバイオメトリクスに関する研究

外崎 汰斗

指導教員：青木 孝文

Multibiometrics for Facial Area

Taito TONOSAKI

Supervisor: Takafumi AOKI

Multibiometrics, which uses multiple biometric traits for person authentication, may require sensors to acquire each biometric trait as the number of biometric traits to be combined increases. In this paper, we propose a multibiometric method that combines biometric traits in the facial area. The proposed method uses the face, periocular, iris, nose, and eyebrow extracted from a face image and thus requires only a camera. High authentication accuracy can be achieved by fusing the matching scores calculated from each trait. Experiments using a public face image dataset demonstrate the effectiveness of the proposed method in multibiometrics.

1. はじめに

身体的・行動的特徴を用いて個人を識別する生体認証¹⁾²⁾は、忘却や紛失の恐れがない利便性の高さから、入退出管理や電子決済などの様々な場面で利用されている。一方で、単一の生体特徴だけでは、明るさの変化、ユーザの姿勢変化などの環境変化によって認証精度が低下し、認証が困難になることがある。認証精度を改善するために、複数の生体特徴を用いて個人認証を行うマルチバイオメトリクスがある³⁾。認証に用いる生体特徴の数を増やすと認証精度が向上するが、それぞれの生体特徴を取得するためのセンサが必要になる可能性がある。認証に用いるセンサが増えると、システムのコストや認証時のユーザの負担が増加する。本論文では、カメラで撮影された顔画像から得られる顔、眼周囲、虹彩、鼻、眉毛を用いたマルチバイオメトリクスを提案する⁴⁾。提案手法では、畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network: CNN) を用いて特徴抽出し、それぞれの照合スコアを求め、それらを融合することで最終的な照合スコアを得る。公開顔画像データセットを用いた性能評価実験を通して、提案手法の有効性を示す。

2. 顔領域のマルチバイオメトリクス

提案手法のネットワークの概要を図1に示す。顔のキーポイントを検出し、それらに基づいて顔画像から各生体特徴を切り出し、個別のCNNを用いて各生体特徴から特徴抽出を行う。それぞれの生体特徴において得られた照合スコアの重み付け和をとることで、最終的な照合スコアを算出する。以下では、

提案手法の生体特徴の取得方法、CNNを用いた特徴抽出、スコア融合について詳細に述べる。

(i) 生体特徴の取得

提案手法では、1枚の顔画像から各生体特徴を切り出すことで各認証に用いる入力画像を取得する。まず、MediapipeのFaceMesh¹⁾を用いて顔画像のキーポイントを検出する。検出されたキーポイントから、両目のキーポイントを結ぶ線分が水平になるように画像を回転させ、顔を中心にクロップすることで顔認証に用いる顔画像を取得する。検出されたキーポイントのうち、左目の中心を基準としてその周辺をクロップすることで眼周囲画像を取得する。また、鼻の頂点のキーポイントと眉毛の中心のキーポイントを基準としてその周辺をクロップすることで鼻画像および眉毛画像を取得する。虹彩画像は、Kawakamiらの手法⁵⁾を用いて眼周囲画像から虹彩領域を抽出することによって得られる。以上の処理によって、顔画像、眼周囲画像、4分割された矩形正規化虹彩画像、鼻画像、眉毛画像を取得する。

(ii) CNNを用いた特徴抽出

提案手法では、生体特徴ごとに個別に学習されたCNNを用いて特徴抽出を行う。顔特徴量の抽出には、ArcFace⁶⁾を損失関数とするResNet-18⁷⁾を用いる。眼周囲、虹彩、鼻、眉毛の特徴量の抽出には、Cross Entropy Lossを損失関数とするSE-ResNet-18⁸⁾を用いる。

(iii) スコア融合

¹⁾<https://google.github.io/mediapipe>

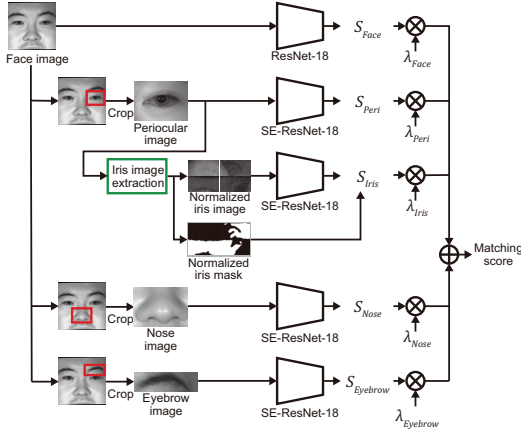


図1 提案手法の概要

表1 認証精度の比較

Traits	EER [%]	FRR [%]	
		@FAR0.1%	@FAR0.01%
Face	5.636	20.479	33.033
Periocular	4.836	19.839	33.721
Iris	9.095	36.047	49.241
Nose	2.719	12.838	24.608
Eyebrow	2.642	16.137	27.171
Proposed	0.337	1.495	3.251

提案手法では、特徴量間のコサイン類似度を用いて各生体特徴の照合スコアを算出する。虹彩認証においては、小領域ごとの照合スコアを求め、各小領域の虹彩領域の割合に基づいてそれらの加重平均をとることで照合スコアを算出する。最終的な照合スコアは、生体特徴ごとの照合スコアの重み付け和を用いて以下のように求められる。

$$S = \lambda_{Face} S_{Face} + \lambda_{Peri} S_{Peri} + \lambda_{Iris} S_{Iris} + \lambda_{Nose} S_{Nose} + \lambda_{Eyebrow} S_{Eyebrow} \quad (1)$$

ここで、 S_* は各生体特徴の照合スコアを表し、 λ_* は各生体特徴に対する重みを表す。重みは以下の式を満たす。

$$\lambda_{Face} + \lambda_{Peri} + \lambda_{Iris} + \lambda_{Nose} + \lambda_{Eyebrow} = 1 \quad (2)$$

3. 公開データセットを用いた性能評価実験

本論文では、公開顔画像データセットである CASIA-Iris-Distance を用いて単一または複数の生体特徴を用いて認証を行い、認証精度を比較する。評価指標には、本人拒否率 (FRR) と他人受入率 (FAR) が等しくなる時のエラー率である、等価エ

ラー率 (Equal Error Rate: EER) と FAR が 0.1%, 0.01% となるときの FRR である, $FRR@FAR0.1\%$, $FRR@FAR0.01\%$ を用いる。

実験により得られた結果を表 1 に示す。組み合わせる生体特徴が増えると認証精度が向上し、顔、眼周囲、虹彩、鼻、眉毛を用いた提案手法が最も認証精度が高くなった。一方で、グリッドサーチによって得られた最適な重みでは、顔に対する重みが 0.0 となり、顔認証を用いないことで認証精度が高くなった。これは、眼周囲、虹彩、鼻、眉毛を組み合わせることで十分に顔の個人性を表現できるためであると考えられる。提案手法は、単一の生体特徴を用いた生体認証に比べて、1 枚の顔画像のみを用いて高精度に認証を行うことができる。

4. まとめ

本論文では、1 枚の顔画像を用いて高精度に認証を行う顔領域のマルチバイオメトリクスを提案し、公開データセットを用いた性能評価実験を通して、提案手法の有効性を実証した。今後の展望として、撮影環境に応じて認証に用いる生体特徴を選択する、より実用的なマルチバイオメトリクスへの応用が考えられる。

文献

- 1) A.K. Jain, P. Flynn, and A.A. Ross, Handbook of Biometrics, Springer, 2008.
- 2) A.K. Jain and S. Prabhakar, "An introduction to biometric recognition," IEEE Trans. Circ. and Sys. Video Tech, vol.14, pp.4–20, Jan. 2004.
- 3) A.A. Ross, K. Nandakumar, and A.K. Jain, Handbook of Multibiometrics, Springer, 2006.
- 4) T. Tonosaki, S. Kawakami, H. Kawai, K. Ito, T. Aoki, M. Yasumura, M. Fujio, Y. Kaga, and K. Takahashi, "Eye biometrics combined with periocular and iris recognition using CNN," Proc. Asia Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conf., pp.1804–1810, Nov. 2023.
- 5) S. Kawakami, H. Kawai, K. Ito, T. Aoki, Y. Yasumura, M. Fujio, Y. Kaga, and K. Takahashi, "A simple and accurate CNN for iris recognition," Proc. Asia Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conf., pp.1563–1568, Nov. 2022.
- 6) J. Deng, J. Guo, N. Xue, and S. Zafeiriou, "ArcFace: Additive angular margin loss for deep face recognition," Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.4685–4694, June 2019.
- 7) K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, "Deep residual learning for image recognition," Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.770–778, June 2016.
- 8) J. Hu, L. Shen, and G. Sun, "Squeeze-and-excitation networks," Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.7132–7141, June 2018.

修士学位論文要約（令和6年3月）

手術ナビゲーションのための超音波画像からの3次元再構成

西田 統尊

指導教員：張山 昌論

3D Reconstruction from Ultrasound Images for Surgery Navigation

Michiataka NISHIDA

Supervisor: Masanori HARIYAMA

For safe and smooth liver surgery, navigation systems are necessary to guide resection according to the result of pre-surgery planning. Realtime 3D reconstruction using ultrasound images plays an essential role in the navigation systems since ultrasound is a main modality in surgery. This paper presents a 3D reconstruction system using ultrasound images together with an electromagnetic tracking system. Using the proposed system, the reflector inside the phantom was reconstructed as a three-dimensional image, and the position of the reflector was reproduced with an error of less than about 1 mm.

1. はじめに

肝臓外科手術では、手術前に CT 画像から再構成される 3 次元画像をもとに切除領域をプランニングすることが一般的である¹⁾。一方、手術中では、超音波画像を利用して切除領域を確認することとなり、CT の 3 次元画像と比較しつつ確認する作業は高い技量が必要であるため、手術時間の増大や、必ずしもプランニング通りに切除することができないなどの問題がある。

本研究では、超音波画像から再構成される 3 次元画像と CT の 3 次元画像の対応付けを自動化し、切除領域のガイドを行うナビゲーションシステムを開発する。そのため、磁気式の 3 次元位置計測装置を利用して超音波画像から 3 次元再構成を行うシステムを構築し、評価用ファントムを利用してシステムの評価を行った。

2. システムの構成

図 1 に、システムの構成を示す。本システムでは、測定対象物に専用のセンサーを取り付けることによって、6 自由度の情報をリアルタイムに取得できる 3 次元位置計測装置を利用する。位置計測センサーをプローブに取り付けることで、スライス画像の撮影位置と姿勢を同時に取得することが可能となる。スライス画像と位置・姿勢情報の同時取得に関する制御と、情報取得後の 3 次元画像の再構成処理はコンピューター上で行う。

図 2 に、本研究で使用している超音波機器（GEヘルスケア、Vscan Air）と治具を示す。位置計測センサーは、超音波プローブを動かしても取り付け位置からずれないように固定する必要がある。そのため、位置計測センサーを固定でき、かつ

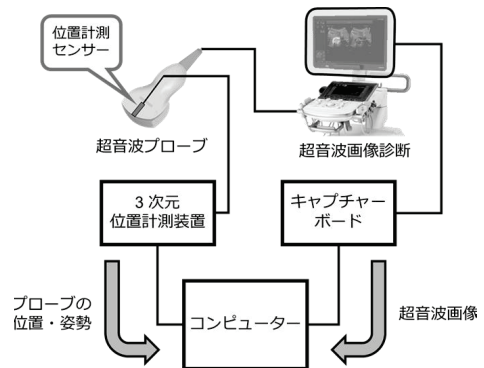


図 1 システム構成



図 2 超音波機器と治具

ローブにフィットして取り付けられるような治具を設計し、3D プリンターによってその治具を作製した。

3. システムの評価

図3に、超音波診断装置評価用ファントム(京都科学, N-365)を示す。撮影対象を図3で示したファントムとし、本システムを利用して再構成した3次元画像の評価を行った。ファントムには、内部に複数の円柱状の反射体が、定められた間隔で格子状に並んで埋め込まれている。そのため、ファントム内部を超音波画像で撮影して再構成した3次元画像が、ファントム内部の反射体をどの程度まで正確に再現できているか評価する。また、フリーハンドによる走査ではプローブの位置・姿勢が複雑化し、それにともない3次元再構成時の処理も複雑化する。そのため、本評価では図3で示したファントムの縁に図2で示した治具のガイドをはめ込み、姿勢が固定される状態でプローブを動かすこととし、シンプルな直線走査を想定した撮影・計測を行った。

図4に、本システムによってファントム内部の反射体を3次元再構成した結果を示している。また、表1に、システムによって再構成された三次元画像上における反射体同士の間隔と太さの誤差を示す。表1で示されている誤差は、反射体同士の間隔や太さが本来の値と比較してどの程度異なるかを平均値で示している。なお、値の単位はすべて mm である。また、実現場で使用される手術用プローブを使用した場合における結果も示している。

表1より、縦方向と横方向のどちらにおいても反射体同士の間隔のずれは 1 mm 以内であり、反射体の位置は正確に再現されていた。反射体の太さにおいては、本来の太さが 1 mm に対して大きい誤差が生じた。原因の1つとして、超音波画像の太さ方向における精度が低いことが挙げられる。しかし、手術用プローブ使用時においては、プローブのヘッドに近い領域において最小 0.4 mm の誤差で反射体の太さを再現できた。

4. まとめ

本研究では、超音波画像から3次元再構成を行うシステムを構築し、評価用ファントムを計測対象とした評価を行った。その結果、システムに

よって再構成された3次元画像は、ファントム内部の反射体の位置を約 1 mm 以内の誤差で再現したが、超音波機器の特性により、画像上の一部領域において反射体の太さの再現度が低いことが明らかとなった。今後は、3次元再構成処理の更なる精度向上と、CTで生成された3次元画像との対応付けに応用できるようシステムの改良とその評価に取り組む。

文献

- 1) M. Shimoda, M. Hariyama, Y. Oshiro, S. Suzuki, "Development of new software enabling automatic identification of the optimal anatomical liver resectable region, incorporating preoperative liver function", *Oncology Letters*, Vol. 18, Issue 6, pp.6639-6647(2019)

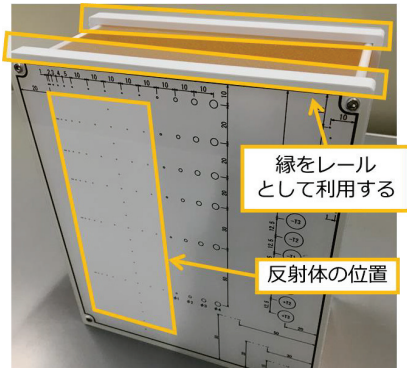


図4 評価用ファントム (N-365)



図3 三次元再構成の結果

表1 三次元画像上における反射体同士の間隔と太さの誤差

使用機器	縦方向における 間隔の誤差	横方向における 間隔の誤差	反射体の 太さの誤差
Aplio 300/ 手術用プローブ	0.68	0.95	1.80
Vscan Air	0.94	0.65	3.50

修士学位論文要約（令和 6 年 3 月）

特徴量埋め込みに基づく顔画像非識別化に関する研究

埴 剛生

指導教員：青木 孝文

Face Image De-identification Based on Feature Embedding

Goki HANAWA

Supervisor: Takafumi AOKI

Face image de-identification which makes face recognition difficult, is necessary for disclosing face images safely on the Internet. In this paper, we propose a face image de-identification method based on facial feature embedding. The proposed method generates a face image that can be recognized as that of another person while preserving the appearance of the face image by embedding facial features of another person into a face image. Through a set of experiments using public face image datasets, we demonstrate the effectiveness of the proposed method compared with conventional methods.

1. はじめに

ソーシャル・ネットワーキング・サービス (Social Networking Service: SNS) の利用拡大に伴って、顔画像や顔が写る画像が大量にインターネット上に公開されている。悪意のある第三者が顔認証を用いることで、インターネット上の顔画像から特定の人物の顔画像を容易に収集できてしまう。収集された顔画像が顔認証システムに対するなりすまし攻撃などに利用されることで、SNS の利用者のプライバシーが侵害される可能性がある。安全に顔画像を公開するために、顔画像の見た目を変えずに顔認証を困難にする非識別化 (De-identification) が検討されている。これまでに敵対的サンプルに基づく手法^{1) 2)} が提案されているが、生成される非識別化画像の見た目が不自然である問題や、未知の顔認証モデルに対して非識別化性能が低下する問題がある。本論文では、エンコーダ・デコーダモデルを用いた顔特徴量の埋め込みに基づく顔画像の非識別化手法を提案する³⁾。他人の顔画像から抽出された顔特徴量を顔画像に埋め込むことで、顔画像の見た目を保持しつつ、顔認証モデルによって他人と認証されるような非識別化画像を生成する。公開データセットを用いた性能評価実験を通して提案手法の有効性を示す。

2. 特徴量の埋め込みに基づく顔画像の非識別化

提案手法で用いるネットワークと損失関数の概要を図 1 に示す。非識別化したい顔画像をカバー画像 C 、カバー画像とは異なる人物の顔画像を埋込画像 E とする。提案手法は、顔画像から顔特徴量を抽出する

Extracting Network (EN) と顔画像に顔特徴量を埋め込む Hiding Network (HN) で構成される。EN は、学習済みの顔認証モデルであり、埋込画像 E から顔特徴量 $f_{en}(E)$ を抽出する。HN は、エンコーダとデコーダで構成されるネットワークであり、EN により抽出された顔特徴量 $f_{en}(E)$ をカバー画像 C に埋め込むことで、非識別化画像 D を生成する。提案手法では、カバー画像の見た目が保持された非識別化画像を生成するために、カバー画像と非識別化画像の画素値を類似させる損失関数 \mathcal{L}_{rec} およびカバー画像と非識別化画像から学習済みの VGG⁴⁾ を用いてそれぞれ抽出される画像特徴量を類似させる損失関数 $\mathcal{L}_{perc}, \mathcal{L}_{lips}$ を HN の学習に用いる。また、カバー画像の人物に認証されない非識別化画像を生成するために、非識別化画像から抽出される顔特徴量 $f_{en}(D)$ を、埋込画像から抽出される顔特徴量 $f_{en}(E)$ に類似させる損失関数 \mathcal{L}_{near} およびカバー画像から抽出される顔特徴量 $f_{en}(C)$ に相違させる損失関数 \mathcal{L}_{far} を HN の学習に用いる。

3. 公開データセットを用いた性能評価実験

本実験では、公開データセットである Labeled Faces in the Wild (LFW)⁵⁾ を評価に用いる。LFW データセットから本人同士の顔画像で構成される 3,000 ペアを抽出し、各ペアの片方の顔画像のみ非識別化を行う。EN とは異なる学習済みの顔認証モデルを用いて顔認証を行い、他人ペアと認証されたペアの割合を示す Attack Success Rate (ASR) に基づいて非識別化性能を評価する。また、Learned Perceptual Image

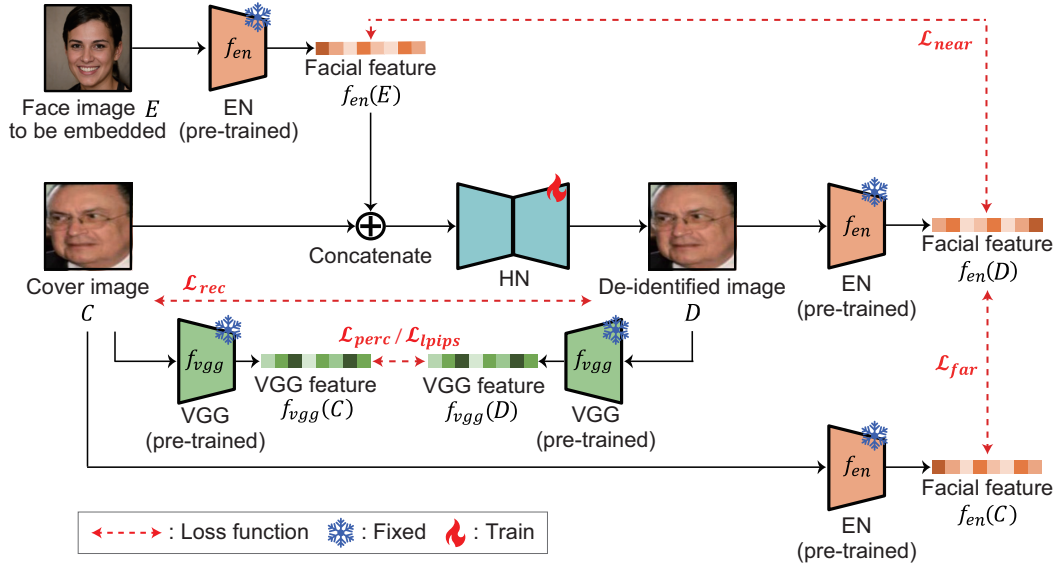


図 1 提案手法で用いるネットワークと損失関数の概要

Method	LPIPS ↓	ASR [%] ↑	De-identified image
TIP-IM	0.1560	56.66	
Fawkes	0.1000	54.80	
Proposed	0.0488	87.43	

図 2 各手法の評価結果

Patch Similarity (LPIPS)⁶⁾ に基づいて非識別化画像の画質を評価する。敵対的サンプルに基づく従来手法である TIP-IM¹⁾ および Fawkes²⁾ と提案手法との間で、画質と非識別化性能を比較する。各手法の評価結果を図 2 に示す。提案手法は、従来手法と比較して、画質と非識別化性能の両方で優れていることが確認できる。また、提案手法により生成された非識別化画像は、自然であり、カバー画像の見た目を十

分に保持していることが確認できる。

4. まとめ

本論文では、他人の顔特徴量の埋め込みに基づく顔画像の非識別化手法を提案した。公開データセットを用いた性能評価実験を通して、提案手法の有効性を実証した。今後の展望として、動画像の人物や顔の非識別化への応用が挙げられる。

文献

- 1) X. Yang, Y. Dong, T. Pang, H. Su, J. Zhu, Y. Chen, and H. Xue, "Towards face encryption by generating adversarial identity masks," Proc. Int'l Conf. Computer Vision, pp.3897–3907, March 2021.
- 2) S. Shan, E. Wenger, J. Zhang, H. Li, H. Zheng, and B.Y. Zhao, "Fawkes: Protecting privacy against unauthorized deep learning models," Proc. USENIX Security Symposium, pp.1589–1604, Aug. 2020.
- 3) G. Hanawa, K. Ito, and T. Aoki, "Face image de-identification based on feature embedding for privacy protection," Proc. Int'l Conf. Biometrics Special Interest Group, pp.113–122, Sept. 2023.
- 4) K. Simonyan and A. Zisserman, "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition," CoRR, vol.abs/1409.1556, pp.1–14, May 2015.
- 5) G.B. Huang, M. Ramesh, T. Berg, and E. Learned-Miller, "Labeled faces in the wild: A database for studying face recognition in unconstrained environments," Technical Report 07–49, University of Massachusetts, Amherst, Oct. 2007.
- 6) R. Zhang, P. Isola, A.A. Efros, E. Shechtman, and O. Wang, "The unreasonable effectiveness of deep features as a perceptual metric," Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.586–595, June 2018.

修士学位論文要約（令和 6 年 3 月）

ダイレクトマッピングに基づく FPGA 神経回路シミュレータの 最適設計に関する研究

原澤 瑞樹

指導教員：張山 昌論，学位論文指導教員：ハシタ ムトゥマラ ウィッデヤスーリヤ

Architecture of an FPGA-Based Brain Neural Network Simulator Using Direct Mapping

Mizuki HARASAWA

Supervisor: Masanori HARIYAMA,

Research Advisor: Hasitha Muthumala WAIDYASOORIYA

Neural circuit simulation is important to understand how the brain works, and it has potential applications in engineering, medicine, biology, etc. Since simulating large neural networks is a time consuming process, this research proposes an FPGA-based accelerator architecture. The proposed architecture is based on direct mapping of neurons into FPGA logic circuits. In order to increase the neural circuit size while maintaining a high degree of parallelism, a unified scheduling and binding scheme is proposed. Experimental results shows that the proposed method reduces the FPGA resource utilization up to 47.5% compared to conventional FPGA accelerators.

1. 緒言

神経回路シミュレーションとは、多数のニューロンによって形成される複雑ネットワークの挙動を計算することによって脳の処理や疾患の機構を理解するアプローチのひとつである。神経回路シミュレーションのためのハードウェアは複数提案されているが、本件研究では FPGA を使用する。FPGA をアクセラレータとして使用する利点は、神経回路の構造に合わせて再合成可能であるという柔軟性と、それに伴う実行時間の短縮・消費電力の低減といった高いエネルギー効率が挙げられる。本研究では FPGA を用いた神経回路シミュレーションのためにダイレクトマッピング方式を用いたアーキテクチャを提案するとともに、その大規模化に伴って必要となるスケジューリング・バインディングアルゴリズムを提案する。

2. ダイレクトマッピングによる神経回路シミュレーション

本研究では、FPGA 上で神経回路シミュレーションを行うための構成として、ダイレクトマッピング方式を採用した。アーキテクチャのイメージ図を図 1 に示す。グラフの各ノードを演算部、各エッジを伝送路として FPGA 上にネットワークの構造をそのまま再現する。

このアーキテクチャを用いて、隣のインデックス番号のニューロンにのみスパイク情報を送信するようなリング状のグラフについて神経回路シミュレーション実行した。結果としては実装ニューロン数 125 個程度で logic utilization の値が高くなり、コンパイルが不可能となってしまった。

そこで、1 つの FPGA ボード上に実装できるニューロンの数を増やすための構成として、1 つの kernel の中で複数のニューロンの計算を行うことを考える。1 つの kernel には膜電位計算のための演算器が 1 つ用意されており、毎ステップニューロンを入れ替えて膜電位を計算し、閾値判定を行っていく。

しかし、1 ニューロン 1 kernel 対応の構成と異なり、この構成ではコントロールステップごとに計算を行う対象となるニューロンが変化する。同じ kernel 内の演算でも他ニューロンからの入力数が異なるため、現在のステップを参照して計算すべきニューロンに合わせた入力 channel を選択する制御機構が必要となる。この部分の大きさは接続されている他演算器の数に比例して大きくなることが確認できた。そこで、channel

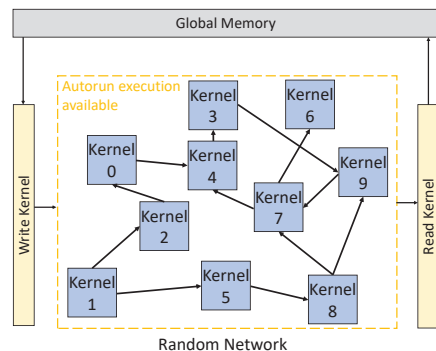


図 1 ダイレクトマッピング方式アーキテクチャ

周りのリソースの使用量を削減するため、演算器間 channel の複雑さを考慮しながら実行演算器および実行順序を決定するアルゴリズムが必要となる。

3. 演算器間相互結合網を単純化する回路設計

ある演算についてのデータフローグラフ(DFG)が与えられ、実行順序と演算器割り当てを決定したい場合、一般的にはすべてのノードをスケジューリングしたのちに各ノードのバインディング処理を行っていく。しかし、本研究における実行演算器割り当てには演算器間 channel の複雑さを考慮する必要があるため、バインディングの際にもデータの依存関係を考慮する必要がある。

本研究で提案するスケジューリング・バインディング決定アルゴリズムでは、スケジューリングによって実行ステップが決定したノードの演算器割り当てを直後に決定することによってデータの依存関係を考慮したバインディングを容易に行うことができる。図2に提案のスケジューリング・バインディングアルゴリズムのフローチャートを示す。

提案のアルゴリズムは、リストスケジューリングのなかに依存関係を考慮したバインディングを含めるような構成となっている。まず優先度に従って決定されたノードの実行ステップをリストスケジューリングアルゴリズムによって決定する。実行ステップが決定したノードのバインディング処理では、①親のないノード、②親ノードがあるかつ同じ演算器に配置できるノード、③親ノードがあるかつ同じ演算器に配置できないノード、の3パターンに分類され、演算器割り当てが決定される。提案のアルゴリズムにおいて、スケジューリングの結果を優先して決定し、その結果をバインディングに応じて変更することはない。すなわち提案のアルゴリズムによって得られるスケジューリングおよびバインディング情報は、実行時間最小を保証しつつヒューリスティックに演算器間配線を削除した解となる。

4. 評価・考察

本研究では、ベンチマークとして直列クラスター型モデルとランダムネットワークモデルの2つを用意し

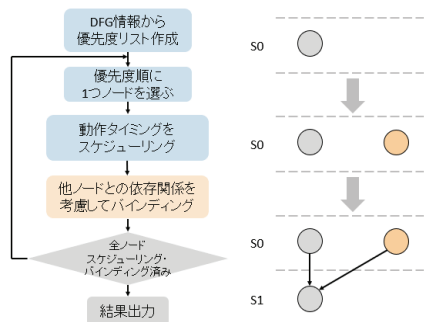


図2 提案のアルゴリズムフローと処理イメージ

表1 直列クラスター型の評価結果

	従来	提案	評価
ノード数	channel 数	channel 数	channel 数減少率[%]
100	67	0	100
500	363	13	96.4
1000	653	20	96.9
2000	1490	29	98.1

表2 ランダムネットワークモデルの評価結果

	従来	提案	評価
ノード数	channel 数	channel 数	channel 数減少率[%]
100	33	5	84.9
500	314	174	44.6
1000	591	456	22.8
2000	1771	1285	27.4

た。それぞれのモデルについて、依存関係を考慮しない手法と提案手法の channel 数を調べ、どの程度演算器間配線を削減できたか評価を行った。表1、表2にそれぞれのモデルにおける評価結果を示す。直列クラスター型モデルについてはノード数が大きくなってもほとんどの channel を削減可能である。ランダムネットワークモデルについてはノード数の増加に伴って減少の割合は低下するものの、削減される channel 本数は増加していくため、実際に使用される ALUT 使用量は減少していく。

5. 結言

FPGA を用いた神経回路シミュレータのためにダイレクトマッピングを用いたアーキテクチャを提案した。また、その大規模化を行う上で必要となる、依存関係を考慮したニューロンのスケジューリング・バインディング決定アルゴリズムを提案し、ベンチマークモデルに対して評価を行った。今後の展望としては、提案のアーキテクチャを複数のFPGAを用いた大規模神経回路ネットワークへ拡張していくことが挙げられる。

文献

- 1) 山崎匡, 五十嵐潤, ”はじめての神経回路シミュレーション”, 森北出版, Dece.2021
- 2) Daniel Gajski, Nikil Dutt, Allen Wu, Steve Lin, “HIGH-LEVEL SYNTHESIS Introduction to Chip and System Design”, Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London 1992

修士学位論文要約（令和 6 年 3 月）

HBM 搭載 FPGA の高効率メモリアクセスに基づく
 Zipper 型テンソルネットワーク
 縮約用アーキテクチャに関する研究
 福田 琢朗

指導教員:張山 昌論, 学位論文指導教員:Hasitha Muthumara WAIIDYASOORIYA

A Study on Architecture for Zipper-type Tensor Network Shrinkage
 Based on Highly Efficient Memory Access in HBM-equipped FPGAs
 Takuro FUKUDA

Supervisor: Masanori HARIYAMA,

Research Advisor: Hasitha Muthumara WAIIDYASOORIYA

In this research, an architecture for Zipper-type tensor network contraction is developed and implemented for an HBM-equipped FPGA. Two-dimensional systolic array architecture that utilizes multiple HBMs efficiently in parallel is proposed for matrix multiplication, which is a key process in tensor network contraction. This architecture is further extended to process two matrix multiplications in a pipelined manner. As a result, the processing speed increases while the memory access is reduced due to reusing of the intermediate data internally. According to the experimental results using Zipper-type tensor networks with 1000 consecutive matrix multiplications, the proposed accelerator is 5 times faster compared to a conventional non-pipelined one.

1. はじめに

近年, 理工学の諸分野において応用が進められているテンソルネットワーク(TN)は, その縮約処理に多大な計算コストが掛かることからアクセラレータによる縮約処理の高速化に大きな需要が存在する. そして, TN の縮約処理に必要な大量の連続した行列積演算に対しては FPGA を用いて構成可能なパイプラインアーキテクチャが効果的である. 又, テンソルは複素行列によって構成されており, 実数行列と比較して倍となるデータ量に対応するために広帯域なメモリを搭載したハードウェアを用いたメモリアクセスの最適化が必要とされる.

本研究では TN の一種である Zipper 型テンソルネットワークに対し, HBM(High Bandwidth Memory)を搭載した高性能 FPGA に対する高効率メモリアクセスに基づいて設計した縮約用アーキテクチャを提案し, TN 縮約処理の高速化を図る.

2. 高並列 HBM アクセスに基づく複素行列積演算の高速化

Zipper 型 TN 縮約アーキテクチャの設計に先立ち設計を行った, 高速複素行列積演算部は図 1 のようになった. 2 次元シストリックアレイの周囲に入出力管理カーネルを配置し, 入出力データに対する効率的なメモリアクセスを実現した. また, HBM からアーキテクチャへは入力データを最高速度で最大 4 行転送できる為, 各 HBM へ入力データを 4 行ずつ配置し, HBM の持

つ最高速度でシストリックアレイへデータの並列転送を行っている.

メモリアクセスの最適化を行っていないシストリックアレイ及び理論値と, 開発した行列演算部(19×21)の処理時間は図 2 のようになった.

従来のアーキテクチャと提案の行列演算部を比較し, 処理時間を最大で約 2 倍へ向上し, 理論値との性能差を最大で約 1/30 まで低減することに成功した. 又, 要素数に関わらず実行時間を理論値+1~2ms まで漸近させることに成功した. 又, 同世代の FPGA を用いた実数行列積に関する先行研究と比較して十分に高速な性能であることを確認した[1].

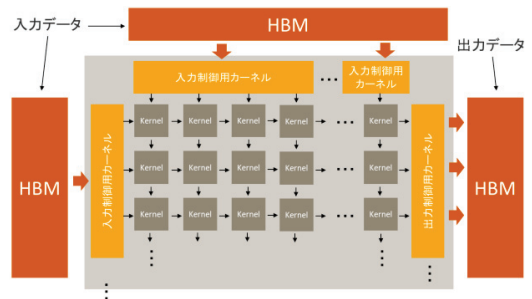


図 1 高速複素行列積演算部

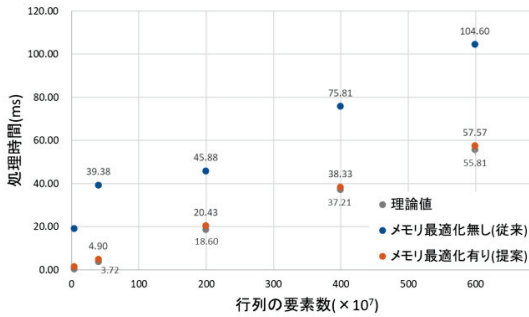


図 2 複素行列積演算アーキテクチャの処理時間の比較

このことから、使用ハードウェアの性能を十分に引き出す複素行列積演算部の開発に成功したと言える。

3. Zipper 型テンソルネットワーク縮約用アーキテクチャ

前章で提案した高速複素行列積演算部を基盤として Zipper 型 TN 縮約アーキテクチャの設計を行う。Zipper 型 TN は一般的な TN と異なり、行列積間で転置処理を行う必要がない。その為、行列積間でデータフローのパイプライン化を行い処理の高速化を図る。

提案のアーキテクチャの概形は図 3 のようになった。本アーキテクチャでは 2 つの複素行列積演算部を相互接続し、パイプライン化を行った。この 2 つの演算部で反復的行列演算を行う形式を採用することで任意の Zipper 型 TN への対応が可能となった。2 つの演算部の間にはデータの一次的保存とアーキテクチャ間の並列アクセス制御を担当するブリッジカーネルを設計・配置した。ブリッジカーネルは前段の演算部からの出力結果を内蔵する eRAM へ一次的に保存し、後段の演算部が必要とするデータを選択的に出力する。

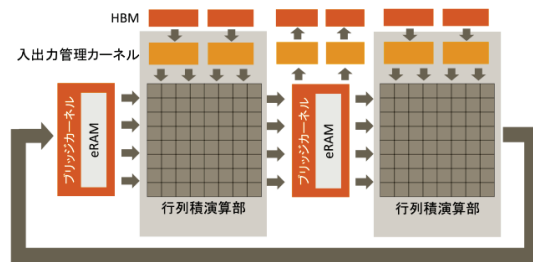


図 3 Zipper 型 TN 縮約アーキテクチャ

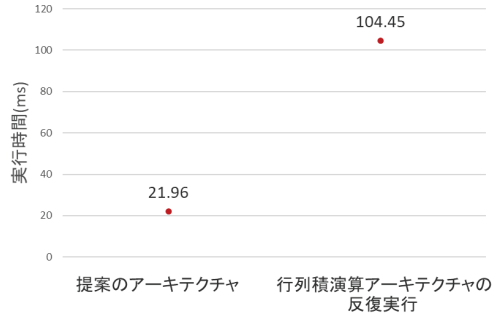


図 4 5 つの連続した行列積演算を演算させた際の処理時間

4×4 サイズのシストリックアレイ 2 つで構成した Zipper 型 TN 縮約アーキテクチャと前章で提案した行列積演算部に対し、連続した行列積演算を 1000 回演算させた際の処理時間は図 4 のようになった。従来のアーキテクチャの反復使用と比較して処理時間を約 1/5 まで削減することに成功した。行列積間のパイプライン化や中間結果の RAM を介さない転送、FPGA の制御回数削減により実行時間が削減されたと考えられる。又、回路の大規模化後は最新世代の GPU(NVIDIA A100)による演算と比較し、演算速度で匹敵し、消費電力において優れた性能を発揮可能であることが予測される。

4. まとめ

Zipper 型テンソルネットワークの高速な縮約の為に、高効率なメモリアクセスに基づいた FPGA アーキテクチャを設計した。設計に先立ち、アーキテクチャの核となる複素行列積演算部を FPGA 上に実装し、搭載する HBM へのメモリアクセスの効率化を行ったうえで理論値に漸近するパフォーマンスを引き出すことに成功した。さらに、開発した複素行列積演算部を基盤として Zipper 型 TN 縮約アーキテクチャの開発を行った。2 つの行列積演算部の相互接続によりパイプラインアーキテクチャを形成し、行列演算部単体による演算と比較して優れたパフォーマンスが発揮できることを確認した。

文献

1) Gorlani, P., Kenter, T., Plessl, C.: OpenCL Implementation of Cannon’s Matrix Multiplication Algorithm on Intel Stratix 10 FPGAs. International Conference on Field-Programmable Technology (ICFPT). pp. 99–107. IEEE (2019)

修士学位論文要約（令和6年3月）

ステレオレーダグラメトリに基づく3次元計測に関する研究

山崎 祐輝

指導教員：青木 孝文

3D Measurement Based on Stereo Radargrammetry

Yuki YAMASAKI

Supervisor: Takafumi AOKI

3D measurement using Synthetic Aperture Radar (SAR) is suitable for disaster damage assessment, because SAR can acquire images of the ground surface regardless of weather or time of the day. The conventional method performs the matching of two SAR intensity images using Phase-Only Correlation (POC) and calculates the 3D topography of the ground surface using stereo vision. However, this method cannot cope with SAR-specific image deformation caused by rugged terrain. In this paper, we propose a 3D measurement method that uses Dense Kernelized feature Matching (DKM), a deep learning-based feature matching method, to robustly address SAR-specific image deformation. We demonstrate the effectiveness of our method through an experiment using airborne SAR intensity images.

1. はじめに

遠隔から地表面の3次元形状を計測する技術は、広範な地域の調査を行うために必要不可欠である。合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar: SAR) は、地表面を画像化するイメージングレーダであり、地表面の3次元計測に必要なデータを時間帯や気象に関係なく取得できる。そのため、SARは、平時の調査だけでなく地震や噴火などの災害時の広範な被災地域の調査にも有用である。現在までに、異なる2つの航路で取得されたSAR強度画像ペアの対応付けを行い、ステレオビジョンを用いて地表面の3次元計測を行う手法が提案されている^{1) 2)}。SAR強度画像の対応付けには、位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC)³⁾をはじめとする、画像ペアの局所領域の類似度に基づく対応付け手法が用いられているが、地表面の起伏に応じて生じるSAR特有の画像変形に対応できない問題がある。深層学習を用いた画像対応付け手法であるDense Kernelized feature Matching (DKM)⁴⁾は、大きな変形を伴うカメラ画像ペアを高精度に対応付けられることが示されている。そこで、本論文では、DKMを用いたSAR強度画像からの地表面の3次元計測手法を提案する。航空機搭載SAR⁵⁾により取得されたSAR強度画像からデータセットを構築し、構築されたデータセットを用いて学習されたDKMでSAR強度画像ペアの対応付けを行う。それにより、3次元計測の精度を改

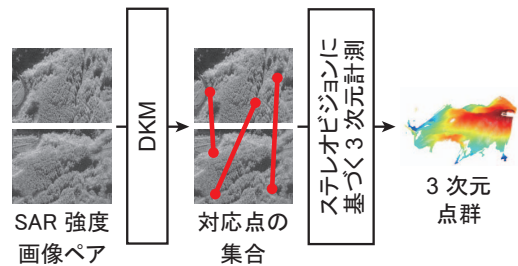


図1 DKMを用いた3次元計測手法の処理フロー

善するとともに、計測範囲を拡大する。構築されたSAR強度画像データセットを用いた精度評価実験を通して、提案手法の有効性を実証する。

2. DKMを用いた3次元計測手法

提案手法の処理フローを図1に示す。まず、DKMを用いてSAR強度画像ペアの対応付けを行い、対応点の集合を得る。次に、それぞれの対応点に対応する3次元空間上の点の座標を、ステレオビジョンに基づく3次元計測²⁾により計算する。3次元空間上の点の集合が、地表面の形状を表す3次元点群である。

DKMの学習済みモデルが公開されているが、カメラ画像データセット⁶⁾のみを用いて学習されているため、地表面の起伏による画像変形の大きなSAR強度画像ペアの対応付けに適していない。そこで、SAR強度画像データセットを構築し、構築されたデータセットでDKMの学習を行うことで、地表面の起伏

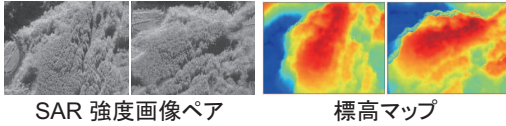


図2 構築されたデータセットに含まれるデータの例

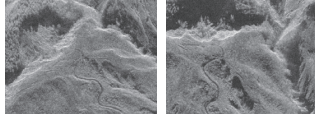


図3 実験に使用する SAR 強度画像ペア

による画像変形の大きな SAR 強度画像ペアを高精度に対応付けられるようにする。構築されたデータセットに含まれるデータの例を図2に示す。データセットには、情報技術研究機構 (National Institute of Information and Communications: NICT) が開発した航空機搭載 SAR (Pi-SAR2)⁵⁾ により取得された SAR 強度画像から 384 × 512 ピクセルの大きさに切り出された 5,046 組のパッチペアが含まれる。標高マップは、SAR 強度画像の各ピクセルの標高を表すデータであり、教師データとなる SAR 強度画像ペアの視差を計算するために用いられる。標高マップは、衛星画像から生成された数値表層モデル (Digital Surface Model: DSM)⁷⁾ から作成される。

3. 精度評価実験

SAR 強度画像データセットの評価用画像ペアを用いて、従来手法と提案手法の3次元計測の精度を比較する。従来手法として、SAR 強度画像ペアの対応付けに POC を用いるカールらの手法²⁾ を用いる。実験に用いる SAR 強度画像ペアを図3に示す。山の中腹を写した SAR 強度画像ペアであるため、地表面の起伏による大きな画像変形が生じている。衛星画像から生成された DSM⁷⁾ を真値として用いる。定量評価では、誤差の平均と標準偏差により評価する。定性評価では、3次元計測で得られる標高マップと、標高マップの誤差を表す誤差マップにより評価する。

定量評価の結果を表1に示す。提案手法は、カールらの手法よりも誤差の平均が大きいものの、誤差の標準偏差が小さい。定性評価の結果を図4に示す。標高マップや誤差マップにおいて、計測できていない領域を黒色で示している。標高マップを比較すると、提案手法はカールらの手法よりも広い領域を計測できていることがわかる。また、誤差マップを比較すると、提案手法ではカールらの手法で計測できていない領域を含め高精度に計測できていることがわかる。

表1 定量評価の結果: 誤差の平均と標準偏差

	平均 [m]	標準偏差 [m]
カールらの手法 ²⁾	-0.4	8.0
提案手法	-1.5	3.0

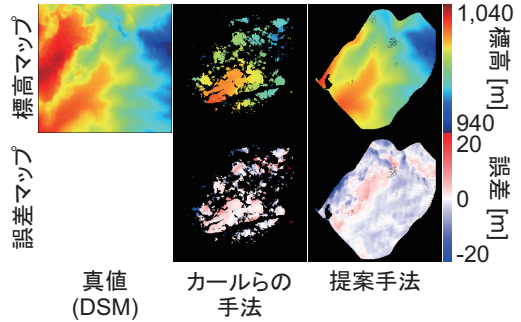


図4 定性評価の結果

以上より、提案手法では、カールらの手法よりも広い領域を高精度に計測できることが確認できた。

4. まとめ

本論文では、DKM を用いた地表面の3次元計測手法を提案した。SAR 強度画像データセットを用いた精度評価実験を通して、提案手法の有効性を実証した。今後の展望として、DKM の学習時にデータ拡張を行い、3次元計測の精度をさらに向上させることが挙げられる。

文献

- 1) D. Maruki et al., "Stereo radargrammetry using airborne SAR images without GCP," Proc. IEEE Int'l Conf. Image Processing, pp.3585–3589, Sept. 2015.
- 2) K. Insfran et al., "Accurate 3D measurement from two SAR images without prior knowledge of scene," Proc. IEEE Int'l Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp.4814–4817, July 2021.
- 3) K. Takita et al., "A subpixel correspondence search technique for computer vision applications," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E87-A, no.8, pp.1913–1923, Aug. 2004.
- 4) J. Edstedt et al., "DKM: Dense kernelized feature matching for geometry estimation," Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.17765–17775, June 2023.
- 5) A. Nadai et al., "Development of X-band airborne polarimetric and interferometric SAR with submeter spatial resolution," Proc. IEEE Int'l Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp.II-913–II-916, July 2009.
- 6) Z. Li et al., "MegaDepth: Learning single-view depth prediction from internet photos," Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.2041–2050, June 2018.
- 7) "AW3D 世界最高精度のデジタル 3D 地図サービス," <https://www.aw3d.jp/>.

修士学位論文要約（令和6年3月）

グラフ構造に基づく幸福頂点集合遷移問題の計算複雑性に関する研究

石井 裕

指導教員: 周 暁 学位論文指導教員: 田村 祐馬

The Complexity of the Happy Set Reconfiguration Problem Based on Graph Structures

Yutaka ISHII

Supervisor: Xiao ZHOU Research Advisor: Yuma TAMURA

We study the complexity of the Happy Set Reconfiguration problem, which determines whether there exists a sequence of happy sets that transforms an initial happy set into a target one in a step-by-step according to either the token jumping or token sliding rule. In this thesis, we show that this reconfiguration problem is solvable in linear time for threshold graphs and caterpillar graphs under the token jumping rule, while PSPACE-complete even for split graphs and bipartite graphs under the token jumping rule, and PSPACE-complete for bounded bandwidth graphs under the token sliding rule.

1. はじめに

遷移問題とは実行可能解によって形成される解空間において、解同士の到達可能性を調べる問題であり、動的な状況をモデル化することに適している。近年、グラフ理論の分野では独立点集合遷移問題⁶⁾や支配集合遷移問題⁸⁾、頂点被覆遷移問題⁷⁾など遷移問題の研究が盛んに行われている。

Easley と Kleinberg によってソーシャルネットワークの構造における最も基本的な概念である同類性が提唱された³⁾。朝廣らはこのソーシャルネットワークをグラフにモデル化し、頂点部分集合問題の観点から最大幸福頂点集合問題を提唱した²⁾。グラフ $G = (V, E)$ と部分集合 $S \subseteq V$ に対して、頂点 $v \in V$ と v に隣接する頂点が全て S に属しているとき、頂点 v は幸福頂点であると定義する。最大幸福頂点集合問題は、単純無向グラフ $G = (V, E)$ と非負整数 k が与えられたとき、幸福頂点の個数が最大になる要素数 k の部分集合 $S \subseteq V$ を求める問題である。この問題は、置換グラフでは $O(k^3 n^2)$ 、区間グラフでは $O(k^2 n^2)$ の計算時間で動く多項式時間アルゴリズムが存在していることが知られている⁴⁾。一方で、二部グラフや3正則グラフ¹⁾、スプリットグラフ²⁾ではNP困難であることが知られている。

2. 幸福頂点集合遷移問題の定義

本節では幸福頂点集合遷移問題の定義を与える。

非負整数 b に対し、頂点集合 S に属する幸福な頂点の個数を $h(S)$ としたとき、 $h(S) \geq b$ である S を b 幸福頂点集合と呼ぶ。

遷移問題を考えるにあたり、遷移ルール $R \in \{TJ, TS\}$ を設ける。問題を考える際には TJ, TS のいずれか一方のルールを適用する。頂点集合の系列 $\langle S_0, S_1, \dots, S_\ell \rangle$ に対し、TJ は $u \in S_{i-1}$ である頂点 u を削除し、 $v \notin S_{i-1}$ である頂点 v を追加することで S_i を得ることができるルールである。一方、TJ は $u \in S_{i-1}$ である頂点 u を削除し、 $v \notin S_{i-1}$ かつ $uv \in E$ である頂点 v を追加することで S_i を得ることができるルールである。

遷移ルール R のもとで得られる頂点集合の系列 $\langle S_0, S_1, \dots, S_\ell \rangle$ のうち、 $1 \leq i \leq \ell$ である各整数 i 及び与えられた非負整数 b に対し、 $h(S_i) \geq b$ であるものを S_0 から S_ℓ への遷移列と呼び、このとき S_0 から S_ℓ へ遷移可能であるとする。逆に、そのような遷移列が存在しないとき、 S_0 から S_ℓ へ遷移不可能であるとする。

幸福頂点集合遷移問題は単純無向グラフ $G = (V, E)$ 、非負整数 b 及び2つの b 幸福頂点集合である $S_0, S_\ell \subseteq V$ が与えられたとき、 S_0 から S_ℓ まで遷移可能かどうかを YES/NO で判定する問題である。

3. 結果

本論文では、TJ, TS のそれぞれの遷移ルールにおける本問題を様々なグラフに対して、線形時間アルゴリズムの構築や PSPACE 完全性の証明を行った。

3.1 遷移ルール TJ における本問題の結果

本節では、遷移ルール TJ における5つのグラフクラスに対する本問題の結果を与える。

定理 1. 遷移ルール TJ における幸福頂点集合遷移問題は、スターに対して出力が常に YES である。

略証. 葉に対してのみ適切に操作を行うことで、常に遷移可能であることを示した。

定理 2. 遷移ルール TJ における幸福頂点集合遷移問題は、キャタピラに対して $O(n)$ 時間で解くことができる。

略証. S_0 から S_t へ容易に遷移できるかを $O(n)$ 時間で調べ、容易に遷移できない場合は幸福頂点の個数が多い幸福頂点集合を經由して遷移できるかを $O(n)$ 時間で調べることで判定できることを示した。

定理 3. 遷移ルール TJ における幸福頂点集合遷移問題は、しきい値グラフに対して $O(n+m)$ 時間で解くことができる。

略証. S_0 と S_t がもつ特徴によって3つに場合分けを行い、そのうち2つの場合では常に遷移可能であること、残りの1つの場合は $O(n+m)$ 時間で判定できることを示した。

定理 4. 遷移ルール TJ における幸福頂点集合遷移問題は、スプリットグラフ及び二部グラフに対して PSPACE 完全である。

略証. スプリットグラフ及び二部グラフでは、すでに PSPACE 完全であることが知られているクリーク遷移問題⁵⁾からの多項式時間帰着により証明を行った。

3.2 遷移ルール TS における本問題の結果

本節では、遷移ルール TS における2つのグラフクラスに対する本問題の結果を与える。

定理 5. 遷移ルール TS における幸福頂点集合遷移問題は、スターに対して出力が常に NO である。

略証. S_0 から S_t への遷移の途中で必ず幸福頂点が0個になってしまうため、遷移不可能であることを示した。

定理 6. 遷移ルール TS における幸福頂点集合遷移問題は、バンド幅定数グラフに対して PSPACE 完全である。

略証. すでに PSPACE 完全であることが知られている H -WORD REACHABILITY⁹⁾からの多項式時間帰着により証明を行った。

4. まとめ

本論文では、幸福頂点集合遷移問題に関して、様々なグラフクラスに対して線形時間アルゴリズムを与えたり、困難性の証明を行った。今後の課題は、まだ解析できていないグラフクラスに対するアルゴリズムの構築や困難性の証明を行うことが挙げられる。

文献

- 1) Y. Asahiro, H. Eto, T. Hanaka, G. Lin, E. Miyano, and I. Terabaru. Complexity and approximability of the happy set problem. *Theoretical Computer Science*, 866:123–144, 2021.
- 2) Y. Asahiro, H. Eto, T. Hanaka, G. Lin, E. Miyano, and I. Terabaru. Parameterized algorithms for the happy set problem. *Discrete Applied Mathematics*, 304:32–44, 2021.
- 3) D. Easley and J. Kleinberg. *Networks, Crowds, and Markets: Reasoning About a Highly Connected World*. Cambridge University Press, 2010.
- 4) H. Eto, T. Ito, E. Miyano, A. Suzuki, and Y. Tamura. Happy set problem on subclasses of co-comparability graphs. in *Proceedings of the 16th International Conference and Workshops on Algorithms and Computation (WALCOM2022), Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, 2022.
- 5) T. Ito, H. Ono, and Y. Otachi. Reconfiguration of cliques in a graph. *Theory and Applications of Models of Computation. TAMC 2015. Lecture Notes in Computer Science*, 9076:212–223, 2015.
- 6) M. Kamiński, P. Medvedev, and M. Milanič. Complexity of independent set reconfigurability problems. *Theoretical Computer Science*, 439:9–15, 2012.
- 7) A. E. Mouawad, N. Nishimura, V. Raman, and S. Siebertz. Vertex cover reconfiguration and beyond. *Algorithms*, 11(2), 2018.
- 8) A. Suzuki, A. E. Mouawad, and N. Nishimura. Reconfiguration of dominating sets. *Journal of Combinatorial Optimization*, 32:1182–1195, 2016.
- 9) M. Wrochna. Reconfiguration in bounded bandwidth and tree-depth. *Journal of Computer and System Sciences*, 93:1–10, 2018.

修士学位論文要約（令和6年3月）

パラメタ化文字列照合問題に対する省領域アルゴリズムに関する研究

出口 晴貴

指導教員：篠原 歩， 学位論文指導教員：吉仲 亮

Efficient Parameterized Pattern Matching in Sublinear Space
Haruki IDEGUCHI

Supervisor: Ayumi SHINOHARA, Dissertation Advisor: Ryo YOSHINAKA

The parameterized matching problem is a variant of string matching, which is to search for all *parameterized* occurrences of a pattern P in a text T . In considering matching algorithms, the combinatorial natures of strings, especially *periodicity*, play an important role. In this paper, we analyze the properties of periods of parameterized strings and propose a generalization of Galil and Seiferas's exact matching algorithm (1980) into parameterized matching, which runs in $O(\pi|T| + |P|)$ time and $O(\log |P| + |\Pi|)$ space in addition to the input space, where Π is the parameter alphabet and π is the number of parameter characters appearing in P plus one.

1. Introduction

String matching is a problem to search for all occurrences of a pattern P in a text T . Let us denote the length of T and P by n and m , respectively. While a naive algorithm takes $O(nm)$ time to solve the problem, various linear-time algorithm have been proposed^{7) 9)}, and some of them use only constant extra space^{3) 6)}.

In this paper, we consider a variant of string matching, *parameterized matching*, in which two strings x, y are considered a *match* if there exists a bijection f over a part of characters (*parameter characters*) with $f(x) = y$. This paradigm was first introduced by Baker²⁾ for use in software maintenance by the ability to detect "identical" computer programs renaming their variables. While several efficient algorithms for parameterized matching has been proposed⁸⁾, we know of no previous attempt to reduce extra space usage to sublinear.

The main contribution of this paper is to give a sublinear-extra-space algorithm for the parameterized matching problem by extending Galil and Seiferas's exact matching algorithm⁵⁾. It runs in $O(|\Pi_P|n + m)$ time and $O(\log m + |\Pi|)$ space in addition to the input space, where Π is the set of parameter characters and Π_P is the non-empty set of parameter characters appearing in P . In order to provide the basis for our algorithm, we also investigate the properties of periodicity of parameterized strings.

2. Preliminaries

Let \mathbb{N}^+ be the set of natural numbers excluding 0.

2.1. Parameterized matching problem

Consider two disjoint alphabets: the *constant alphabet* Σ and the *parameter alphabet* Π . Strings over Σ are called *constant strings* and those over $\Sigma \cup \Pi$ are called *parameterized strings*, or *p-strings* for short. Consider a p-string $w \in (\Sigma \cup \Pi)^*$. We denote the length of w by $|w|$. For $0 \leq i < |w|$, let us denote the i -th letter of w by $w[i]$, where the index i is 0-based. For $0 \leq i \leq j \leq |w|$, we denote the substring $w[i]w[i+1] \cdots w[j-1]$ by $w[i : j]$.

We denote the set of permutations of Π by S_Π . For a permutation $f \in S_\Pi$ and a constant character $c \in \Sigma$, let $f(c) = c$. Then, the map f is naturally expanded as a bijection over p-strings: $(\Sigma \cup \Pi)^* \rightarrow (\Sigma \cup \Pi)^*$.

The *parameterized matching problem*, the problem we consider in this paper, is defined as follows²⁾:

Definition 1 Two p-strings x and y are called a parameterized-match or a p-match if and only if there exists a permutation $f \in S_\Pi$ such that $f(x) = y$. Denote this relation by $x \equiv y$.

Problem 1 Given two p-strings T (text) and P (pattern), find all $0 \leq i \leq |T| - |P|$ such that $T[i : i + |P|] \equiv P$.

2.2. Periodicity of parameterized strings

Periodicity is one of the most fundamental concepts in combinatorics of strings. Various exact matching

algorithms rely on the properties of periods³⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾. It is also the case for parameterized matching⁸⁾, where periods of p-strings are defined as follows:

Definition 2 Consider $w \in (\Sigma \cup \Pi)^*$ and $p \in \mathbb{N}^+$ with $p \leq |w|$. Then, p is called a period of w if and only if $w[0 : |w| - p] \equiv w[p : |w|]$.

If p is a period of w , there exists $f \in S_\Pi$ satisfying $f(w[0 : |w| - p]) = w[p : |w|]$ by definition. We denote this relation by $p \parallel_f w$ or simply by $p \parallel w$ when f is not specified.

In general, a p-string w can have multiple periods. We denote the shortest period of w as $period(w)$.

One of the most important properties of periods is Fine and Wilf's periodicity lemma⁴⁾. It refers to multiple periods in a single constant string. Apostolico and Giancarlo showed a similar property for parameterized strings¹⁾.

Lemma 1 For $w \in (\Sigma \cup \Pi)^*$, $p, q \in \mathbb{N}^+$, and $f, g \in S_\Pi$, assume that $p \parallel_f w$ and $q \parallel_g w$. If $|w| \geq p + q$ and $fg = gf$, we have $\gcd(p, q) \parallel w$.

3. Proposal

3.1. Alternative periodicity lemma

In Lemma 1, the commutativity of f and g is essential¹⁾. Since this property does not hold in general cases, it is difficult to apply the lemma to matching algorithms. Therefore, we show a new periodicity lemma for p-strings which does not assume the commutativity. We denote Π_w the set of parameter characters appearing in a p-string w .

Lemma 2 Suppose $w \in (\Sigma \cup \Pi)^*$ with $\Pi_w \neq \emptyset$ has periods p and q satisfying $p \leq q$. If $|w| \geq p \cdot |\Pi_w| + q$, we have $\gcd(p, q) \parallel w$.

3.2. Prefix periods

We introduce *prefix periods* of p-strings. It is generalization of the one used in Galil and Seiferas's exact matching algorithm⁵⁾. Hereafter, we consider a fixed $w \in (\Sigma \cup \Pi)^*$ with $\Pi_w \neq \emptyset$ and let $k := |\Pi_w| + 2$.

Definition 3 An integer $p \in \mathbb{N}^+$ is called a prefix period of w if and only if there exists a prefix w' of w such that $period(w') = p$ and $p \leq \frac{|w'|}{k}$.

There is an important property of prefix periods implied by Lemma 2.

Lemma 3 The number of prefix periods of w is at most $\log_2 |w|$.

3.3. Proposed algorithm

We extend Galil and Seiferas's exact matching algorithm⁵⁾ into parameterized matching. By Lemma 3 and several other lemmas, only minor changes from the original algorithm are required.

Theorem 1 The parameterized matching problem can be solved in $O(|\Pi_P|n + m)$ time and $O(\log m + |\Pi|)$ extra space.

4. Conclusion

We studied the periodicity of parameterized strings and extended Galil and Seiferas's sublinear-extra-space exact matching algorithm⁵⁾ for parameterized matching.

References

- 1) Alberto Apostolico and Raffaele Giancarlo. Periodicity and repetitions in parameterized strings. *Discrete Applied Mathematics*, 156(9):1389–1398, 2008.
- 2) Brenda S. Baker. Parameterized pattern matching: Algorithms and applications. *Journal of Computer and System Sciences*, 52(1):28–42, 1996.
- 3) Maxime Crochemore and Dominique Perrin. Two-way string-matching. *J. ACM*, 38(3):650–674, 1991.
- 4) Nathan J. Fine and Herbert S. Wilf. Uniqueness theorems for periodic functions. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 16(1):109–114, 1965.
- 5) Zvi Galil and Joel Seiferas. Saving space in fast string-matching. *SIAM Journal on Computing*, 9(2):417–438, 1980.
- 6) Zvi Galil and Joel Seiferas. Time-space-optimal string matching. *Journal of Computer and System Sciences*, 26(3):280–294, 1983.
- 7) Donald E. Knuth, James H. Morris, Jr., and Vaughan R. Pratt. Fast pattern matching in strings. *SIAM Journal on Computing*, 6(2):323–350, 1977.
- 8) Juan Mendivelso, Sharma V. Thankachan, and Yoan Pinzón. A brief history of parameterized matching problems. *Discrete Applied Mathematics*, 274:103–115, 2020.
- 9) Peter Weiner. Linear pattern matching algorithms. In *Proceedings of the 14th Annual Symposium on Switching and Automata Theory*, pages 1–11, 1973.

修士学位論文要約（令和6年3月）

グラフのトークンシフト問題を解くアルゴリズムに関する研究

伊藤 慎

指導教員: 周 暁 学位論文指導教員: 鈴木 顕

Algorithms for Token Shifting Problem on Graphs

Shin ITO

Supervisor: Xiao ZHOU Research Advisor: Akira SUZUKI

Consider a graph where each vertex has a colored token. We can choose a cycle on the graph and move each token from its current vertex to the next vertex along the cycle. This operation is called a shift operation. In the token shifting problem, we are given a graph, the number of colors, two token placements and a set of cycles. Then, we are asked to find a shortest sequence of shift operations that transforms one of the given token placement into another. In this thesis, we address the case where the number of colors is two, and the set of cycles includes all cycles on the graph. Then we give linear-time algorithms for this problem for the case where the input graph is a bipartite graph or complete split graph.

1. はじめに

世の中には様々なパズルが存在するが、その中で代表的なものの一つに15パズルがある。15パズルでは、 4×4 の盤面の各マスにそれぞれ1から15の数字が書かれた15枚のタイルが配置され、1つの空いているマスを利用してタイルをスライドさせる動作を繰り返すことで、最終的に1から15までのタイルが順番に配置された状態を目指すパズルである(図1参照)。この15パズルのように、与えられた初期配置から目標配置へと特定のルールに従って遷移させることを目的とするパズルは、遷移問題と呼ばれる問題として定式化することができる。

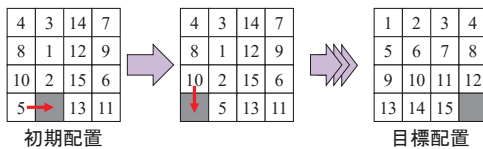


図 1. 15パズルの例

遷移問題を考える際には、「任意の配置から任意の配置に遷移できるか」、「遷移に必要なステップ数が最大になるような配置の組は何か」、「与えられた配置から別の与えられた配置に遷移するための最小ステップ数はどれくらいか」の3つが主な論点となる²⁾。本論文では3つ目の「与えられた配置から別の与えられた配置に遷移するための最小ステップ数はどれくらいか」に焦点を当てた問題を扱う。

2021年にSaiら³⁾は新しい遷移問題であるト

ークンシフト問題を提案した。トークンシフト問題はTurnstileのように、あらかじめ指定されたサイクルに沿ってタイルを動かす操作に基づいたパズルをモデル化した問題である。

2. 定義

グラフ $G = (V, E)$ を無向連結グラフ、 Col を色集合とし、 $|\text{Col}|$ を色数と呼ぶ。グラフの各頂点に色集合に含まれる色を割り当てたものをトークン配置と呼び、 $f: V \rightarrow \text{Col}$ で表す。

シフトとは、グラフ上のサイクルを1つ選び、そのサイクルに含まれる各頂点に配置されているトークンをサイクル上の1つ隣の頂点へ動かす操作である。グラフ $G = (V, E)$ 上のサイクル $C = (v_1, v_2, \dots, v_k, v_1)$ に沿ったシフトとは、シフト前後のトークン配置をそれぞれ f, f' としたとき、 $i \in \{1, 2, \dots, k-1\}$ に対して $f'(v_{i+1}) = f(v_i)$ かつ $f'(v_1) = f(v_k)$ が成り立つ。トークン配置 f_x に対して、 C_1, C_2, \dots, C_r と順番にシフトを行って得られる新しいトークン配置を f_y とする。このときこのサイクルの列を、 f_x から f_y へのシフト列と呼び、 (C_1, C_2, \dots, C_r) で表す。また r をシフト列の長さと呼び、長さが最小のシフト列を $\text{OPT}(f_x, f_y)$ と呼ぶ。

初期のトークン配置を f_0 、目標のトークン配置を f_t とし、グラフ G 上のシフトできるサイクル集合を \mathcal{C} とする。トークンシフト問題とは $\text{OPT}(f_0, f_t)$ を求める問題である。本論文では、入力として与えられる \mathcal{C} がグラフの全てのサイクルからなる場合について扱う。

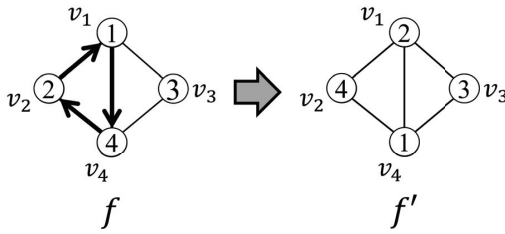


図 2. サイクル $\langle v_2, v_1, v_4, v_2 \rangle$ に沿ったシフト

f_0 を f_t にするシフト列が存在するとき、 f_0 と f_t は到達可能と呼ぶ。 f_0 と f_t が到達可能であるための必要十分条件が知られており⁴⁾、与えられたインスタンスがこの条件を満たすことは線形時間で確認できるため、以降は f_0 と f_t は到達可能であると仮定する。

2.1 既知の結果

トークンの色数が2のとき、入力を完全グラフやブロックグラフに限定した場合は多項式時間アルゴリズムが知られている¹⁾。一方、入力を誘導部分グリッドグラフした場合はNP困難であることが知られている¹⁾。

3. 本論文の結果

本論文ではトークンの色数が2色でかつ入力されるグラフが完全スプリットグラフや完全二部グラフである場合に対して、与えられるサイクル集合 C がグラフの全てのサイクルからなるトークンシフト問題を線形時間で解くアルゴリズムを与えた。

定理 1. 完全スプリットグラフ $G = (V, E)$ において、色数が2であるトークンシフト問題を線形時間で解くことができる。

略証. 完全スプリットグラフは独立集合 I とクリーク Q に分割できる。また I のうち目標と色が異なるトークンを持つ頂点集合のサイズは、1回のシフトで高々 $|Q|$ 減らすことができる。またシフトを行うサイクルの生成は $O(|Q|)$ 時間で求めることができ、定理1を示すことができる。 \square

定理 2. 完全二部グラフ $G = (V, E)$ において、色数が2であるトークンシフト問題を線形時間で解くことができる。

略証. 完全二部グラフは2つの独立集合 I_1, I_2 に分割できる。ここで一般性を失わず $|I_1| < |I_2|$ と仮定

する。また I_2 のうち目標と色が異なるトークンを持つ頂点集合のサイズは、1回のシフトで高々 $|I_1|$ 減らすことができる。またシフトを行うサイクルの生成は $O(|I_1|)$ 時間で求めることができ、定理2を示すことができる。 \square

4. まとめ

本論文では、与えられるサイクル集合 C がグラフの全てのサイクルからなるトークンシフト問題に対しグラフ構造に着目して計算容易性の解析を行った。

今後の課題としては、入力がコグラフであるときに色数が2である本問題の計算複雑性を解析することが考えられる。また、色数が定数色である本問題について、入力が完全スプリットグラフ、および完全二部グラフのときに多項式時間で解けるのか、困難性が示せるのかは知られていない。そのような場合の計算複雑性を明らかにすることも今後の課題として考えられる。

文献

- 1) W. H. H. Myint, R. Uehara, and G. Viglietta. Token shifting on graphs. In C. Chen, W. Hon, L. Hung, and C. Lee, editors, *Computing and Combinatorics - 27th International Conference, COCOON 2021, Tainan, Taiwan, October 24-26, 2021, Proceedings*, volume 13025 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 643–654. Springer, 2021.
- 2) N. Nishimura. Introduction to reconfiguration. *Algorithms*, 11(4), 2018.
- 3) K. K. Sai, R. Uehara, and G. Viglietta. Cyclic shift problems on graphs. In R. Uehara, S. Hong, and S. C. Nandy, editors, *WALCOM: Algorithms and Computation - 15th International Conference and Workshops, WALCOM 2021, Yangon, Myanmar, February 28 - March 2, 2021, Proceedings*, volume 12635 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 308–320. Springer, 2021.
- 4) K. Yamanaka, E. D. Demaine, T. Ito, J. Kawahara, M. Kiyomi, Y. Okamoto, T. Saitoh, A. Suzuki, K. Uchizawa, and T. Uno. Swapping labeled tokens on graphs. *Theoretical Computer Science*, 586:81–94, 2015.

修士学位論文要約（令和6年3月）

2つの正規言語を分離する状態数最小の決定性シンボリック・オートマトンの 質問学習に関する研究

河崎 喜斗

指導教員: 篠原 歩, 学位論文指導教員: 吉仲 亮

Query Learning of Minimal Deterministic Symbolic Finite Automata Separating Two Regular Languages Yoshito Kawasaki

Supervisor: Ayumi SHINOHARA, Dissertation Advisor: Ryo YOSHINAKA

We propose a query learning algorithm for constructing a minimal deterministic Symbolic Finite Automaton M that separates given two regular languages L_+ and L_- , i.e., $L_+ \subseteq \mathcal{L}(M)$ and $L_- \cap \mathcal{L}(M) = \emptyset$. Our algorithm MAT^{Sep} extends the algorithm for learning separating DFAs by Chen et al. (TACAS 2009) embedding the algorithm for learning DSFAs by Argyros and D’Antoni (CAV 2018). We also conduct experiments to compare the efficiency between Chen’s algorithm and ours. The result shows that our proposed method learns minimal separating deterministic automata in much less time than Chen’s over huge alphabets.

1. Introduction

Query learning is a prominent active learning model to obtain an unknown concept using queries first proposed by Angluin¹⁾. Her algorithm L^* terminates with a minimal DFA accepting the target regular language L_+ after posing a polynomial number of *membership* and *equivalence queries*.

Chen et al.³⁾ considered the settings where two disjoint regular languages are given, and proposed L^{Sep} algorithm to learn a minimal DFA that separates those languages using membership and *containment* queries. Such a setting and their solution can be seen as a generalization of Angluin’s scenario.

On the other hand, Argyros and D’Antoni²⁾ proposed MAT^* algorithm that learns DSFAs using membership queries and equivalence queries with the aide of a predicate learner. SFAs have transition edges labeled with guard predicates, which concisely represent potentially infinite sets of concrete characters. It learns minimal DSFAs over any query learnable algebra.

In this thesis, we propose a query learning algorithm of minimal separating DSFA for two disjoint languages. Our algorithm MAT^{Sep} extends L^{Sep} embedding MAT^* .

2. Preliminaries

2.1 Symbolic Automata

Symbolic automata (SFAs) carry predicates over a *Boolean algebra* on their transitions rather than characters themselves. A Boolean algebra is a tuple $(\Sigma, \Psi, \llbracket _ \rrbracket)$ where Σ is an alphabet, Ψ is a set of predicates closed under logical operators, and $\llbracket _ \rrbracket : \Psi \rightarrow 2^\Sigma$ is a *denotation function*. In a usual automaton, the transition relation forms $\Delta : Q \times Q \rightarrow 2^\Sigma$, e.g., $\Delta(q, q') = \{0, 1, \dots, 9\}$. In a symbolic automaton, in contrast, it forms $\Delta : Q \times Q \rightarrow \Psi$, e.g., $\Delta(q, q') = '0 \leq x < 10'$, which denotes $\llbracket 0 \leq x < 10 \rrbracket = \{0, 1, \dots, 9\}$. So SFAs have potential to represent regular languages over huge alphabets in much less size than DFAs.

In addition to SFAs, we introduce 3-valued deterministic SFAs (3SFAs) that contain three types of states: accepting, rejecting, and don’t-care. For 3SFA M , we denote the set of strings accepted and rejected by M by $\mathcal{L}_+(M)$ and $\mathcal{L}_-(M)$ respectively.

2.2 Learning Model

This thesis tackles the problem of finding a smallest SFA that separates two hidden regular languages L_+ and L_- by utilizing queries to the *teacher* who knows L_+ and L_- . We assume the teacher can answer to three types of queries: (i) A *membership query* asks whether a string $u \in \Sigma^*$

belongs to either of the language L_+ or L_- . The answer to the query is $+$ if $u \in L_+$; $-$ if $u \in L_-$; and $?$ otherwise. (ii) A *completeness query* asks whether a 3SFA M satisfies $\mathcal{L}_+(M) \subseteq L_+$ and $\mathcal{L}_-(M) \subseteq L_-$. The oracle returns “yes” if the condition is satisfied; and a counterexample string otherwise. (iii) A *soundness query* asks whether a 3SFA M satisfies $L_+ \subseteq \mathcal{L}_+(M)$ and $L_- \subseteq \mathcal{L}_-(M)$. The oracle returns “yes” if the condition is satisfied; and a counterexample string otherwise.

3. Our Proposed Algorithm

Our learning algorithm MAT^{Sep} can be viewed as a symbolic version of the algorithm L^{Sep} by Chen et al.³⁾ for learning separating DFAs from 3DFAs. MAT^{Sep} first “loosely” learns a 3SFA M s.t. $\mathcal{L}_+(M) \subseteq L_+$ and $\mathcal{L}_-(M) \subseteq L_-$ by modifying Argyros and D’Antoni’s SFA learning algorithm MAT^* . Let us denote the state reached by a string u from the initial state by q_u . MAT^{Sep} performs the role of a teacher for each algebra learner instances $\Lambda^{(q_u, q_v)}$ so that it infers a predicate $\varphi = \Delta(q_u, q_v)$ where $\llbracket \varphi \rrbracket = \{a \in \Sigma \mid ua, v \in L_+ \vee ua, v \in L_-\}$. Then, MAT^{Sep} computes a minimal SFA that separates M based on the technique by Paull and Unger⁴⁾. However, their original idea considers all characters of alphabet Σ , whose size can be infinite in symbolic automata. We reduced the number of characters to be considered to a finite number by taking representatives of the equivalence classes of the alphabet in the obtained 3SFA M . Such representatives can be obtained by Boolean algebraic operations on the predicates of the transitions. The obtained SFA N separates $\mathcal{L}_+(M)$ and $\mathcal{L}_-(M)$ but not necessarily L_+ and L_- . If the 3SFA M is too “loose”, it is quite likely that the SFA N does not separate L_+ and L_- , i.e., $L_+ \not\subseteq \mathcal{L}_+(N)$ or $L_- \not\subseteq \mathcal{L}_-(N)$ holds. In case N does not separate L_+ and L_- , we refine M using a counterexample in $(L_+ \setminus \mathcal{L}_+(N)) \cup (L_- \setminus \mathcal{L}_-(N))$. Otherwise, N is a minimal DFA separating L_+ and L_- .

Theorem 1 *Let $M_* = (\mathcal{A}, Q_0, Q_+, Q_-, Q_?, \Delta)$ be a minimal 3SFA such that $\mathcal{L}_+(M_*) = L_+$ and $\mathcal{L}_-(M_*) = L_-$. Then, MAT^{Sep} will learn a minimal SFA separating L_+ and L_- using Λ with $\mathcal{O}(|Q|^3 \mathcal{M}^\Lambda + (|Q|^3 + |Q|^2 \log m) \mathcal{E}^\Lambda)$ membership queries and $\mathcal{O}(|Q|^2 \mathcal{E}^\Lambda)$ completeness and soundness queries, where m is the length of the longest counterexample given to MAT^{Sep} and \mathcal{M}^Λ and \mathcal{E}^Λ are the maximum number of membership*

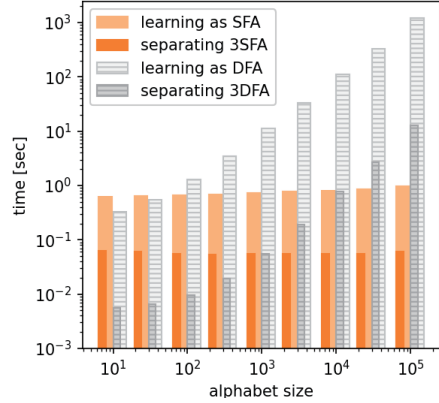


Figure 1: Comparing time by alphabet sizes

and equivalence queries respectively posed by each Λ to learn the predicates in M_* .

4. Evaluation

We compared the learning times of separating SFAs by MAT^{Sep} and separating DFAs by L^{Sep} for randomly generated two disjoint regular languages. The result described in Figure 1 shows that the learning time by MAT^{Sep} were almost independent of the alphabet size, while that was linear for L^{Sep} .

5. Conclusion

We presented a learning algorithm MAT^{Sep} to obtain a minimal separating SFA for given regular languages L_+ and L_- , by combining L^{Sep} algorithm by Chen et al.³⁾ and MAT^* algorithm by Argyros and D’Antoni²⁾. We also demonstrated the efficiency of MAT^{Sep} even for regular languages over huge alphabets through the experiments.

References

- 1) D. Angluin. Learning regular sets from queries and counterexamples. *Information and Computation*, 75(2):87–106, 1987.
- 2) G. Argyros and L. D’Antoni. The learnability of symbolic automata. In *Computer Aided Verification*, pages 427–445, 2018.
- 3) Y. Chen, A. Farzan, E. M. Clarke, Y. Tsay, and B. Wang. Learning minimal separating DFA’s for compositional verification. In *Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems*, pages 31–45, 2009.
- 4) M. C. Paull and S. H. Unger. Minimizing the number of states in incompletely specified sequential switching functions. *IRE Transactions on Electronic Computers*, EC-8(3):356–367, 1959.

修士学位論文要約（令和6年3月）

順序付き禁止トランジションを持つグラフにおける経路に関する研究

熊倉 航太

指導教員: 周 暁 学位論文指導教員: 田村 祐馬

On the Routing Problems in Graphs With Ordered Forbidden Transitions

Kota KUMAKURA

Supervisor: Xiao ZHOU Research Advisor: Yuma TAMURA

Finding a path between two vertices of a given graph is one of the most classic problems in graph theory. Recently, problems of finding a route avoiding forbidden transitions, that is, two edges that cannot be passed through consecutively, have been studied. In this paper, we introduce the ordered variants of these problems, namely the Path Avoiding Ordered Forbidden Transitions problem (PAOFT) and the Trail Avoiding Ordered Forbidden Transitions problem (TAOFT). We show that both the problems are NP-complete even for bipartite planar graphs with maximum degree three. Furthermore, we show that TAOFT remains NP-complete for cactus graphs. As positive results of PAOFT, we give a polynomial-time algorithm for bounded treewidth graphs and a linear-time algorithm for outerplanar graphs.

1. はじめに

実社会における問題の多くは、頂点と2つの頂点を結ぶ辺からなるグラフにおける問題として定式化できる。そのような問題の1つとして、道路網上で現在地から目的地まで行くための移動経路を求める問題がある。道路網に対して、現在地・目的地・交差点・行き止まりを頂点、道路網の道路を辺としてグラフへモデル化を行うことで、グラフ上で経路について調べる問題に定式化することができる。しかし、実際の道路網にはグラフへの単純なモデル化のみでは表現できない制約が存在している。道路網上の様々な制約の中から本論文では、右折禁止などといった指定方向外進行禁止という制約に注目する。

道路網における指定方向外進行禁止をグラフ上に表現する方法として、Kotzigは禁止トランジションを導入した³⁾。トランジションとはグラフにおける隣接する2つの辺の集合を指す。グラフ上の経路が、ある禁止トランジション $\{e_i, e_j\}$ の2辺 e_i, e_j を連続で通過するとき、その経路は禁止トランジション $\{e_i, e_j\}$ を通過するという。グラフ G , グラフの2つの頂点 s, t , グラフの禁止トランジションの集合 \mathcal{F} を入力として、 G に禁止トランジションを一度も通過しない $s-t$ パスが存在するかを判定する問題を PAFT と呼ぶ。同様に、禁止トランジションを一度も通過しない $s-t$ トレイルが存在するかを判定する問題を TAFT と呼ぶ。PAFT に関して、入力のグラフを一般グラフ、平面グラフ、格子グラフとしたとき NP 完全であることが示されている¹⁾⁵⁾。一方

で、入力のグラフが木幅制限グラフである場合に問題を多項式時間で解くアルゴリズムが与えられている¹⁾。TAFT に関しては、一般グラフの入力に対して多項式時間で解くことのできるアルゴリズムが与えられている⁴⁾。

2. 本研究の問題の定義

現実に存在する道路網では、進行禁止に順序が設けられていることが多い。例えば、主道路から従道路への進行は禁止されていても、その逆は許される場合がある。このような状況をモデル化するために、本論文では順序付きトランジションを新たに導入する。

グラフの隣接する2つの異なる辺の列を順序付きトランジションと呼ぶ。1つ目の辺を e_i , 2つ目の辺を e_j としたとき、この2つの辺で構成される順序付きトランジションを (e_i, e_j) と表記する。また、グラフ上で表現できる順序付きトランジションのうちいくつかを順序付き禁止トランジションとする。グラフ上の経路が順序付き禁止トランジションの2辺を順に通過するとき、順序付き禁止トランジションを通過するという。そして、順序付き禁止トランジションを一度も通過しないグラフ上のパスを適合パス、トレイルの場合は適合トレイルと呼ぶ。以降始点が s , 終点が t の適合パスおよび適合トレイルをそれぞれ $s-t$ 適合パス, $s-t$ 適合トレイルと表記する。

順序付き禁止トランジションを避けたパスの存在判定問題 (PAOFT) は、グラフ G と禁止トランジションの集合 \mathcal{F} と G の2つの頂点 s, t を入力とし、

s - t 適合パスが存在するかどうかを出力する判定問題である。一方で、順序付き禁止トランジションを避けたトレイルの存在判定問題 (TAOFT) は、入力 G は PAOFT と同様で、 s - t 適合トレイルが存在するかどうかを出力する判定問題である。

3. 結果

本学位論文では PAOFT と TAOFT に関して、計算複雑性を解析した。まず、両問題が入力のグラフを最大次数 3 の平面二部グラフとした場合でさえ NP 完全であることを示した。また、TAOFT について、入力のグラフをカクタスとした場合でさえ NP 完全であることを示した。一方で、入力のグラフを木幅制限グラフとしたときに PAOFT を多項式時間で解くアルゴリズムと、入力のグラフを外平面グラフに制限した時に PAOFT を解く線形時間アルゴリズムを与えた。

定理 1. 入力のグラフを最大次数 3 の平面二部グラフとしたとき、PAOFT および TAOFT は NP 完全である。

まず PAOFT の NP 完全性については、SAT 問題からの帰着により、インスタンスの出力が一致するように最大次数 3 の平面二部グラフへグラフを変換を行うことで証明した。一方で、グラフ G を最大次数 3 で、頂点 s, t の次数が 1 であるグラフとしたとき、グラフ G 上の P が s - t トレイルであるときかつその時に限り、 P は s - t パスであるという性質から、TAOFT に関しても NP 完全であることを示した。

定理 2. 入力のグラフをカクタスグラフとした場合でさえ TAOFT は NP 完全である。

本定理は、定理 1 で NP 完全であることを示した一般グラフの入力に対する TAOFT からの帰着によって証明した。

定理 3. 入力のグラフの頂点数を n 、最大次数を Δ とする。グラフ G に対して幅 k の木分解が与えられたとき、PAOFT は $O(k^2 \Delta(3(k+1) \Delta)^{2k+2} n)$ 時間で解ける。

この定理は、良い木分解を用いた動的計画法のアルゴリズムを与えることで証明した。また、木幅が tw のグラフ G を入力として、幅 $2\text{tw} + 1$ の木分解を $2^{O(\text{tw})} n$ 時間で出力するアルゴリズムが存在する²⁾ ため、木幅制限グラフの場合に PAOFT が多項式時間で解けることが言える。

定理 4. 入力のグラフの頂点数を n 、順序付き禁止トランジションの集合のサイズを $|\mathcal{F}|$ とする。入力のグラフを外平面グラフとしたとき、PAOFT は $O(n + \mathcal{F})$ 時間で解ける。

この定理は、外平面グラフにおける s - t パスの性質を利用した動的計画法のアルゴリズムを与えることで証明できる。

4. まとめ

本学位論文では、グラフ上の隣接する 2 つの辺の列のうちいくつかを順序付き禁止トランジションとし、順序付き禁止トランジションを避けたパスの存在判定問題 (PAOFT) および順序付き禁止トランジションを避けたトレイルの存在判定問題 (TAOFT) を定義し、計算複雑性の解析を行った。今後の課題として、順序付き禁止トランジションの数に制限を加えた場合の問題の計算複雑性を解析することが挙げられる。具体的には、順序付き禁止トランジションの数を制限したとき、制限がない場合では NP 完全であるグラフクラスに対して問題が多項式時間で解くことができないかを調べるのが考えられる。

文献

- 1) M. M. Kanté, F. Z. Moataz, B. Momège, and N. Nisse. Finding paths in grids with forbidden transitions. In *proceedings of the 41st International Workshop on Graph-Theoretic Concepts in Computer Science, WG 2015*, volume 9224 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 154–168. Springer, 2015.
- 2) T. Korhonen. A single-exponential time 2-approximation algorithm for treewidth. In *2021 IEEE 62nd Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS)*, pages 184–192, 2022.
- 3) A. Kotzig. Moves without forbidden transitions in a graph. *Matematický časopis*, 18(1):76–80, 1968.
- 4) L. T. D. Nguyễn. Unique perfect matchings, forbidden transitions and proof nets for linear logic with mix. *Logical Methods in Computer Science*, 16(1), 2020.
- 5) S. Szeider. Finding paths in graphs avoiding forbidden transitions. *Discrete Applied Mathematics*, 126(2-3):261–273, 2003.

修士学位論文要約（令和6年3月）

グラフの点素最短パス遷移に関する研究

斉藤 凜

指導教員：伊藤 健洋

A Study for Reconfiguring Vertex-disjoint Shortest Paths on Graphs

Rin SAITO

Supervisor: Takehiro ITO

We study the problem of deciding whether there is a step-by-step transformation between two given vertex-disjoint shortest paths in an unweighted graph for prescribed terminal pairs. This problem generalizes the well-studied SHORTEST PATH RECONFIGURATION problem. In this study, we address this problem in terms of graph classes. We first show that it is PSPACE-complete even when graphs are bipartite planar, of bounded bandwidth, and of bounded degree. On the other hand, we show that the problem is solvable in polynomial time for distance-hereditary graphs and for split graphs.

1. Introduction

Combinatorial reconfiguration⁵⁾ has been extensively studied in theoretical computer science. One of the most well-studied problems is the SHORTEST PATH RECONFIGURATION problem (SPR, for short), defined as follows⁶⁾: Given two shortest paths joining two specified vertices s and t (called *terminals*) in an unweighted graph, the problem asks to determine whether we can transform one into the other by exchanging a single vertex in a shortest path at a time, such that all intermediate results remain shortest paths joining s and t .

1.1 Our problems

As generalizations of SPR, we introduce and investigate reconfiguration problems for (internally) vertex-disjoint shortest paths in an unweighted graph G . For k terminal pairs (s_i, t_i) , $i \in \{1, 2, \dots, k\}$, consider a tuple of k paths in G such that the i -th path in the tuple joins s_i and t_i . Then, the k paths in the tuple are said to be *internally vertex-disjoint* if the internal vertices of k paths are all distinct and do not contain any terminal.

We first define the problem REACHABILITY OF VERTEX-DISJOINT SHORTEST PATHS (RVDSP, for short), as follows. Suppose that we are given two tuples $\mathcal{P} = (P_1, P_2, \dots, P_k)$ and $\mathcal{Q} = (Q_1, Q_2, \dots, Q_k)$ of internally vertex-disjoint paths such that each of P_i and Q_i is a shortest path in an unweighted graph G joining two terminals s_i and

t_i for all $i \in \{1, 2, \dots, k\}$. Then, the task is to decide whether or not one can transform \mathcal{P} into \mathcal{Q} by exchanging a single vertex of one shortest path in the tuple at a time, so that all intermediate results remain tuples of internally vertex-disjoint shortest paths for k terminal pairs. Thus, RVDSP for $k = 1$ is equivalent to SPR.

We also study the shortest variant, the problem SHORTEST RECONFIGURATION OF VERTEX-DISJOINT SHORTEST PATHS (SRVDSP, for short) which asks to determine whether or not there is a transformation between \mathcal{P} and \mathcal{Q} by at most ℓ vertex-exchange steps, for a given integer $\ell \geq 0$.

1.2 Known and related results

Kamiński et al.⁶⁾ introduced SPR, and posed an open question regarding its complexity. Bonsma²⁾ addressed this inquiry by showing that SPR is PSPACE-complete for bipartite graphs. Bonsma²⁾ raised the question of whether SPR can be solved in polynomial time for graphs with bounded treewidth. This question was answered negatively by Wrochna⁷⁾: SPR remains PSPACE-complete even for graphs with bounded bandwidth. Note that the bandwidth of a graph gives an upper bound on the pathwidth (and hence the treewidth) of the graph; and hence the PSPACE-completeness extends to for graphs with bounded treewidth.

On the positive side, SPR is known to be solvable in polynomial time for restricted classes

of graphs, such as chordal graphs and claw-free graphs²⁾; planar graphs³⁾; grid graphs¹⁾; circle graphs, permutation graphs, the Boolean hypercube, bridged graphs, and circular-arc graphs⁴⁾.

2. Our contribution

We study the computational complexity of RVDSP and SRVDSP from the perspective of graph classes. We first show the computational hardness of RVDSP, as follows.

Theorem 1. *RVDSP is PSPACE-complete for graphs that are planar bipartite, of bounded bandwidth, and with maximum degree five, even if the maximum distance of terminal pairs is at most four.*

Additionally, RVDSP is PSPACE-complete for instances with further restrictions in terms of the maximum distance of terminal pairs.

Theorem 2. *RVDSP is PSPACE-complete for graphs with maximum degree five even when the maximum distance of terminal pairs is at most three.*

On the positive side, we give a polynomial-time algorithm to solve RVDSP for distance-hereditary graphs and for split graphs. Interestingly, our algorithm for these two graph classes can be obtained as a corollary of a single theorem (Theorem 3) by introducing the concept of “*st*-completeness” of graphs for terminal pairs (s, t) .

We now define the *st*-completeness. Let G be an undirected, unweighted and connected graph. For two vertices $u, v \in V(G)$, we denote by $d(u, v)$ the minimum number of edges in any path in G joining u and v . For a terminal pair (s, t) and each $j \in \{0, 1, \dots, d(s, t)\}$, we define $L_j = \{v \in V(G) \mid d(s, v) = j, d(s, v) + d(v, t) = d(s, t)\}$. A graph G is said to be *st*-complete if G has an edge joining any vertex in L_j and any vertex in L_{j+1} for all $j \in \{0, 1, \dots, d(s, t) - 1\}$. By a breadth-first search algorithm, we can obtain all layers L_j and determine whether G is *st*-complete in linear time.

Theorem 3. *Let G be a graph of diameter d as an input of RVDSP such that G is *st*-complete for all k terminal pairs. Then, RVDSP is solvable in polynomial time.*

Corollary 4. *RVDSP is solvable in polynomial time for split graphs, and for distance-hereditary graphs.*

Our algorithm is constructive and finds an actual transformation (if exists) that requires polynomial number of vertex-exchange steps.

Finally, we show that SRVDSP is NP-complete for split graphs.

Theorem 5. *SRVDSP is NP-complete for split graphs.*

Acknowledgement

We are grateful to Professor Ryuhei Uehara, JAIST, and Assistant Professor Hiroshi Eto, Kyutech, for their invaluable contribution to this study.

References

- 1) J. Asplund, K. D. Edoh, R. Haas, Y. Hristova, B. Novick, and B. Werner. Reconfiguration graphs of shortest paths. *Discrete Mathematics*, 341(10):2938–2948, 2018.
- 2) P. S. Bonsma. The complexity of rerouting shortest paths. *Theoretical Computer Science*, 510:1–12, 2013.
- 3) P. S. Bonsma. Rerouting shortest paths in planar graphs. *Discrete Applied Mathematics*, 231:95–112, 2017.
- 4) K. Gajjar, A. V. Jha, M. Kumar, and A. Lahiri. Reconfiguring shortest paths in graphs. In *Thirty-Sixth AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI 2022*, pages 9758–9766. AAAI Press, 2022.
- 5) T. Ito, E. D. Demaine, N. J. A. Harvey, C. H. Papadimitriou, M. Sideri, R. Uehara, and Y. Uno. On the complexity of reconfiguration problems. *Theoretical Computer Science*, 412(12–14):1054–1065, 2011.
- 6) M. Kamiński, P. Medvedev, and M. Milanić. Shortest paths between shortest paths. *Theoretical Computer Science*, 412(39):5205–5210, 2011.
- 7) M. Wrochna. Reconfiguration in bounded bandwidth and tree-depth. *Journal of Computer and System Sciences*, 93:1–10, 2018.

修士学位論文要約（令和6年3月）

グラフの一般化経路問題に関する研究

鈴木 駿太

指導教員: 周 暁 学位論文指導教員: 鈴木 顕

Computational Complexity of General Routing Problem on Graphs

Shunta SUZUMURA

Supervisor: Xiao ZHOU Research Advisor: Akira SUZUKI

In the general routing problem, we are asked to find a closed walk on a given graph with minimum cost that covers all given subsets of vertices and edges of the graph. In this thesis, we show that this problem is NP-hard for several graphs such as complete graphs and bipartite planar graphs. On the other hand, we give a $2^{O(t \log t)} \cdot n$ time and an $O(7^{2b} \cdot n^2 + n^3)$ time algorithms for planar graphs, where n , t and b are the number of vertices, the treewidth and branchwidth of the input graph, respectively. In addition, we introduce general routing problem on graphs with forbidden transitions and show this problem is NP-hard even for star graphs.

1. はじめに

実社会において、徒歩または乗り物を用いて移動することは頻繁に行われている。このとき、移動する時間や環境に対する影響を考えると、移動する経路の長さはなるべく短いことが望ましい。道路網における効率的な経路を求める問題には、2地点間の最短経路を求める最短経路問題³⁾や、都市の集合と任意の2都市間の距離が与えられたときに、すべての都市をちょうど1回ずつ通り出発点に戻る最短の経路を求める問題である巡回セールスマン問題²⁾などがあり、古くから研究されてきた。本論文ではそのような経路問題の一つである一般化経路問題と、この問題に制約を加えた禁止トランジション付き一般化経路問題を扱う。

一般化経路問題は、無向グラフ $G = (V, E)$ 、辺重み $w : E \rightarrow \mathbb{Z}_+$ 、頂点部分集合 $V' \subseteq V$ 、辺部分集合 $E' \subseteq E$ が与えられたとき、 G 上における V' の頂点と E' の辺すべてを1回以上通り始点に戻るようなウォークのうち、長さが最小であるものを求める問題であり、Orloffにより提案された⁵⁾。本論文ではグラフクラスやパラメータの観点から一般化経路問題の計算複雑性を解析する。

この問題の応用例として、ゴミ収集車の経路策定がある。ゴミ収集車は指定されたマンションと指定された道沿いのすべての家からゴミを集めて元の場所に戻る必要がある。一般に、指定されたすべての場所をまわる経路は複数存在するが、移動時間や環境への影響を考慮するとその中で最短の経路を求めたい。ここでマンションや出発点、交差点を頂点に、

道を辺に置き換えると道路網をグラフにモデル化することができ、この問題を一般化経路問題として考えることができる。一般化経路問題は他にも、実社会において効率の良い経路を求める様々な問題に応用することができる。

実際の道路網には車両の通行に関する様々な制約が存在する。そのような道路網における制約として、右折禁止のような指定方向外進行禁止がある。本論文では指定方向外進行禁止に対応した制約をグラフに加えた、禁止トランジション付き一般化経路問題を提案する。グラフ $G = (V, E)$ 上のトランジションとは、ある頂点 $v \in V$ を端点として持つ2辺 $e_1, e_2 \in E$ と頂点 v の列 $\langle e_1, v, e_2 \rangle$ である⁴⁾。 G 上のトランジションのうち、いくつかを禁止トランジションとする。禁止トランジション $\langle e_1, v, e_2 \rangle$ を含まない経路とは、 $\langle e_1, v, e_2 \rangle$ または $\langle e_2, v, e_1 \rangle$ を含まない経路である。このとき禁止トランジション付き一般化経路問題を、無向グラフ $G = (V, E)$ 、辺重み $w : E \rightarrow \mathbb{Z}_+$ 、頂点部分集合 $V' \subseteq V$ 、辺部分集合 $E' \subseteq E$ 、禁止トランジションの集合 F_t が与えられたとき、 G 上における V' の頂点と E' の辺すべてを1回以上通り始点に戻るような F_t の任意の禁止トランジションを含まないウォークのうち、長さが最小であるものを求める問題と定義する。本論文ではこの問題についても計算複雑性を解析する。

2. 結果

本論文では一般化経路問題に対し、木幅をパラメータとした FPT アルゴリズムと、枝幅をパラメータと

した平面グラフに対する FPT アルゴリズムを与えた。また、ハミルトン閉路問題が NP 完全であるグラフクラスと完全グラフにおいて一般化経路問題が NP 困難であることを示した。加えて、禁止トランジション付き一般化経路問題がスターにおいて NP 困難であることを示した。

2.1 FPT アルゴリズム

定理 1. 入力グラフ G の頂点数を n 、木幅を t とする。このとき、 $2^{O(t \log t)} \cdot n$ 時間で一般化経路問題を解く FPT アルゴリズムが存在する。

略証. 定理 1 は G の良い木分解を利用した動的計画法を構築することで得られる。□

定理 1 から以下の系が得られる。

系 1. 頂点数 n の木幅定数グラフに対し、 $O(n)$ 時間で一般化経路問題を解くアルゴリズムが存在する。

続いて以下の定理を示す。

定理 2. 枝幅を b とする。このとき、頂点数 n の平面グラフに対し $O(7^{2b} \cdot n^2 + n^3)$ 時間で一般化経路問題を解く FPT アルゴリズムが存在する。

略証. 定理 2 は平面グラフ G の球面カット分解を利用した動的計画法を構築することで得られる。□

2.2 困難性

定理 3. ハミルトン閉路問題が NP 完全であるグラフクラスにおいて、一般化経路問題は NP 困難である。

略証. 一般化経路問題の入力に正整数 k を加え、出力を、 V' のすべての頂点と E' のすべての辺を 1 回以上通るような閉じた経路のうち、長さが k 以下のものが存在するか (YES / NO)、に置き換えた問題を一般化経路問題 (判定問題) と定義する。定理 3 を示すために、ハミルトン閉路問題が NP 完全であるグラフクラスにおいて、一般化経路問題 (判定問題) が NP 完全であることを示す。そのためにハミルトン閉路問題から一般化経路問題 (判定問題) に多項式時間帰着する。このとき、ハミルトン閉路問題のインスタンスと一般化経路問題 (判定問題) のインスタンスにおけるそれぞれのグラフが、同型となるようにインスタンスを変換することで定理 3 を示した。□

定理 4. 完全グラフにおいて一般化経路問題は NP 困難である。

略証. 一般化経路問題 (判定問題) が NP 完全であることを示すことにより定理 4 を示す。そのために、NP 困難であることが知られている一般グラフにおけるハミルトン閉路問題¹⁾ から一般化経路問題 (判定問題) への多項式時間帰着を与えた。□

定理 5. スターにおいて、禁止トランジション付き一般化経路問題は NP 困難である。

略証. 一般化経路問題における困難性の証明と同様に、禁止トランジション付き一般化経路問題 (判定問題) を定義し、この問題が NP 完全であることを示すことにより定理 5 を証明する。そのために一般グラフにおけるハミルトン閉路問題からスターにおける禁止トランジション付き一般化経路問題 (判定問題) への多項式時間帰着を与えた。□

3. まとめ

本論文では一般化経路問題に対し、木幅をパラメータとした FPT アルゴリズムと、枝幅をパラメータとした平面グラフに対する FPT アルゴリズムを与えた。また、グラフクラスの観点から一般化経路問題と禁止トランジション付き一般化経路問題の困難性を示した。今後の課題としては本論文で示した枝幅をパラメータとした FPT アルゴリズムを改善し、計算時間を短くすることや、禁止トランジション付き一般化経路問題について、グラフの木幅と最大次数を制限したときに高速に動作するアルゴリズムの開発などが挙げられる。

文献

- 1) T. Akiyama, T. Nishizeki, and N. Saito. NP-completeness of the hamiltonian cycle problem for bipartite graphs. *Journal of Information Processing*, 3:73–76, 1980.
- 2) M. Bellmore and G. L. Nemhauser. The traveling salesman problem: A survey. *Operations Research*, 16(3):538–558, 1968.
- 3) E. W. Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1:269–271, 1959.
- 4) A. Kotzig. Moves without forbidden transitions in a graph. *Matematický časopis*, 18(1):76–80, 1968.
- 5) C. S. Orloff. A fundamental problem in vehicle routing. *Networks*, 4(1):35–64, 1974.

修士学位論文要約（令和6年3月）

集団における模倣学習と言語創発

高田 純弥

指導教員：篠原 歩， 学位論文指導教員：吉仲 亮

Imitation Learning in Populations and Language Emergence

Junya TAKADA

Supervisor: Ayumi SHINOHARA, Dissertation Supervisor: Ryo YOSHINAKA

In recent years, there has been a surge in research on simulating language emergence using deep learning. This study proposes an experiment combining signaling game and imitation learning to investigate the emergence of language. In this experiment, senders attempt to explore languages that receivers can understand while trying to imitate the languages of other senders. The results indicate that the imitation by senders enhances the compositional structure of their languages and furthermore improves their generalization performance. This improvement is attributed to senders acquiring compositional elements from other languages. The findings of this study suggest the importance of imitation learning for the emergence of languages with compositional structure.

1. はじめに

言語は人類の長い歴史を通じて発展してきたが、その創発と進化のメカニズムはまだ謎に包まれている。言語創発のメカニズムを解明することは、人間の言語能力を理解する上で重要である。近年、深層学習を用いた言語創発のシミュレーション研究が注目されており、シミュレーションによって創発する言語と自然言語の特性比較が焦点となっている。特に、多くの自然言語が生産性と構成性をもつことが知られているが、この2つの性質が発生、あるいは発展する過程をシミュレーションで再現する研究が盛んである。そのうちの一つに Lewis のシグナリングゲームの設定を用いた実験¹⁾がある。これは送信者が情報をメッセージに変換して受信者に送信し、受信者は受信したメッセージを元に送信者の持っている情報を推測するという状況下で創発する言語について調査した研究である。この他には、送信者が異なる複数の言語を模倣するとどんな言語を獲得するかを調査した、模倣学習に関する研究²⁾もある。

本論文では、シグナリングゲームを用いた学習と模倣学習を組み合わせたような状況設定を提案し、この状況下ではどのような言語が創発するかを調査した。この実験には複数の送信者と複数の受信者が存在し、送信者は受信者に対して情報を伝達できるように、受信者はメッセージから情報を推測できるように学習する。これと同時に送信者は他の送信者と同じ言語を話すように模倣する。模倣対象の送信者の言語のうちで構成的なものを自分の言語に取り

入れつつ、模倣者も模倣対象も各々シグナリングゲームをすることで、すべての送信者が構成的な言語を獲得することを期待する。

2. 生産性と構成性

見聞きしたことのない新しい概念を表現することができ、同時に一度も使ったことのない、または見聞きしたことのない言語表現の意味するところを理解できる言語の特徴を生産性という。例えば、「青いズボン履いたピンクのゴリラがりんごを食べている」という文を見たことがなくても、この文の意味を理解することができ、作ることもできる。一次創作の物語を文章に起こすことも、人の書いた文章を読んで物語を想像することも、生産性の例である。

言語が生産性を持つことができる理由を説明するために提唱された概念が構成性である。構成性とは、言語表現が小さな要素の意味を一定の手順で合成することで構成されるという性質である。例えば、「青いズボン履いたピンクのゴリラがりんごを食べている」という文は、「青い」、「ズボン」、「を」、「履いた」のように小さな要素に分解され、「青い」は「ズボン」を修飾し、「ズボン」は「履いた」の対象である、のように複数の要素が文法に従って組み合わせられる。言語表現が要素とその合成によって構成されるという特徴があるために言語は生産性をもつと考えられている。英語や日本語などの多くの言語が構成性をもつが、構成性をもつ言語が構成性に従わない言語表現をすることもある。その代表例が慣用句

である。日本語には「顔が広い」という表現がある。これは頭部の前面の面積が大きいという意味ではなく、人脈が広いという意味である。このような言語表現は小さな要素とその合成によって構成されていると考えることができない。

3. 提案手法

Lewis のシグナリングゲームでは、1人の送信者が情報をメッセージに変換して1人の受信者に送信する。そして受信者はメッセージをもとに情報を復元することを試みる。提案手法はこのシグナリングゲームを複数の送信者と複数の受信者の設定へと拡張する。はじめにすべての送信者は同一の概念を観測する。次に送信者は各々がメッセージを出力し、送信者ごとに1人だけ指定された受信者たちに与える。最後に受信者は送信者が観測した概念を正確に出力しなければならない。受信者たちの目的は受け取ったメッセージをもとに、送信者が観測した概念を当て当てることであり、送信者たちの目的は受信者が正解できるようなメッセージを暗中模索の状況で探索することである。以上に加えて送信者には自分以外の送信者を模倣するタスクが与えられる。送信者は観測した概念に対して、模倣対象として指定された送信者のメッセージと同じものを出力することが求められる。

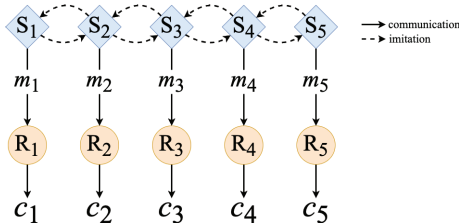


図1. 送信者・受信者の関係を表したグラフの例。実線はシグナリングゲームの流れを、破線は模倣の関係を表している。

4. 実験と結果

送信者が観測する概念 $c \in \mathcal{A}^n$ は原子集合 \mathcal{A} の要素を n 個もつ組である。概念集合 \mathcal{A}^n は訓練データ $\mathcal{X} \subseteq \mathcal{A}^n$ とテストデータ $\mathcal{A}^n \setminus \mathcal{X}$ に分割される。分割はサイズの比が 8 : 2 になるようにランダムに行う。メッセージは文字列としてその最大長は $T = 10$ とし、語彙集合 \mathcal{W} は $|\mathcal{W}| = 50$ 種類の文字からなる。送信者と受信者のニューラルネットワークはどちらも 2 層の GRU と 1 層の全結合層からなる。送信者の受信者のそれぞれ 5 人おり、送信者の模倣の関係を表すグラフは図1のように設定する。加えて対照実験として、送信者が模倣を行わない設定での

学習も行う。

原子集合のサイズ $|\mathcal{A}|$ と概念の要素数 n を変えて実験を行ったところ、模倣を行わない設定での学習と比べて、模倣を行う設定での学習の方が構成性が高くなることがあることがわかった。また、模倣を行う設定での学習の方がテストデータに対する正答率、すなわち汎化性能が高くなることもあることもわかった。これは先行研究²⁾の結果から構成性が高い言語は模倣されやすいことがわかっているため、模倣を行うと送信者が互いに言語の構成的な部分を獲得し合い、全体として構成性が向上したと考えられる。また、言語の構成性が向上することにより、汎化性能が高まったと考えられる。先行研究¹⁾では構成的な言語を獲得したモデルは、汎化性能が高かったことが示されている。一方で、 $|\mathcal{A}|$ と n の組み合わせによっては模倣を行っても構成性が向上しないことや汎化性能が向上しないこともある。 n が大きいほど模倣を行っても汎化性能がほとんど向上しないが、これは n が大きいと模倣をしなくても概念の構造を十分に理解できるため十分な汎化性能を獲得し、模倣をした時の汎化性能の伸び代が小さくなるためであると考えられる。また、 $|\mathcal{A}|$ が小さい場合にも模倣による構成性と汎化性能が向上しにくい。これは概念の種類が少ないために過学習が起きたことが原因であると考えられる。

5. まとめ

本研究ではシグナリングゲームの設定と模倣学習を取り入れた設定で実験を行い、送信者が言語の探索をしつつ模倣を行うとどのような言語が創発するかを調査した。実験を通して、模倣によって言語の構成性が向上しうること、模倣によって生産性を安定して得ること、生産性が向上することを示した。これは他言語の構成的な部分を優先的に模倣することで、より構成的な言語を獲得したためであると考えられる。また、このことが生産性の向上につながったと考えられる。今後の課題として、送信者間の模倣関係を表すグラフの構造が言語創発に与える影響や、送信者が複数の受信者と通信した場合に言語に与える影響の調査がある。

文献

- 1) Rahma Chaabouni, Eugene Kharitonov, Diane Bouchacourt, Emmanuel Dupoux, and Marco Baroni. Compositionality and generalization in emergent languages. 2020.
- 2) Emily Cheng, Mathieu Rita, and Thierry Poibeau. On the correspondence between compositionality and imitation in emergent neural communication. 2023.

修士学位論文要約（令和6年3月）

音響特徴および感性印象が話速知覚に及ぼす影響

玉川 真帆

指導教員：坂本 修一

Effect of Acoustic Characteristics and Affective Factors

on Speech Rate Perception

Maho TAMAKAWA

Supervisor: Shuichi SAKAMOTO

In this study, I have focused on the mechanism of speech rate perception and investigated the effect of acoustic characteristics and affective factors on speech rate perception. The results of several experiments revealed that various physical/affective factors contribute independently or interactively to perceived speech rate.

1. はじめに

これまでに様々な音響特徴が話速知覚に影響を及ぼすことが報告されている^{1) 2)}。しかし、話速知覚における各音響特徴の相互作用的な寄与や、他の感性印象と話速知覚との関係を検討した研究は少なく、「音響特徴」、「話速知覚（＝主観的話速）」、「感性印象」の各関係についてその全容は明らかになっていないといえる。そこで本研究では、主観的話速の知覚メカニズムの解明を目的として、様々な音響特徴や感性印象が話速知覚に及ぼす影響を検討する。

まず音声全体に関わる要素の「音声長」、「音声長に占めるポーズ長の割合（＝ポーズ比）」が話速知覚に及ぼす影響を調査する。次に言語理解に関連する「了解性」が主観的速度に与える影響を検討する。

2. 音声全体に関わる時間的特徴が話速知覚に及ぼす影響

実験に使用した音声素材は、「音素バランス1000文³⁾」からモーラ数が表1に示す9種×音声内容3種の27音声である。これら各音声に対して、1モーラの時間長（＝モーラ長）および音声長が表1に対応した値となるよう、各フレーズの長さとしてフレーズ間のポーズ時間長（＝ポーズ長）を変換した。これらの操作により、音声素材1音声につき、同一音声長でモーラ長の異なる3音声を作成した。以上のように作成した81音声から、表1のモーラ数9種×モーラ長3種の計27音声で構成される音声セット3つを作成し、これを2回繰り返すことで計6セットを作成した。ちなみに、表1に示すように、セット内のモーラ数9種は音声長3段階×ポーズ比3段階と読み替えることが可能である。以上のような操作を男性話者2名、女性話者2名の計4名の話者が発

表1. 実験に使用した刺激の条件

モーラ数	ポーズ比			音声長
	モーラ長 0.125 s	モーラ長 0.150 s	モーラ長 0.180 s	
16 モーラ	0.474	0.368	0.242	3.8 s
18 モーラ	0.408	0.289	0.147	
20 モーラ	0.342	0.211	0.053	
24 モーラ	0.474	0.368	0.242	5.7 s
27 モーラ	0.408	0.289	0.147	
30 モーラ	0.342	0.211	0.053	
32 モーラ	0.474	0.368	0.242	7.6 s
36 モーラ	0.408	0.289	0.147	
40 モーラ	0.342	0.211	0.053	

話した音声に対して行い、計24個の音声セット（男性話者・女性話者各12セット）を作成した。本実験では、12名の聴取者に対して、男性話者、女性話者1セットずつ使用した。聴取者は、各音声セットの変換音声27音声に対して、主観的話速を評価した。簡略化のため、1試行において5つの音声を提示し、これらの主観的話速の順位（1-5）を付ける形で回答した。なお、音声聴取にはヘッドホンを用いた。各試行で提示される5音声は、本吉の「適応比較行列を用いた間接的な尺度構成法⁴⁾」を参考に、試行ごとに選定された。5音声の評価を50試行行った後、最終的な順位を主観的話速の評価値とした。

音声長（speech length：以下SLとする）3段階、ポーズ比（pause length ratio：以下PRとする）3段階、モーラ長（mora length：以下MLとする）3段階の27種の変換音声における、主観的話速の順位（27音声中*y*位）を示した結果を図1に示す。図1および統計解析の結果から、音声長およびポーズ比の“音声全体に関わる要素”の変化が話速知覚に影響を及ぼすことが分かった。また、音声長とポーズ

比は互いに影響しあっており、特にポーズ比が大きい場合には音声長が短い音声のみ主観的語速が速くなり、それ以外は遅くなることが示された。本実験において、ポーズ比が大きい場合の音声長の変化は、自然性等の変化にも影響している^{5) 6)}ことから、この結果は自然性等の新たな要素が、主観的語速に影響を与えている可能性を示唆している。

3. 言語情報の程度が刺激の速度知覚に及ぼす影響

実験音声は、第2章で使用した変換音声のうち、モーラ長を0.150 sで統制した27音声である。加えて、これら音声と同様の時間構造となるような、4帯域劣化雑音音声 (noise-vocoded speech sounds: NVSS) とノイズ列を作成した。なおノイズ列には、「親密度別単語理解度試験用音声データセット2007⁷⁾」内のスピーチノイズを使用した。作成された81つの実験刺激から、表1のモーラ数9種 × 刺激3種 (音声, NVSS, ノイズ列) の計27刺激で構成されるセット3つを作成し、これを2回繰り返すことで計6セットを作成した。この時、1セット内の27刺激は、元の音声素材がすべて異なるようにした。以上のような操作を男性話者2名、女性話者2名の計4名の話者が発話した音声に対して行い、計24セット (男性話者・女性話者各12セット) を作成した。本実験では、12名の聴取者に対して、男性話者、女性話者1セットずつを使用した。聴取者は、各セットの27刺激に対して、第2章と同様の手順で主観的語速を評価した。

理解性の異なる刺激3種、音声長 (SL) 3段階、ポーズ比 (PR) 3段階の27刺激における、主観的語速の順位 (27刺激中 *y* 位) を示した結果を図2に示す。図2および統計解析の結果から、刺激の種類によって主観的語速に差が生じることが明らかとなり、刺激の理解性が語速知覚に影響を与えることが示唆された。この結果は「不慣れな内容や非母語音声は速く聞こえる⁸⁾」という先行研究を支持している。

4. まとめ

本研究を通して明らかとなった「音響特徴」、「話速知覚 (= 主観的語速)」、「感性印象」の関係を図3に示す。図3のように、様々な音響特徴や感性印象が独立的または相互作用的に話速知覚に影響を及ぼすことが明らかとなった。

文献

- 1) Grosjean *et al.*, J. Exp. Psychol.: Hum. Percept. Perform, 2(4), pp.538-543 (1976).
- 2) 籠宮ら, 音声研究, 12(1), pp.54-62 (2008).
- 3) NTT アドバンステクノロジー株式会社 (1999).
- 4) Motoyoshi, PLoS ONE, 15(5), e0233568

(2020).

- 5) 三浦, 北大路書房 (2010).
- 6) 石崎, 言語文化と日本語教育, 2003年11月増刊特集号, pp.128-146 (2003).
- 7) 天野ら, NII-SRC (2007).
- 8) Bosker *et al.*, Front. Psychol, 8 (2017).

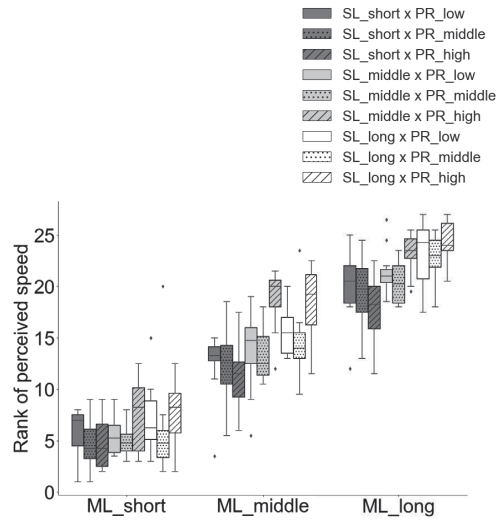


図1. モーラ長ごとの主観的語速の順位の分布

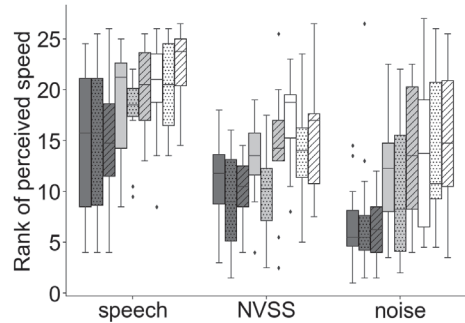


図2. 刺激種類ごとの主観的語速の順位の分布

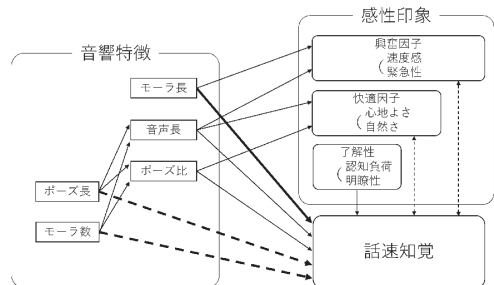


図3. 本研究を通して明らかとなった音響特徴、感性印象、話速知覚の関係

修士学位論文要約（令和6年3月）

音響特徴と空間特性に基づく聴覚知覚体制化に関する基礎的研究

堀田 堯八

指導教員：坂本 修一

A Fundamental Study on Auditory Perceptual Organization
based on Acoustic Features and Spatial characteristics

Takaya Hotta

Supervisor: Shuichi SAKAMOTO

In this study, I examined how humans recognize auditory objects when various acoustic features of the sound sequence, e.g., frequency, sound pressure level, and sound position, are simultaneously changed. The results revealed that two sound sequences are perceived as different auditory objects when the difference in acoustic properties (frequency, sound pressure level, etc.) between the two sound sequences becomes large. This tendency was clearly observed when the sound sequence was presented peripherally.

1. はじめに

周波数や音圧レベルなどの音響特徴¹⁾や空間的位置²⁾は、聴覚の知覚体制化における「音のまとまり」、すなわち聴覚オブジェクトの知覚の手がかりとなる。しかし、これらの手がかりが複数存在する場合に各手がかりがどのように作用し、聴覚オブジェクトが知覚されるのかは検討されてこなかった。加えて、位置が異なる2つの音源を、1つの運動する聴覚オブジェクトとして知覚する現象である聴覚仮現運動に対しても、空間的位置や周波数がどのように作用するのかについても明らかになっていない。

以上のような背景のもと、本研究は、各音響特徴と空間的位置の手がかりが同時に存在する状況での聴覚オブジェクト知覚に関する調査を通じ、聴覚知覚体制化のしくみを明らかにすることを目的とする。

2. 周波数と空間的位置が聴覚オブジェクト知覚に与える影響

聴取者は正常な聴力を有する男女17名であった。

実験は東北大学の無響室にて行った。聴取者の正面に4°ごとに円形にスピーカを設置した。実験では、中心周波数がそれぞれ500, 530, 561, 595, 630, 667, 707, 749 Hz (半音ごと)である8種類の1/3オ

クターバンドノイズを使用した。時間長は50 ms (立ち上がり・立ち下がり各10 msを含む)であり、連続提示時に頭部中心でA特性音圧レベルが65 dBとなるように校正した。この刺激を、図1のように50 msの無音区間と組み合わせ、全時間長3.0 sの音列A.B.B.A.B.B...を作成した。なお、A音の中心周波数は500 Hzに固定し、B音の中心周波数は試行ごとに8種類から一つがランダムに選択された。Ch.PやCh.Qは音列が再生されるスピーカを表す。

各試行において、Ch.Pは0° (front) または-30° (side) とし、Ch.QはCh.Pを中心に左右4°間隔に配置された13個 (Ch.Pを含む) からランダムに一つ選択された。また、Ch.PからはA音、Ch.QからはB音が再生された。これらの2 (Ch.P角度) × 13 (Ch.Q角度) × 8 (B音中心周波数) = 208 試行を1セッションとし、1聴取者あたり8セッション実施した。各パラメータの順番は、セッション内でランダムに設定した。

聴取者は実験刺激を聴取したのち、「1つのまとまりに知覚した」(群化知覚)、「2つのまとまりに知覚した」(分離知覚)のいずれかを回答した。

得られた結果に対して、心理測定関数を推定した。本研究では、聴取者・Ch.P角度・B音中心周波数別に、Ch.Q角度ごとの群化知覚割合に正規分布関数を当てはめた。ここから、1つの聴覚オブジェクトとして群化される空間範囲を推定するために、群化知覚割合が最大となる角度と50%となる角度の差をとった。本研究ではこの値を「許容限」と呼ぶ。横軸をB音の中心周波数、縦軸を許容限としたものを図2に示す。許容限は、front/sideともにB音の中心周波数が増加するごとに減少し、この減少度合いはsideでより大きい傾向が見られた。

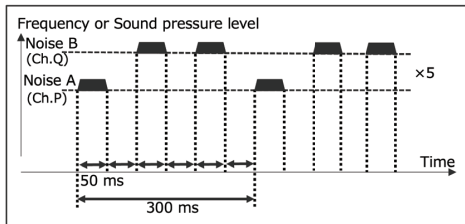


図1. 実験刺激の例。

3. 周波数と空間的位置が聴覚仮現運動の知覚に与える影響

聴取者は正常な聴力を有する男女12名であった。用いた音刺激は2章と同様であったが、本章で作成した音列は A_B_A_B_A_B... (Aは50 msの無音を表す) であった。スピーカの選び方は2章と同様であった。聴取者は実験刺激を聴取したのち、「1つの音源が左右に動いている、または静止しているように知覚した」(運動知覚)、「2つの音源がそれぞれの場所で断続的になっているように知覚した」(非運動知覚)のいずれかを回答した。

得られた結果に対し、2章と同様に許容限を算出した。結果を図3に示す。front/sideともに、B音の中心周波数が増加するごとに許容限は減少した。しかし、2章と異なり、本実験では周波数差が広がることによる分離傾向がfrontとsideであまり変化しなかった。これらのことから、聴覚オブジェクトと聴覚仮現運動の知覚プロセスには共通点と相違点が存在することが示唆された。

4. 音圧レベルと空間的位置が聴覚オブジェクト知覚に与える影響

聴取者は正常な聴力を有する男女11名であった。実験では、A特性音圧レベルが頭部中心で50, 53, 56, 59, 62, 65 dBである6種類の1/3オクターブバンドノイズを使用した。時間長は50 ms (立ち上がり・立ち下がり各10 msを含む)、中心周波数は500 Hzであった。この刺激を用いて、第2章と同様、図1のような音列 A_B_A_B_A_B...を作成した。なお、A音の音圧レベルは50 dBに固定し、B音の音圧レベルは音列ごとに6種類から一つがランダムに選択された。スピーカの選び方は2章と同様であった。聴取者は、実験刺激を聴取したのち、「1つのままとまりに知覚した」(群化知覚)、「2つのままとまりに知覚した」(分離知覚)のいずれかを回答した。

得られた結果に対し、2章と同様に許容限を算出した。結果を図4に示す。許容限は、front/sideともにB音の音圧レベルが増加するごとに減少したが、その減少度合いがfrontよりもsideで大きいという2章と類似した傾向が見られた。

5. 考察およびまとめ

音源間の音響特徴の差は、空間的位置に基づく聴覚オブジェクトの知覚に影響し、その影響は前方よりも側方で相対的に強いことが明らかとなった。これは、側方に行くほど最小弁別角度が増加する³⁾ため、空間的位置の違いによって聴覚オブジェクトを分離するのが困難になる分、「音響特徴の差があるときはそれらを分離する」という手がかりに重み付けを行っているためであると推察される。

文献

- 1) van Noorden, IPO Annual Press Rep.6, pp.9-12, 1971.
- 2) 玉川他, 信学技報, EA2022-39, 2022.
- 3) Dowling, JASA, 44, p.369, 1968.

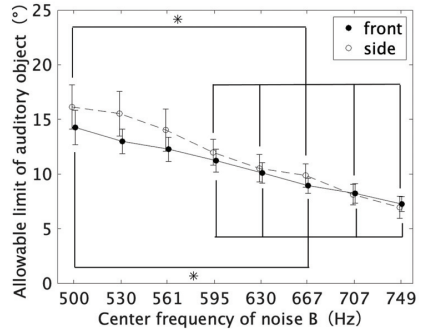


図2. 各中心周波数における聴覚オブジェクトの許容限 ($p < .05$). 誤差棒は標準誤差を表す。

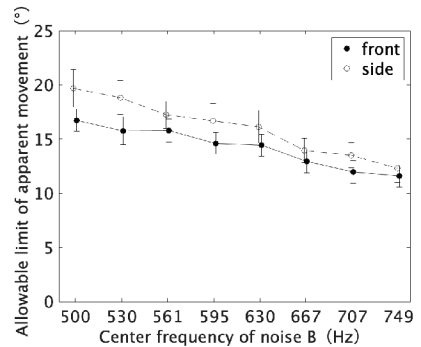


図3. 各中心周波数における聴覚仮現運動の許容限。誤差棒は標準誤差を表す。

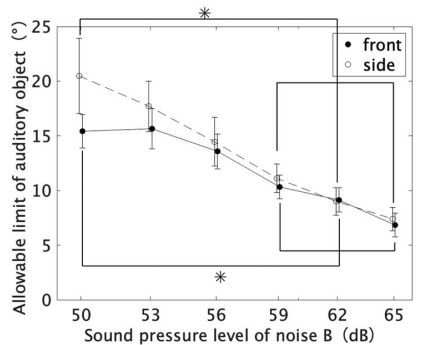


図4. 各音圧レベルにおける聴覚オブジェクトの許容限 ($p < .05$). 誤差棒は標準誤差を表す。

修士学位論文要約（令和6年3月）

深層学習モデルを用いた正中面音像定位手がかりの検討

松岡 広泰

指導教員：坂本 修一

Research on perceptual cues for median plane sound localization using deep learning models

Hiroyasu MATSUOKA

Supervisor: Shuichi SAKAMOTO

In this study, I investigated what are the actual perceptual cues for median plane sound localization using deep neural networks called sound event localization and detection (SELD) models. In the experiments, four types of SELD models were trained using binaural sources convoluted with original head-related transfer functions (HRTFs). After the training, SELD performance was analyzed by inputting different binaural signals generated using simplified HRTFs. The experiment results revealed that around the 4 kHz frequency characteristics play an important role in median plane sound localization.

1. はじめに

ヒトの正中面音像定位には頭部伝達関数（head-related transfer function, HRTF）の持つ周波数特性が手がかりとなることが知られている。この周波数特性のうち巨視的な特徴¹⁾や帯域間相対レベル差²⁾、特徴的なノッチやピーク³⁾が注目されているが、これらの周波数特性の何が音像定位における本質的な知覚手がかりなのかは明らかになっていない。

ところで近年、深層学習による到来方向（direction of arrival, DOA）推定と音イベント検出（sound event detection, SED）を同時に行う SELD（sound event localization and detection）が研究されている。SELD はヒトの音像定位・音色知覚と同様に入力音の周波数特性を用いており、ヒトの音像定位・音色知覚と類似する振る舞いも確認されている^{4) 5)}。

そこで本研究では、日常音に HRTF を畳み込んだバイノーラル音源で学習を行った SELD モデルが獲得した手がかりを調査することで、正中面音像定位の手がかりを音色知覚と関連させて検討した。

2. 実験に使用した SELD モデル

2チャンネル信号の振幅・位相スペクトルのみを入力とし、中間出力などを介さず SELD を行うモデルである、SELDnet⁶⁾、SELD-TCN⁷⁾、Lambda⁸⁾を採用した。加えて、SELDnet の CRNN（Convolutional Recurrent Neural Network）を Franc1⁴⁾らを参考に8層の CNN に置換したモデルを SELD-CNN とした。

3. SELD モデルが学習した音像定位手がかりの検討

本章では、バイノーラル音源から SELD モデルが獲得する正中面音像定位手がかりについて調査した。

学習には、11 クラス × 16 例の音イベント⁹⁾に、頭部周辺 1 m に等密度分布（方位角 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 、仰角 $[-60^\circ, 90^\circ]$ ）した HRTF（高研, SAMRAI）を畳み込んだバイノーラル音源を使用した。この音イベントと DOA が一対一対応のデータを単データと呼ぶ。なお、各 SELD モデルの学習は共通の損失関数と評価指標^{6) 7)}で行われ、学習精度は全て良好だった。

3.1 実験手続き

まず、元の HRTF（original）を用いて 3 種類の HRTF を作成した。それぞれ、ARMA（autoregressive moving average）モデルの零点と極の数を 10 として平滑化した HRTF（ARMA10/10）¹⁾、8 kHz を中心とする 3/4 オクターブ帯域とその前後を平均した HRTF（averaged）²⁾、2 つのノッチとピークを再現した HRTF（N1N2P1P2）である³⁾。

次に、学習に未使用の 11 クラス × 4 例の音イベントに、上半球正中面（30° 間隔、7 方向）の 4 種類の HRTF をそれぞれ畳み込み、計 308 個の単データを持つ 4 種類の実験データを作成した。

そして、作成した 4 種類の実験データに対し、学習済み SELD モデルによる SED と DOA 推定を行った。

3.2 評価指標

DOA ごとに仰角定位誤差（Elevation error）と前後誤判断率（Front-back confusion rate）を計算した。それぞれ、44 個の単データに対する仰角推定値と正解値の差の絶対値を平均した値と、前後判断を誤った単データの割合として定義した。

3.3 学習時の HRTF とのスペクトル差

学習時の HRTF（original）と実験データの HRTF（ARMA10/10, averaged, N1N2P1P2）とのスペク

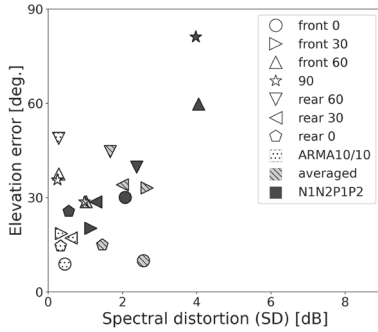


図 1. original との SD と仰角定位誤差の関係

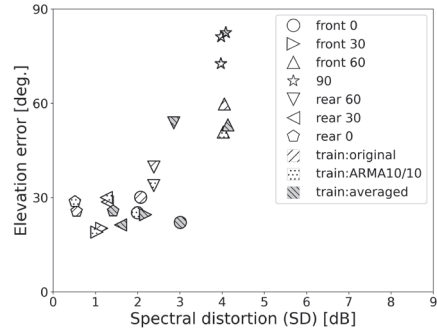


図 3. N1N2P1P2 との SD と仰角定位誤差の関係

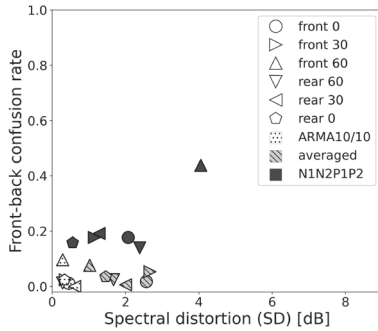


図 2. original との SD と前後誤判断率の関係

トル歪 (Spectral distortion, SD) を実験データのイベント主要帯域 (0~7.0 kHz) において計算した。

3.4 結果

SED は DOA, HRTF の種類に依らず正確だった。一方、仰角定位誤差、前後誤判断率について、各 SELD モデルの平均値と SD の関係は図 1, 図 2 となった。

4. 異なる周波数特性を持つ HRTF を用いて学習した SELD モデルによる DOA 推定の傾向分析

周波数特性の異なる HRTF^{1) 2)} が共通の正中面音像定位手がかりを含んでいた可能性を検討するため、3 章における学習時の HRTF を ARMA10/10, averaged に変更し、各 SELD モデルの学習を行った。それぞれ train:ARMA10/10, train:averaged とし、加えて、3 章の学習済みモデルも train:original として使用した。

4.1 実験手続きと評価指標

3.1 節において N1N2P1P2 で作成した実験データのみに対し、3 種類の学習済みモデルによる SED と DOA 推定を行った。評価指標は 3.2 節と同一である。

4.2 学習時の HRTF とのスペクトル差

学習時の HRTF (original, ARMA10/10, averaged) それぞれと、実験データの HRTF (N1N2P1P2) との SD を 4.2 節と同様に計算した。

4.3 結果

SED は DOA や学習方法に依らず正確だった。一方、仰角定位誤差について、各 SELD モデルの平均値と SD の関係は図 3 となった。学習方法の差異による有意差は、仰角定位では rear 60° でのみ確認され、前後判断では全ての DOA で確認されなかった。

5. 総合考察および結論

SED の結果から、HRTF が変化しても SELD モデルが獲得した SED 手がかりは失われないうえる。

次に、各章の仰角定位誤差と前後誤判断率について、SD に依らず同等かつ良好な精度を示した結果に着目する。例えば、図 1 における ARMA10/10 の front 0° と averaged の front 0° に対応する HRTF では、約 1.5~6 kHz の SD が共通して小さかった。また、図 2 における ARMA10/10 の front 30° と averaged の rear 30° に対応する HRTF では、約 2~4 kHz の SD が共通して小さかった。これは、正中面音像定位手がかりが P1 周辺 (約 2~4 kHz) の周波数特性に存在することを示唆している。加えて、図 3 における ARMA10/10 の front 30° と averaged の front 0° に対応する HRTF では、約 2~3 kHz の SD が共通して小さかった。これは学習時の HRTF に依らず、P1 周辺の周波数特性を正中面音像定位手がかりとして獲得したことを示唆している。

文献

- 1) Asano *et al.*, JASA., 88, 159-168, 1990.
- 2) 曲谷地ら, 聴覚研資, 42(1), 47-52, 2012.
- 3) Iida *et al.*, APAC, 129, 239-247, 2018.
- 4) Francl *et al.*, Nat. Hum. Behav., 6, 111-133, 2022.
- 5) Koumura *et al.*, J. Neurosci., 39(28), 5517-5533, 2019.
- 6) Adavanne *et al.*, IEEE J. Sel. Top. Sign. Process, 13(1), 34-48, 2019.
- 7) Guirguis *et al.*, EUSIPCO 2020.
- 8) Krause *et al.*, DCASE, 2019.
- 9) https://archive.org/details/dccase2016_task2_train_dev

修士学位論文要約（令和6年3月）

正則誘導部分グラフの遷移問題に関する研究

松舘 快

指導教員：伊藤 健洋

A Study on Reconfiguration Problems of Regular Induced Subgraphs

Kai MATSUDATE
Supervisor: Takehiro ITO

We study the problem of determining whether there exists a step-by-step transformation between two given regular induced subgraphs in a graph. This problem generalizes the independent set reconfiguration problem, which is one of the most well-studied problems in the field of combinatorial reconfiguration. The problem is known to be PSPACE-complete, but algorithmic results were unknown. We develop polynomial-time algorithms to solve the problem for some restricted classes of graphs.

1. はじめに

近年、理論計算機科学分野では、組合せ遷移⁴⁾に関する研究が盛んに行われている。組合せ遷移問題は、解空間上での到達可能性を問う問題であり、これまで独立集合やマッチングをはじめ、様々な解空間について研究されてきた。（詳しくは、例えば、サーベイ論文⁶⁾を参照されたい。）

本稿では、正則誘導部分グラフ遷移問題と呼ばれる問題を扱う。問題の定義は次節で与えるが、この遷移問題は Eto ら³⁾によって提唱され、既存の独立集合遷移問題⁵⁾を一般化するものである。独立集合遷移問題は最も盛んに研究されている遷移問題であり、サーベイ論文²⁾も発表されるなど、計算困難性と容易性（アルゴリズム開発）の双方の観点から研究が進められている。一方で、その一般化である正則誘導部分グラフ遷移問題については、Eto ら³⁾による計算困難性の解析はあるものの、計算容易性の結果は得られていなかった。

本研究では、入力グラフの構造に着目することで、正則誘導部分グラフ遷移問題に対するアルゴリズム開発に主として取り組んだ。

2. 正則誘導部分グラフ遷移問題

本稿で扱うグラフ $G = (V, E)$ は、単純無向グラフとする。グラフの全ての頂点の次数が $d (\geq 0)$ であるとき、そのグラフを d 正則グラフという。頂点部分集合 $U \subseteq V$ に対し、 $G[U] := (U, \{xy \in E \mid x, y \in U\})$ を U による G の誘導部分グラフという。 d 正則な誘導部分グラフを d 正則誘導部分グラフという。本稿では、 $G[U]$ が d 正則グラフとなるような頂点部分集合 $U \subseteq V$ を d 正則集合と呼ぶ。したがって、 G

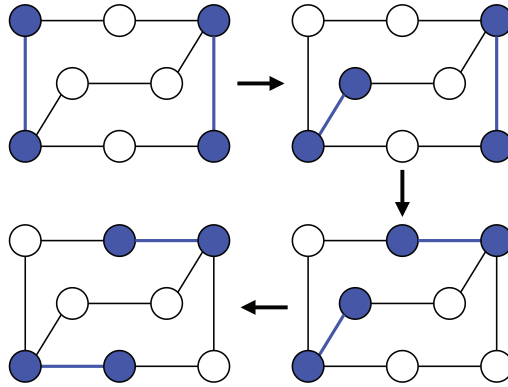


図 1. 1 正則集合の遷移列の例。

の 0 正則集合は、 G の独立集合である。

グラフ G の二つの d 正則集合 U, U' が $|U \setminus U'| = |U' \setminus U| = 1$ を満たすとき、 U と U' は互いに 1 ステップで遷移可能であるといい、 $U \leftrightarrow U'$ と表す。 d 正則集合の列 $S = \langle U^0(=U), U^1, \dots, U^\ell(=U') \rangle$ が存在し、各 $i \in \{0, 1, \dots, \ell-1\}$ について $U^i \leftrightarrow U^{i+1}$ を満たすとき、 U と U' は互いに遷移可能であるといい、 $U \rightsquigarrow U'$ と表す。このとき、 S を U と U' の遷移列といい、 ℓ を S の遷移長と呼ぶ。図 1 は、1 正則集合の遷移列の例であり、その長さは 3 である。

本稿で扱う正則誘導部分グラフ遷移問題は、次のように定義される。

正則誘導部分グラフ遷移問題

入力: グラフ G , 非負整数 d , d 正則集合 U^s, U^t 出力: $U^s \rightsquigarrow U^t$ か? (Yes/No)

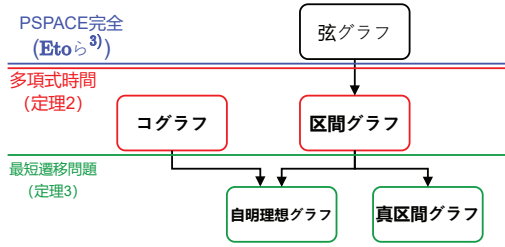


図 2. 既存研究と本研究の結果.

以降では、正則誘導部分グラフ遷移問題を到達性判定問題と呼ぶ。また、グラフ G の d 正則集合 U^s と U^t に遷移列が存在するか判定し、存在するときには最短の遷移長を出力する問題を最短遷移問題と呼ぶ。

Eto ら³⁾によって、到達性判定問題について次の計算困難性が与えられている。ここで、グラフ G が弦グラフであるとは、 G の任意の誘導閉路が長さ 3 であることを意味する。

定理 1 (Eto ら³⁾). 任意の定数 $d (\geq 1)$ に対し、到達性判定問題は、弦グラフにおいて PSPACE 完全である。

定理 1 の PSPACE 完全性より、 $P \neq NP$ の仮定の下では、弦グラフに対して到達性判定問題（ひいては最短遷移問題）を解く多項式時間アルゴリズムは構築できない。また、 $NP \neq PSPACE$ の仮定の下では、最短の遷移長が入力サイズの超多項式となるような問題例も存在することを意味する。

3. 本研究の結果

定理 1 の計算困難性の結果より、本研究では、弦グラフの部分クラスや、弦グラフとは比較不能なグラフクラスに注目することで、多項式時間アルゴリズムの開発を行った。(図 2 も参照されたい。)

まず、区間グラフとコグラフに着目し、到達性判定問題に対して次の定理を示した。なお、スペースの都合上、各グラフの定義は与えられないが、区間グラフは弦グラフの部分クラスである。

定理 2. 到達性判定問題は、区間グラフとコグラフにおいて多項式時間で解ける。

最短遷移問題に対しては、次の定理を与えた。なお、真区間グラフと自明理想グラフは、区間グラフの部分クラスである。

定理 3. 最短遷移問題は、真区間グラフ、自明理想グラフにおいて多項式時間で解ける。

最後に、到達性判定問題の計算困難性について、次の定理を与えた。

定理 4. $d = 1$ の到達性判定問題は、平面的グラフにおいて PSPACE 完全である。

なお、 $d = 0$ のとき、到達性判定問題は独立集合遷移問題⁵⁾と等価であり、平面的グラフに対して PSPACE 完全であることが知られている¹⁾。本研究の定理 4 は、この問題からの多項式時間帰着を構成することによって証明している。

4. まとめ

本研究では、正則誘導部分グラフ遷移問題について、いくつかのグラフクラスに対する多項式時間アルゴリズムを開発した。今後の課題として、区間グラフに対する最短遷移問題が多項式時間で解けるかどうか等が挙げられる。

文献

- 1) Paul S. Bonsma and Luis Cereceda. Finding paths between graph colourings: PSPACE-completeness and superpolynomial distances. *Theoretical Computer Science*, 410(50):5215–5226, 2009.
- 2) Nicolas Bousquet, Amer E. Mouawad, Naomi Nishimura, and Sebastian Siebertz. A survey on the parameterized complexity of the independent set and (connected) dominating set reconfiguration problems. *CoRR*, abs/2204.10526, 2022.
- 3) Hiroshi Eto, Takehiro Ito, Yasuaki Kobayashi, Yota Otachi, and Kunihiko Wasa. Reconfiguration of regular induced subgraphs. In *WALCOM: Algorithms and Computation - 16th International Conference and Workshops, WALCOM 2022, Jember, Indonesia, March 24-26, 2022, Proceedings*, volume 13174 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 35–46. Springer, 2022.
- 4) Takehiro Ito, Erik D. Demaine, Nicholas J. A. Harvey, Christos H. Papadimitriou, Martha Sideri, Ryuhei Uehara, and Yushi Uno. On the complexity of reconfiguration problems. *Theoretical Computer Science*, 412(12–14):1054–1065, 2011.
- 5) Marcin Kamiński, Paul Medvedev, and Martin Milanič. Complexity of independent set reconfigurability problems. *Theoretical Computer Science*, 439:9–15, 2012.
- 6) Naomi Nishimura. Introduction to reconfiguration. *Algorithms*, 11(4):52, 2018.

修士学位論文要約（令和6年3月）

パラメタ化文字列に対する圧縮とパターン照合に関する研究

松野 直也

指導教員：篠原 歩

Compression and Pattern Matching for Parameterized String

Naoya MATSUNO

Supervisor: Ayumi SHINOHARA

We propose new compression methods Lossless Previous Encoding Re-Pair and Combined Re-Pair. The former is a method that combines Previous Encoding used in parameterized pattern matching and Re-Pair known for a famous grammar-based compression. The latter is a method that compresses text by the former method after Re-Pair. In this paper, we show compression results about de Bruijn sequence and some files of the Canterbury corpus. We also propose parameterized pattern matching algorithm for text compressed by our compression method. The time complexity of the algorithm is independent of the size of original text.

1. はじめに

文法圧縮のアルゴリズムで有名なものとして Re-Pair³⁾がある。Re-Pair の特徴として単純なアルゴリズムながらも高い圧縮率であることが挙げられる。また Re-Pair には文脈自由文法によりデータを構造化するという特徴があるため、圧縮後のデータを展開せずにパターンを検索する圧縮パターン照合の研究も行われている。

本研究ではパラメタ化パターン照合で用いられる先行符号化と Re-Pair を組み合わせた可逆先行符号 Re-Pair、および Re-Pair の後に可逆先行符号 Re-Pair を行う Combined Re-Pair という圧縮手法を提案し、De Bruijn Sequence²⁾ という Re-Pair では圧縮できないテキストの圧縮および、通常テキストの圧縮における性能の向上を図った。また可逆先行符号 Re-Pair で圧縮された文字列に対してパラメタ化圧縮パターン照合を行うアルゴリズムを提案する。

2. Re-Pair

Re-Pair は文法圧縮の代表的なアルゴリズムである。圧縮の手順はテキスト内の最頻出のバイグラムを新たな非終端記号に置き換えるという操作をテキスト内に含まれる全てのバイグラムの出現頻度が1になるまで繰り返すというものである。また圧縮後のデータは非終端記号から置き換え前のバイグラムを生成する生成規則と Re-Pair により圧縮されたテキストである。

3. 可逆先行符号化

圧縮に先行符号化を取り入れるにあたって、先行符号化の一部を変更した可逆先行符号化を式 (1) のように定義する。文字列 S の可逆先行符号化は以下の式で表される。なお $S[i]$ はテキスト S の i 番目の文字を指す。

$$\begin{aligned} (S)_{\Pi}[i] = & \\ \begin{cases} i - k & \text{if } \exists k \in \mathbb{N} \text{ s.t. } k = \max\{j \mid S[i] = S[j] \wedge 1 \leq j < i\} \\ S[i] & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

4. 提案圧縮手法

本研究では圧縮対象のテキストを可逆先行符号化し、その後 Re-Pair を行う可逆先行符号 Re-Pair を提案する。本手法で Re-Pair と比べ極端に圧縮できる例として、以下のような De Bruijn Sequence S_k がある。

$$\begin{aligned} \text{アルファベット: } \Pi_k = & \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_{k-1}, s_k\} \\ T_k = & s_k s_k s_{k-1} s_k s_{k-2} s_k \dots s_4 s_k s_3 s_k s_2 s_k s_1 \\ S_1 = & T_1 = s_1 \\ S_k = & T_k S_{k-1} \\ |S_k| = & k^2 \end{aligned}$$

このテキストは Π_k 上の記号からなる長さ 2 の全ての文字列を部分文字列としてもつ文字列となっており、Re-Pair で圧縮できないテキストとなっている。これを可逆先行符号 Re-Pair で圧縮すると圧縮後の文字列長は式 (2)、生成規則数は式 (3) で表すことができ、ともに $O(k \log k)$ になることを示せた。

$$L(k) = \begin{cases} k^2 & (k = 1, 2) \\ k^2 - 2 & (k = 3, 4) \\ k^2 - 2 - \sum_{x=4}^{k-1} \left(\sum_{y=1}^{\lfloor \log_2(x-2) \rfloor} \lfloor \frac{x-2}{2^{y-1}} \rfloor \right) & (k \geq 5) \end{cases} \quad (2)$$

$$R(k) = \begin{cases} 0 & (k = 1, 2) \\ 1 & (k = 3, 4) \\ 1 + \sum_{x=4}^{k-1} \lfloor \log_2(x-2) \rfloor & (k \geq 5) \end{cases} \quad (3)$$

また Re-Pair 以上の性能を保証した圧縮手法として、テキストを Re-Pair で圧縮後に可逆先行符号 Re-Pair で圧縮する Combined Re-Pair を提案する。提案手法で The Canterbury Corpus のテキストを圧縮した結果を表 1 に示す。なお実験には英語テキスト alice29.txt, C 言語のソースファイル field.c, Excel スプレッドシート kennedy.xls を用いた。

表 1. 圧縮結果

圧縮手法 \ テキスト	alice29.txt		fields.c		kennedy.xls	
	Length	Rules	Length	Rules	Length	Rules
無圧縮	152089	0	11150	0	1029744	0
Re-Pair	25099	6732	1490	931	160179	2445
可逆先行符号 Re-Pair	79117	8169	6204	957	24644	6758
Combined Re-Pair	25075	6744	1475	936	26270	5469

Length: 文字列長, Rules: 生成規則数

表 1 より可逆先行符号 Re-Pair は alice29.txt および fields.c において圧縮後の文字列長が Re-Pair より長くなっている。これは可逆先行符号化により同一バイグラムの数が減ってしまったためであると考えられる。一方で kennedy.xls では圧縮後の文字列長が Re-Pair より短くなっており、これは可逆先行符号化により同一バイグラムの数が増えたためであると考えられる。このように可逆先行符号 Re-Pair は Re-Pair より良い圧縮手法とは一概に言えない。

Combined Re-Pair はどのテキストに対しても圧縮後の文字列長が Re-Pair より短くなっている。また kennedy.xls においても一番縮んでいる可逆先行符号 Re-Pair に迫るものとなっている。このことから Combined Re-Pair はより汎用的に使える圧縮手法であると考えられる。

5. パラメタ化圧縮パターン照合

ここでは可逆先行符号 Re-Pair で圧縮されたテキストに対するパラメタ化圧縮パターン照合アルゴリズムを提案する。これは圧縮された文字列においてパターンとパラメタ化一致する全ての部分文字列の末尾の位置を出力するアルゴリズムとなっている。本手法はパラメタ化 KMP オートマトン¹⁾に図 1 のように各非終端記号の遷移を追加したものである。各非終端記号の遷移先の計算は、生成規則の右辺の記号を順に読むことで計算できる。入力に関しては

圧縮前の文字列のアルファベットに含まれる記号が入力されることがあるが、その場合は記号を ∞ とみなして処理する。また出現位置を求めるために、あらかじめ各状態における各入力に対してパターンとパラメタ化一致する部分文字列の相対的な出現位置を計算しておく。圧縮後の文字列長を n , パターン長を m , 非終端記号の数を v , 出力数を r としたとき、このアルゴリズムの時間計算量は前処理が $O(m + v \cdot r) \cdot m$, パターン照合が $O(n + r)$ であり、空間計算量が $O(m + v \cdot r) \cdot m$ である。

生成規則: $\{X \rightarrow 1\ 3, Y \rightarrow 2\ X\}$

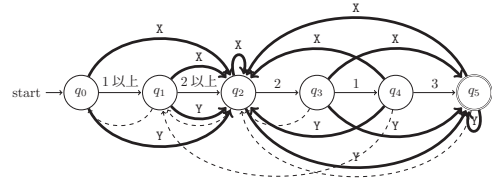


図 1. $\infty \infty 2\ 1\ 3$ に対するパラメタ化 KMP オートマトンに非終端記号の遷移先を追加したもの

6. まとめ

本研究では新たな圧縮手法として可逆先行符号 Re-Pair および Combined Re-Pair を提案した。特に Combined Re-Pair に関しては Re-Pair 以上の性能を保証する手法となっており、多くの場合で圧縮性能の向上が考えられる。また可逆先行符号 Re-Pair で圧縮されたテキストに対するパラメタ化圧縮パターン照合アルゴリズムを提案した。今後の課題としては提案圧縮手法で圧縮されたテキストのビットエンコードおよび、パラメタ化圧縮パターン照合の高速化がある。

文献

- 1) Amihood Amir, Martin Farach, and Shan Muthukrishnan. Alphabet dependence in parameterized matching. *Information Processing Letters*, Vol. 49, No. 3, pp. 111–115, 1994.
- 2) Nicolaas Govert De Bruijn. A combinatorial problem. *Proceedings of the Section of Sciences of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen te Amsterdam*, Vol. 49, No. 7, pp. 758–764, 1946.
- 3) N Jesper Larsson and Alistair Moffat. Off-line dictionary-based compression. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 88, No. 11, pp. 1722–1732, 2000.

修士学位論文要約（令和6年3月）

格子グラフの巡回セールスマン問題と空間充填曲線に関する研究

三浦 拓弥
指導教員：篠原 歩Research on the traveling salesman problem on lattice graphs
and space-filling curvesTakumi Miura
Supervisor: Ayumi SHINOHARA

A Space-Filling Curve (SFC) is defined as a one-to-one mapping of a finite N-dimensional space to a 1-dimensional space and is used to convert image data into 1-dimensional data. In this thesis, we propose a method to compute SFCs over 2-dimensional image data that are more applicable to image compression than conventional SFCs. SFCs obtained by the proposed method trace the image such that the difference in successive pixel values is smaller than conventional SFCs. Due to this, the greater bias of the data and the higher compression ratio can be expected. As a result, the combination of the proposed method with difference coding and Huffman coding outperformed PNG in compression ratio on image datasets. In addition, we examined the combination method of the proposed method with TSP heuristics.

1. はじめに

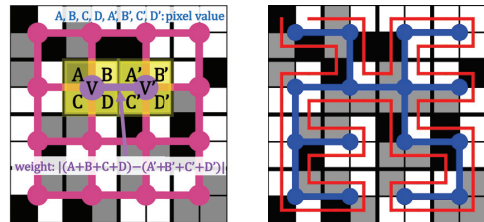
空間充填曲線 (Space-Filling Curve: SFC) は N 次元空間と 1 次元空間との 1 対 1 の写像として定義される¹⁾。SFC は画像処理分野において画像データを 1 次元データへと展開する処理に利用される。Abdollahi ら²⁾ は SFC に基づく可逆画像圧縮において、再帰的な手順によって幾何学的に生成される SFC である Hilbert 曲線³⁾ の有用性を示した。行や列に基づき画像を辿る SFC を用いた場合と Hilbert 曲線を用いた場合の比較を行った結果、エントロピー、圧縮率共に Hilbert 曲線を用いた場合が最良であったことを報告した。また、Watanabe ら⁴⁾ は SFC に基づく非可逆画像圧縮において、最小全域木法を用いた SFC (MST-SFC) の有用性を示した。Hilbert 曲線を用いた場合と MST-SFC を用いた場合の比較を行った結果、MST-SFC を用いた場合の方が SN 比が向上したことを報告した。行や列に基づき画像を辿る SFC や Hilbert 曲線が画像サイズのみ依存して幾何学的に生成されるのに対し、MST-SFC は画像サイズだけでなく画像の構造を考慮しているため、幾何学的に生成される SFC と比較して画素値の差分が小さくなるように画像を辿ることができる。このことにより類似した値をもつデータ要素が多く並ぶため、画像圧縮において圧縮率の向上が期待できる。そこで本研究では SFC の画像圧縮への応用に焦点を当て、画素値の差分が小さくなるように画像を辿る SFC を得る手法を提案する。

2. MST-SFC

MST-SFC⁵⁾ は画像の構造を考慮した全域木の辺に沿って画像を辿ることにより生成される SFC である。まず、画像を 2×2 の画素ブロックの集合へと分割し、各画素ブロックを頂点とする格子グラフを考える。次に、格子グラフの頂点の重みを頂点と対応する画素ブロック内の画素値の和とし、辺の重みを 2 頂点の重みの差分と設定する。例として、図 1a の頂点 $V-V'$ 間の辺の重みは、式 1 で与えられる。

$$|(A+B+C+D)-(A'+B'+C'+D')| \quad (1)$$

ここで、 $A, B, C, D, A', B', C', D'$ は画素値である。続いて、辺の重みが最小となる全域木を最小全域木法により求める。最後に、全域木を壁としてすべての画素を通過するように画像を辿ることにより MST-SFC を生成する。画像サイズが 8×8 の場合の MST-SFC の例を図 1b に示す。青線が全域木、赤線が MST-SFC を表している。

(a) $V-V'$ 間の辺の重み

(b) MST-SFC

図 1: 画像サイズ 8×8 の場合の MST-SFC の例

3. 提案手法

MST-SFC よりもさらに画素値の差分が小さくなるように画像を辿る SFC を得るため、MST-SFC の改善手法を提案する。提案手法の基本的な手順は MST-SFC と同様であり、最小全域木を生成する際に用いる辺の重みの与え方のみ変更した。提案手法では、全域木の辺に対応して SFC 上で結ばれる辺の重み、絶対に結ばれることのない辺の重みをそれぞれ考慮する。例として、図 1a の頂点 $V-V'$ 間の辺の重みを考える。ここで、 $V-V'$ 間の辺を $E_{(V,V')}$ とする。 $E_{(V,V')}$ が全域木の辺を構成する時、SFC 上では $E_{(V,V')}$ に対応して $B-A'$ 間、 $D-C'$ 間が辺で結ばれ、 $B-D$ 間、 $A'-C'$ 間は絶対に辺で結ばれない。他方、 $E_{(V,V')}$ が全域木の辺を構成しない時、SFC 上では $B-D$ 間、 $A'-C'$ 間が辺で結ばれ、 $B-A'$ 間、 $D-C'$ 間は絶対に辺で結ばれない。しかしながら、 $E_{(V,V')}$ と A, C, B', D' に対応関係はない。MST-SFC では、 $A, B, C, D, A', B', C', D'$ すべてを考慮しているが、提案手法では全域木の辺と SFC 上で対応関係のある B, A', D, C' にのみに着目する。また、全域木の辺に対応して SFC 上で結ばれる辺の重み、絶対に結ばれることのない辺の重みをそれぞれ考慮し、辺の重みを式 2 で与える。

$$|B - A'| + |D - C'| - |B - D| - |A' - C'| \quad (2)$$

4. TSP ヒューリスティックスとの組み合わせ

すべての SFC と全域木に対応関係があるわけではないため、提案手法には生成できない SFC があるという問題点が存在する。そこで、提案手法と TSP のヒューリスティックスを組み合わせることによりこの問題点の改善を図ると共に、より画素値の差分が小さくなるように画像を辿る SFC を探索する。本研究では、初期解として与えられたハミルトンパスの辺の繋ぎかえを繰り返し、パスを改善していく局所探索法の一つである k-opt 法⁶⁾を取り上げ、提案手法の SFC を初期解として k-opt 法を適応する。

5. 実験と結果

画像データセットにおいて従来の SFC と提案手法のそれぞれの経路コストを比較した。また、各 SFC と差分符号化、Move To Front 符号化を組み合わせた場合のエントロピーの比較を行った。ここで、経路コスト、エントロピーは小さい方が望ましい。実験の結果、すべての画像において経路コストは提案手法が最小であり、エントロピーは提案手法と差分符号化を組み合わせた場合が最小だった。

また、提案手法の画像圧縮への有用性を示すため、既存の可逆圧縮方式である JPEG2000、PNG との圧縮率の比較を行った。エントロピーが最小だった提案手法と差分符号化に加え、ハフマン符号化を施すことで画像を圧縮した。また、復号のため SFC を

保存した。提案手法は画素値を考慮しており、画像サイズが同じ場合でも SFC が一意に定まることはないため、SFC の保存が復号のために不可欠となる。そこで、提案手法の圧縮後サイズは圧縮画像サイズと SFC の保存に必要なサイズを足し合わせたものとした。ここで、圧縮率は圧縮後サイズと圧縮前サイズとの比率であるため、小さい方が望ましい。実験の結果、1枚の画像を除きすべての画像において提案手法の圧縮率が PNG より小さく、半分以上の画像において提案手法の圧縮率が最小だった。

さらに、画像サイズをリサイズしたデータセットにおいて、提案手法と k-opt を組み合わせた手法の経路コスト、エントロピーの比較を行った。実験の結果、k-opt を組み合わせることにより、提案手法のみの場合よりもさらに経路コスト、エントロピー共に小さくすることができた。しかしながら、k-opt を組み合わせた場合の平均実行時間は 5,000 倍以上増えており、計算時間の課題が残った。

6. まとめ

MST-SFC の改善による新たな SFC の生成手法を提案した。画像データセットにおいて比較実験を行った結果、従来の SFC に比べて経路コスト、エントロピー共により小さくすることができた。また、提案手法を可逆画像圧縮へ応用したところ、1枚の画像を除き全ての画像において PNG に圧縮率で勝ることができ、提案手法の有用性を示すことができた。今後の課題としては、SFC のより効率的な保存手法の模索、k-opt、焼きなまし法等の TSP ヒューリスティックスとの組み合わせによる SFC の更なる改善が挙げられる。

文献

- 1) D. Hilbert, Über die stetige abbildung einer linie auf Flächenstück, *Mathematische Annalen*, 1891, pp.459-460.
- 2) A. Abdollahi et al., Lossless image compression using update algorithms, *SPIRE 2019, LNCS vol.11811*, pp.16-34.
- 3) H. Sagan, *Space-filling curves*, Springer Verlag, 1994.
- 4) Y. Watanabe et al., A study on lossy compression of gray images using adaptive space filling scan, *ITE Winter Annual Convention 1999*, p.44.
- 5) S. Kamata et al., Region-based scanning for image compression, *IEEE ICIP, 2000*, pp.895-898.
- 6) S. Lin et al., An effective heuristic algorithm for the travelling-salesman problem, *Operations Research vol.21, no.2*, 1973, pp.498-516.

修士学位論文要約（令和6年3月）

音像距離知覚要因に着目した聴覚的注意の空間特性に関する基礎的研究

森田 爽
指導教員：坂本修一Basic study on the spatial characteristics of auditory attention
considering perceptual cues of auditory distance.So MORITA
Supervisor: Shuichi SAKAMOTO

Although many researchers have reported the mechanism of auditory attention to distance, it is still unclear how the spatial characteristics of auditory attention modify when the location of attention changes. In this study, I investigated the effects of perceptual cues of auditory distance on the spatial characteristics of auditory attention. To do this, various cues of auditory distance perception, e.g., sound pressure level, binaural signal difference, and binaural parallax, were separately controlled in the experiment, and the effect of each cue was accurately analyzed. The results revealed that when a sound is presented in the peri-personal field, exogenous attention is induced at a certain near distance regardless of the number of perceptual cues of auditory distance.

1. はじめに

人は複数の音の中から聴取したい音のみを聴き取ることが可能であり、その能力には聴覚的注意が関係していることが知られている¹⁾。この聴覚的注意は空間情報にも向けられる²⁾ことが知られており、空間に対する聴覚的注意の形状に関する研究が盛んに行われている。また人は聴覚のみでも音像の距離を知覚できる³⁾ことから、距離方向における聴覚的注意の特性の検討も行われてきた⁴⁾。ただし従来の距離に対する聴覚的注意の検討では、距離の知覚要因の制御が不十分であり^{4) 5)}、各要因が注意に与える影響は明らかではない。

そこで本報告では音像距離知覚要因が聴覚的注意に与える影響を検討すべく、距離知覚の手がかりとして音圧と両耳間時間差およびレベル差（以下両耳間差と記載）、輻輳角を制御し、距離に対する聴覚的注意の空間特性について調査を行った。

2. 行動指標を用いた聴覚的注意の評価

2.1 聴取者

聴取者は2グループ存在し、グループAは正常な聴力を持つ成人男女14名（男性12名、女性2名、平均22.43歳、SD=1.18）であり、グループBは正常な聴力をもつ成人男女12名（男性10名、女性2名、平均23.16歳、SD=1.52）であった。

2.2 実験装置

実験は東北大学電気通信研究所設置の防音シールド室で行われ、実験中の室内は暗室状態であった。スピーカは聴取者の正面を0°として右前方45°に一直列になるように配置され（17.5, 25, 35, 50, 70, 100 cm）、高さは聴取者の耳元の高さに調整された。

2.3 実験刺激

実験刺激には3種類の刺激が用いられた。先行音として帯域が2～12 kHzで刺激長が700 ms（立ち上がり・立下り10 ms含む）である帯域ノイズ、標的音として帯域が0.5～5 kHzで刺激長が100 ms（立ち上がり・立下り10 ms含む）である帯域ノイズ、競合音として刺激長が100 ms（立ち上がり・立下り10 ms含む）であるホワイトノイズを利用した。各刺激の音圧は2.4.1項で設定されている各条件に沿って調整された。

2.4 実験条件

実験では音像距離を知覚する要因と注意位置を制御した。以下にその制御について説明する。

2.4.1 音像距離知覚要因

音像距離知覚要因を制御した条件として、以下に示す音源音圧固定条件、頭部中心音圧固定条件、頭部中心音圧再現条件の3条件を設定した。音源音圧固定条件は、音源の音圧を聴取点から17.5 cm離れたところでA特性音圧レベルを65 dBに固定した。その結果、音圧、両耳間差、輻輳角が変化する条件となる。実験にはグループAが参加した。頭部中心音圧固定条件は音源の位置に関係なく聴取点での音圧をA特性音圧レベルで65 dBになるように調整した。その結果、両耳間差、輻輳角が変化する条件となる。実験にはグループBが参加した。頭部中心音圧再現条件は音源の位置を50 cmに固定したうえで、聴取点における音圧を、音源音圧固定条件での距離の変化と同様になるように調整し、仮想的に音源の距離を変化させた。従って、音圧のみが変化する条件となる。実験にはグループAが参加した。

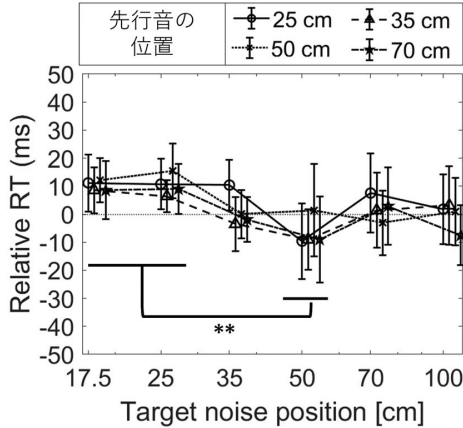


図1. 音源音圧固定条件における反応時間の差分 (** : $p < .01$). 誤差棒は標準誤差を表す

2.4.2 注意位置

注意が向く位置は25, 35, 50, 70 cmのいずれか1つとし、その位置から先行音が提示された。また特定の距離から注意が向きにくい場合として全てのスピーカから先行音（聴取点でA特性音圧レベルで65 dBとなるよう調整）を提示した。

2.5 実験手続き

実験でははじめに先行音が提示された。先行音提示終了から500 ms後に、6つのスピーカのいずれかから標的音、もしくは競合音が提示され、聴取者は標的音が聞こえた時のみ手元のテンキーを押して反応した。注意位置、音像距離知覚要因ごとに各スピーカから標的音が15回、競合音が30回提示された。

2.6 結果と考察

各位置から先行音が提示された場合の反応時間から、全ての位置から先行音が提示された場合の反応時間の差分をとり、注意効果を検討した。結果を図1に示す。図1をみるとわかるように音源音圧固定条件では50 cm付近を中心に、頭部中心音圧固定条件では70 cmを中心に、頭部中心音圧再現条件では35, 70 cmで有意に反応時間が短くなることが確認された。これは、音像距離知覚要因に関わらず外因性注意が一定の場所を中心とした注意を形成することを示唆するものである。ちなみに観測された50 cm付近は、快適な対人距離⁶⁾や頭部における身体近傍空間の境界と類似⁷⁾していることから、聴覚における外因性注意の中心は警戒距離などを表していることが考えられる。

3. 生理指標を用いた聴覚的注意の評価

生理指標として注意の配分量を表すと考えられるP300⁸⁾を利用して聴覚的注意の評価を行った。

実験装置、音像距離知覚要因は2章と同様である。以下に2章の実験と異なる要素について説明する。

3.1 2章との変更点

聴取者は正常な聴力を持つ成人男女9名（男性7名、女性2名、平均22.44歳、SD=2.45）であった。

実験刺激には2種類の刺激が用いられた。標準音として帯域が2～12 kHzで刺激長が100 ms（立ち上がり・立下り10 ms含む）である帯域ノイズ、逸脱音として帯域が0.5～5 kHzで刺激長が100 ms（立ち上がり・立下り10 ms含む）である帯域ノイズを利用した。各刺激の音圧は2章と同様である。

注意位置は50, 100 cmのいずれか1つとし、その位置から標準音が提示された。

実験はオドポール課題と同様のパラダイムが用いられた。刺激間隔は1000 msであり、聴取者は逸脱音が聞こえた回数を数えるタスクを行った。注意位置から標準音が576回、各スピーカから逸脱音が21回ずつ提示された。

3.2 結果と考察

いずれの条件においても注意位置が近い場合にはP300の振幅が増大することが確認された。これは近距離に対して向けられる注意が大きくなることを示唆している。なお本章の実験で注意位置が近い場合として設定した距離は50 cmであり、この距離は2章で反応時間が有意に減少した距離と一致する。このことから、注意の大きさの変化には2章でみられた外因性注意の影響も存在することが考えられる。一方で逸脱音の位置や音像距離知覚要因ではP300振幅に有意差が見られなかった。注意の空間形状が先行研究⁴⁾のように見られなかった理由として、本章で用いた刺激では距離の変化に伴う音響特徴量の変化の知覚が難しいことが考えられる。そのため音刺激の変化が距離の変化に結びつかず、注意の形状が先行研究⁴⁾のように変化しなかったと考えられる。

4. 結論

本研究によって、聴覚的注意は提示される音刺激の距離により向けられる注意の大きさが変化する可能性が示された。また今回検討した音像距離知覚要因では、聴覚的注意の空間形状には大きく変化しなかったことから、今回検討した音圧、両耳間差、輻輳角以外の要因の検討が必要と考えられる。

文献

- 1) Cherry, JASA., **25** (5), 975-979, 1953.
- 2) Arbogast *et al.*, JASA, **108** (4), 1803-1810, 2000.
- 3) 森本他, 音響誌, **34** (6), pp. 356-361, 1978.
- 4) Sakamoto *et al.*, ICA, 2177-2181, 2019.
- 5) 田中他, 音講論集. pp. 865-866, 2023 (秋).
- 6) Donna *et al.*, Perception, **38**, 617-620, 2009.
- 7) Andrea *et al.*, Sci. Rep., **5**, Article18603, 2015.
- 8) 入戸野, 臨床神経生理学, **41** (2), 86-92, 2013.

修士学位論文要約（令和6年3月）

確率的テンポラルグラフ上のパス問題に関する研究

矢部 博丈

指導教員: 周 暁

The Path Problem on Stochastic Graphs

Hirotake YABE

Supervisor: Xiao ZHOU

A sequence of graphs, in which the set of edges that appear at each discrete time step is determined by the given appearance probability for each edge, is called a stochastic temporal graph. This thesis deals with the problem of computing the steps of earliest-arrival paths between two given vertices in a stochastic temporal graph. In this thesis, we present a polynomial-time algorithm for solving this problem for outerplanar graphs. On the other hand, we show that the problem is #P-hard for complete graphs, bipartite graphs, and planar graphs. Furthermore, we show the existence of a fully polynomial-time approximation scheme (FPTAS) for graphs with bounded treewidth.

1. はじめに

インターネットをはじめとした様々な分野で現れる時々刻々と変化するネットワークを動的なネットワークという。その応用範囲の広さから様々な研究が行われている³⁾。グラフの利点を生かして動的なネットワークをモデル化しようと、数多くのグラフによる定式化が考えられており、そのうちの1つがテンポラルグラフである²⁾。テンポラルグラフでは離散的な時間ステップごとに出現する辺集合が与えられる形で、出現する辺の変化が表現される。

辺集合が1つに定まらないときなど辺集合を予め与えられない場合でも確率に着目することでテンポラルグラフを考えることができる。各ステップでの辺の出現を辺ごとの出現確率によって決めるテンポラルグラフを**確率的テンポラルグラフ**という。

確率的テンポラルグラフ上で始点 s から目的の頂点 t に到着するまでのステップ数を期待値として求める問題は確率的テンポラルグラフ上のパス問題として定義できる。本論文では確率的テンポラルグラフ上のパス問題の1つである**最小到着問題**を扱う。これは確率的テンポラルグラフ上の各 st パスの t への到着ステップのうち最小のものを期待値として求める問題である。

先行研究¹⁾では、最小到着問題がパスにおいて多項式時間で解けること、一般グラフで#P困難であることが示されている。また、端子が始点 s と終点 t となる2端子直並列グラフにおいて、 c を定数として全ての辺の出現確率が $1/n^c$ 以上であるときに

FPTAS と呼ばれる近似アルゴリズムが存在することも示されている。

2. 問題の定義

グラフ $G = (V, E)$ に対して、 $\mathcal{G} = \{(V, E_\tau) : \tau \in \mathbb{N}, E_\tau \subseteq E\}$ で表される列を G 上の**テンポラルグラフ**という。ここで、各辺が出現するかしないかが決まる基本単位 τ を**ステップ**と呼ぶ。また、**テンポラルグラフ** G 上で始点 s から終点 t に到着するまでの頂点とその頂点を初めて訪問するステップの組の列を**テンポラルグラフ** G 上の st **パス**と呼ぶ。

各辺の出現確率の集合 $\{p_1, p_2, \dots, p_{|E|}\}$ が与えられているとする。ステップ τ での $e \in E$ の出現状況を表す確率変数を $Y_{e,\tau}$ とし、 p_e の確率で1の値を、 $1-p_e$ の確率で0の値を取るとする。 $E_\tau = \{e \in E, Y_{e,\tau} = 1\}$ によって決まるテンポラルグラフを**確率的テンポラルグラフ**と呼ぶ。標本空間 Ω は確率的テンポラルグラフの集合となる。**確率的テンポラルグラフ上の st パス**は確率的テンポラルグラフが1つ定まったときにテンポラルグラフ上の st パスと同様に定義される。

$\mathcal{P}(G)$ を G 上の st パスの集合としたとき、**最小到着ステップ**は $\mathcal{P}(G)$ の各 t への到着ステップの最小値となる。 G 上の確率的テンポラルグラフでの最小到着ステップは確率変数 $X_{G,s,t} : \Omega \rightarrow \mathbb{N}$ で表される。ただし Ω は G 上の確率的テンポラルグラフの集合である。最小到着問題では $X_{G,s,t}$ の期待値を出力する。

3. 本論文の結果

本論文では、外平面グラフにおける最小到着問題に対して多項式時間アルゴリズムが存在すること、完全グラフや二部グラフ、平面グラフにおける最小到着問題が#P 困難であることを示した。また、木幅定数グラフにおける最小到着問題に FPTAS が存在することを示した。

まず、外平面グラフに対し以下の定理を示した。

定理 1 頂点数が n の外平面グラフにおいて $O(n^4)$ 時間で最小到着問題を解くアルゴリズムが存在する。

まず、極大 2 連結外平面グラフにおいてハミルトン閉路に沿って s から t まで、まだ通っていない頂点をたどって t から s までの 2 ルート分の番号付けを行う。そして、本アルゴリズムでは 2 ルートそれぞれについてどの番号の頂点まで進んだかを管理して期待値を求めていく。

また、完全グラフに対して以下の定理を示した。

定理 2 完全グラフにおける最小到着問題は#P 困難である。

これは先行研究の一般グラフにおける最小到着問題が#P 困難であることの証明に使われたグラフ¹⁾ に対して、完全グラフとなるように出現確率 0 の辺を加えることで示すことができる。

さらに、二部グラフに対して以下の定理を示した。

定理 3 二部グラフにおける最小到着問題は#P 困難である。

有向で閉路を持たず、始点 s と終点 t が外面に現れる平面グラフを st 平面 DAG と呼ぶことにする。 st 平面 DAG に関して以下の定理を示した。

定理 4 次数が高々 3 の st 平面 DAG における最小到着問題は#P 困難である。

これは#P 完全であると知られている st 平面 DAG での st 接続信頼性問題⁴⁾ からの帰着によって示される。

さらに、有向平面グラフにおける結果を利用することで無向平面グラフに関して以下の定理が示される。

定理 5 次数が高々 3 の無向平面グラフにおける最小到着問題は#P 困難である。

最後に、木幅定数グラフに対して以下の定理を示した。

定理 6 頂点数が n 、木幅が tw (定数) であるグラフで、すべての辺 e について $p_e \geq 1/n^c$ (c は定数) を満たすとき、最小到着問題に対する FPTAS が存在し、計算時間が $O(4^{tw+\ln tw+2} \cdot n(n^{c+1} \ln \frac{n}{\epsilon})^{tw+3})$ となる。

これは先行研究の s と t を端子とするような 2 端子直並列グラフ上の最小到着問題に対する FPTAS を拡張したものである。

4. まとめ

本論文では最小到着問題で与えられるグラフの構造を制限するという観点から計算複雑性の解析を行った。また、木幅が定数となるグラフでの FPTAS を示した。

今後の課題として、各種パラメータに関する計算複雑性、辺の出現確率が全て同一であるとき、またはより一般的な確率分布での計算複雑性の解析などが挙げられる。

文献

- 1) Eleni C. Akrida, George B. Mertzios, Sotiris Nikolettseas, Christoforos Raptopoulos, Paul G. Spirakis, and Viktor Zamaraev. How fast can we reach a target vertex in stochastic temporal graphs? *Journal of Computer and System Sciences*, 114:65–83, 2020.
- 2) Michail Othon. *An introduction to temporal graphs: an algorithmic perspective*, pages 308–343. Springer International Publishing, 2015.
- 3) Nicola Santoro. Computing in time-varying networks. In *Proceedings of Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems, 13th International Symposium, (SSS 2011)*, volume 6976 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 4–4, 2011.
- 4) Provan J. Scott. The complexity of reliability computations in planar and acyclic graphs. *SIAM Journal on Computing*, 15(3):694–702, 1986.

修士学位論文要約（令和6年3月）

ニューロンが時間履歴項を持つニューラルネットワークリザーバーの 時系列予測に関する研究

石井 豪

指導教員：堀尾 喜彦

Time Series Prediction in Neural Network Reservoir Consists of Neurons with Local Temporal History

Go ISHII

Supervisor: Yoshihiko HORIO

This study investigates the effect of neuronal temporal history terms on time-series prediction performance of a reservoir neural network. We extend the allowable ranges of the local temporal history terms of the original chaotic neural network reservoir (CNNR). A one-step prediction task of the logistic map is performed for different values of a and b , where a and b are temporal history terms of the internal state and output of the neuron, respectively. The result shows that the extended parameter range is effective for time-series prediction. The effect of a and b is further investigated using memory capacity (MC) characteristics. In addition, the relationship between MC characteristics and time-series prediction performance is discussed.

1. 序論

ニューラルネットワークリザーバー¹⁾の時系列処理能力を向上させるためには、入力時系列に合わせてリザーバー層のダイナミクスを調整する必要がある。そのような手法の一つとして、リザーバー層に種々のニューロンモデルを使用することが考えられる。

リザーバー層に時間履歴項を持つニューロンモデルを使用したモデルとして、カオスニューラルネットワークリザーバー(CNNR)²⁾が提案されている。先行研究では、カオスニューロンモデル³⁾の内部状態の時間履歴項によって CNNR の音声時系列やカオス時系列の認識性能が向上することが示されている⁴⁾⁵⁾。一方で、時系列予測については詳細な評価がなされていない。

本研究は、時系列予測においてニューロンの持つ時間履歴項の影響を評価することを目的とする。

2. ニューロンが時間履歴項を持つニューラルネットワークリザーバー

ニューラルネットワークリザーバーは L 個の外部入力からなる入力層、 N 個のニューロンからなるリザーバー層、 M 個のニューロンからなる出力層の3層から構成される。 l 番目の外部入力からリザーバー層の i 番目のニューロンへの結合重み W_{il}^{in} 、およびリザーバー層の j 番目のニューロンから i 番目のニューロンへの結合重み W_{ij} はランダムな値に固定される。

時間履歴項を持つニューロンモデルの状態更新式は以下で与えられる。

$$x_i(t+1) = ax_i(t) + by_i(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^N W_{ij} y_j(t) + \sum_{l=1}^L W_{il}^{in} u_l(t+1) + \theta, \quad (1)$$

$$y_i(t+1) = \tanh(x_i(t+1)). \quad (2)$$

ここで、 $x_i(t)$ と $y_i(t)$ は、それぞれ、離散時刻 t におけるリザーバー層の i 番目のニューロンの内部状態と出力、 $u_l(t)$ は l 番目の外部入力、 θ は外部バイアスである。 a と b は、それぞれ、内部状態と出力の時間履歴項である。CNNRで用いられていた一般的なカオスニューロンモデル³⁾においては、 $a = k$ 、 $b = -a$ と表記され、これらの許容範囲は $0 \leq a < 1$ 、 $b \leq 0$ と制限されている。また、 $a = b = 0$ のとき、式(1)–(2)は通常のエコーステートネットワーク¹⁾の状態更新式と等価である。

3. 時間履歴項値の許容範囲を拡張したモデル

本研究では内部状態と出力の時間履歴項値の許容範囲を、共に正の値から負の値まで拡張する⁶⁾。以下では、時間履歴項の許容範囲を $-1 < a < 1$ 、 $-1 \leq b \leq 1$ とする。

拡張した時間履歴項の許容範囲が時系列予測性能に与える影響を調査するため、ロジスティック写像の1ステップ予測タスクを行った。リザーバー層のニューロン数は $N = 100$ 、外部バイアスは $\theta = 1$ と設定した。 a と b の値を変化させて正規化平方平均二乗誤差(NRMSE)を計算した。図1に a と b の値に対するNRMSEの常用対数を取った値をカラーマップとして示す。図中の白い破線の枠は従来法におけるパラメータの許容範囲を、赤い実線の枠はNRMSEが最小

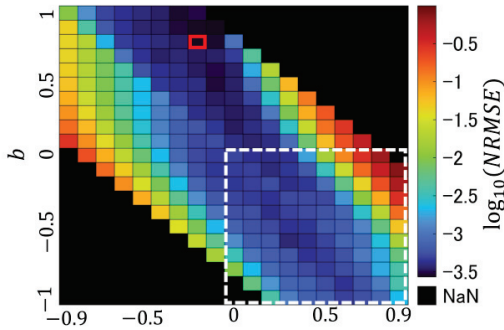


図1 ロジスティック写像の1ステップ予測タスクにおける、 a と b の値に対するNRMSEの値

値を示した a と b の値を表す。図1より、拡張した時間履歴項の許容範囲がカオス時系列予測に有効であることがわかる。

4. Memory capacity 特性の評価

ニューラルネットワークリザバーの短期記憶を評価する指標として、Memory capacity (MC)が提案されている⁷⁾。本章ではMCを用いて時間履歴項の影響を評価する。

a と b の値を変化させてMCの特性を測定した。リザバー層のニューロン数は $N = 100$ 、外部バイアスは $\theta = 0$ と設定した。図2に遅れ τ に対する $MC(\tau)$ の変化の一例を示す。パラメータセット1は $a = -0.9$ 、 $b = 0.9$ 、セット2は $a = b = 0$ のときの結果である。両者のMCの総和が等しくなるように、リザバー層内の結合重み行列のスペクトル半径を設定した。

図2より、セット1はセット2と比較して、 τ を大きくしても $MC(\tau)$ が0に収束する速度が遅く、long tailのような特性を有していることがわかる。これは、時間履歴項 a と b の効果であると考えられる。

さらに、 $MC(\tau)$ の持つ long tail 特性と時系列予測性能の関係を調査するため、パラメータセット1と2で時系列予測タスクを行った。時系列には周期 P のランダム周期時系列を用いた。

周期 P を23, 37, 59と変化させて、1ステップフリーラン予測を行ったところ、セット1はセット2と比較して、周期 $P = 23$ のときにおよそ4倍、 $P = 37$ のときに3倍、 $P = 59$ のときに2倍近く予測性能が高くなるという結果が得られた。このことから、 $MC(\tau)$ が持つ long tail 特性はランダム周期時系列の予測に有効であると考えられる。

5. 結論

ニューロンが時間履歴項を持つニューラルネットワークリザバーを用いて時系列予測を行い、時間履歴

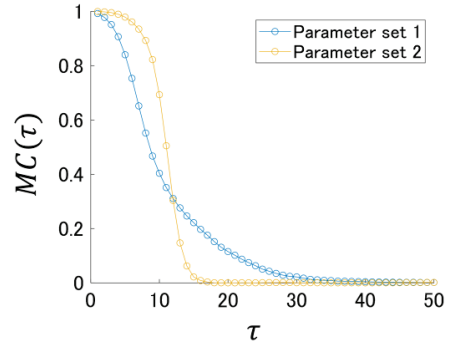


図2 2種類のパラメータセットにおける、遅れ τ に対する $MC(\tau)$ の変化

項が時系列予測性能に与える影響を調査した。CNNRを基に時間履歴項の許容範囲を拡張したモデルを提案し、拡張した範囲内の時間履歴項値においてカオス時系列の予測性能が向上することを示した。さらに、時間履歴項によって $MC(\tau)$ が long tail 特性を示すことを明らかにし、その特性がランダム周期時系列予測に有効であることを示した。

謝辞

本研究はJSPS科研費20H00596、21K18303および東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究の助成を受けたものです。

文献

- 1) H. Jaeger, Technical Report GMD, Report 148, German National Research Center for Information Technology, (2001).
- 2) Y. Horio, in Proc. of IJCNN, vol. 18, no. 4, pp. 17-22, (2019).
- 3) K. Aihara, T. Tanabe, and M. Tomoda, Phys. Lett. A, vol. 144, issues 6-7, pp. 333-340, (1990).
- 4) 辻孟, 堀尾喜彦, 電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会講演論文集, p. NLS-8, (2022).
- 5) 福田佳祐, 東北大学大学院情報科学研究科修士論文, (2021).
- 6) 石井豪, 堀尾喜彦, 織間健守, 辻孟, 日本神経回路学会第31回全国大会ポスター発表アブストラクト集, (2023).
- 7) H. Jaeger, Technical Report GMD, Report 152, German National Research Center for Information Technology, (2002).

修士学位論文要約（令和6年3月）

量子アニーリングを用いたキーボード配列の最適化

尾形凜太郎

指導教員：田中和之、 学位論文指導教員：大関真之、奥山真佳

Keyboard Layout Optimization by Quantum Annealing Rintaro OGATA

Supervisor: Kazuyuki TANAKA,
Research Advisor: Masayuki OHZEKI, Manaka OKUYAMA

QWERTY keyboard layout is widely used Whereas it relatively provokes hand and finger fatigue and typographical errors. In this paper, we attempted to solve the optimization problem of the keys and characters by Simulated Annealing and Simulated Quantum Annealing. Using Japanese, English and programming text as training data, we formulated the objective function by quantifying the cost of hands and fingers fatigue in typing. we show that Simulated Annealing and Simulated Quantum Annealing are able to find the optimal keyboard layouts which are less energy than existing layouts. In addition, we discover that energies found by Simulated Annealing and Simulated Quantum Annealing can be reduced by replacing the combination of the key and characters.

1. はじめに

多くのコンピュータで利用されているキーボード配列は、19世紀後期に提案されたQWERTY配列である。タイプライターの入力インターフェースとして登場した本配列は、タイプライター自体の物理的事情が考慮されてキーボード配列が作られたことにより、しばしば入力の手づらさが散見される¹⁾。本論文では、既存のQWERTY配列よりも入力時における手や指への負荷が少ないような新たなキーボード配列を発見し、QWERTY配列が持つ課題を克服することを目的とした。また、多様な利用者を想定し、キーボード配列に汎用性能を残す目的から、組み合わせ最適化手法として量子モンテカルロ法およびシミュレーテッドアニーリングを使用した。

2. 量子アニーリング

量子アニーリング(Quantum Annealing: QA)とは、組み合わせ最適化問題を解くメタヒューリスティックな解法であり、門脇、西森らによって提案された²⁾。二値変数でスピンの向きが表現されたイジングモデルにおいて、スピンの量子ゆらぎを導入することで、古典計算機とは異なる動作を実現しながら、そのエネルギーが最小となるような変数の状態を探索するものである。実世界にある組み合わせ最適化問題の多くは、イジングモデルの基底状態を探索する問題に変換、帰着できることが知られており³⁾、本研究でも最適化問題を帰着させた。また、QAにおける量子ゆらぎによって熱ゆらぎを導入し、古典的な遷移確率に基づいて基底

状態を探索手法をシミュレーテッドアニーリング⁴⁾(Simulated Annealing: SA)、QAにおける横磁場を虚時間方向の相互作用と読み替えて、古典計算機上で再現する方法を量子モンテカルロ法(Simulated Quantum Annealing: SQA)という。

3. 最適化

本研究では、QWERTY配列においてアルファベットと4つの記号「,」「.」「/」「;」が割り当てられている部分のみを取り出した、縦3行・横10列の30キーに対して、その文字を割り当てることを行う。その場合に、入力の手づらさをコストとして計上し、そのコストが最小となるような「キー」と「文字」の組み合わせを発見する。

キー入力におけるコストは、単発入力のコスト(単にそのキー入力がしやすいかどうか)と、連続入力のコスト(直前のキー入力に対して、その次のキー入力がしやすいかどうか)の2つに分けた。単発入力については、指の移動が大きい場合や、小指による入力に大きなコストをかける。連続入力については、入際に指がもつれたり、同じ指を連続で使用する場合などに大きなコストをかける。

以上のコストと、最適化における制約条件(1つのキーに2文字が割り当てられたり、2つのキーに同じ文字が割り当てられるなどの場合を排除する条件)を加えて、本実験での目的関数を定めた。学習データとして5種類のテキスト(日本語の小説1万字、日本語の論文1万字、英文の小説1万字、英文の論文1万字、さらにプログラミングのコード1万字)の合計5

万字を使用した。

4. 結果

実験は OpenJij が提供する SASampler および SQASampler を使用して、SA と SQA で行なった。結果の検証には、5 種類の学習データそれぞれも利用した。また、既存配列として、英文入力に重点を置いた DVORAK 配列、QWERTY との差異を減らすことに重点をおいた COLEMAK 配列、日本語入力に重点をおいた EUCALYN 配列を比較に使用した。

SA および SQA で得られた配列における目的関数 (エネルギー) の値を、他の既存配列と比較した。

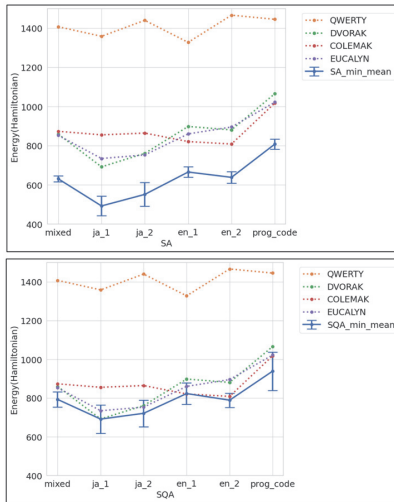


図 1 SA および SQA で得られたキーボード配列のエネルギーと、既存配列のエネルギーとの比較。得られたキーボード配列の方がエネルギーが小さい。

また、SA および SQA で得られたキーボード配列において、キーボード上の 2 文字を入れ替えた時のエネルギーを比較し、すべての組み合わせで実施しながら貪欲にエネルギーを下げ切ることを行なった。その結果、SQA および SA どちらも、エネルギーを 400 近くまで下げ切ることができた。

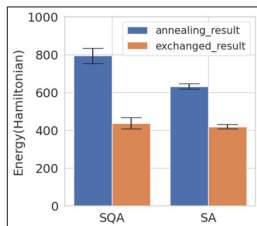


図 2 SA および SQA でエネルギーを 400 近くまで下げ切ることができた。

加えて、エネルギーを下げ切った時のキーボード配列を示す。SA と SQA とどちらの場合でも、結果的にほとんど同じキーボード配列が得られた。また、どちらの配列においても、同じ指の連続使用回数や同じ手の連続使用回数において、他の既存配列よりも良い結果を得ることができた。

/	e	v	x	;	q	b	z	r	j
y	o	i	a	f	k	t	s	n	h
,	.	p	u	c	g	d	w	m	l
小指	薬指	中指	人差し指	人差し指	中指	薬指	小指		
-----左手-----					-----右手-----				

/	e	.	q	;	v	b	z	r	j
y	o	i	a	f	k	t	s	n	h
,	x	p	u	c	d	g	w	m	l
小指	薬指	中指	人差し指	人差し指	中指	薬指	小指		
-----左手-----					-----右手-----				

図 3 SA で得られた配列 (上) と、SQA で得られた配列 (下)。

5. まとめ

本研究では、物理的な入力の負担をコストとして定量化し、シミュレーテッドアニーリングおよび量子モンテカルロ法を用いることで、既存配列よりも入力コストの小さいキーボード配列を発見することができた。また、SA および SQA で得られた組み合わせから、組の入れ替えを実施することでエネルギーを下げ切ることができた。

文献

- 1) K. Yasuoka and M. Yasuoka, On the Prehistory of QWERTY, ZINBUN 42 (2011).
- 2) T. Kadowaki and H. Nishimori, Quantum annealing in the transverse Ising model, Physical Review E 58, 5355 (1998).
- 3) A. Lucas, Ising formulations of many NP problems, Frontiers in Physics 2, 5 (2014).
- 4) S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, Optimization by Simulated Annealing, Science 220, 671 (1983).

修士学位論文要約（令和6年3月）

耐災害無線 LAN ローミングシステムのための安全なローカル認証方式に関する研究

菅原 綾人

指導教員：菅沼 拓夫 学位論文指導教員：後藤 英昭

Secure Local Authentication Method for Disaster-tolerant Wireless LAN Roaming Systems

Ayato SUGAHARA

Supervisor: Takuo SUGANUMA, Research Advisor: Hideaki Goto

Wireless LAN (WLAN) roaming systems enable mutual use of WLAN facilities among various institutions such as universities, conference centers, and event venues. However, in the event of natural disasters, when the authentication path on the internet is disrupted, user authentication becomes challenging. Local authentication, which completes the authentication process using EAP-TLS at the nearest access point (AP), has been proposed. However, this approach requires storing private keys on all APs at all times, which poses a risk of key leakage. In this study, I propose a routing method to reduce the number of APs storing the private key, in order to mitigate the security threat by the key leakage.

1. はじめに

IEEE802.1X 認証による安全性と、所属機関で発行された1つのアカウントで訪問先機関の無線 LAN へ接続できる利便性から、eduroam や OpenRoaming などの無線 LAN ローミングシステムが普及している。このシステムは、訪問先機関からインターネット上に構築されたローミング基盤を介して、所属機関へアカウントを転送することで利用者認証を行うが、自然災害により認証経路が途絶した場合、認証が困難となる問題がある。先行研究では、EAP-TLS を用いたローカル認証¹⁾が提案されており、各機関に設置されている AP (アクセスポイント) に RADIUS サーバとしての機能を付与することで、インターネットを介さずとも最寄りの AP で認証プロセスを完了させることができる。しかし、ローカル認証は、全 AP が認証処理を行うために秘密鍵を常時格納する必要があり、AP の盗難により秘密鍵が漏洩した場合、偽 AP の設置や通信内容の盗聴・改ざんの危険性がある。そこで本研究では、秘密鍵を格納する AP を限定し、その AP までの認証リクエストのルーティング手法を2つ提案し、ローカル認証の秘密鍵漏洩リスクの軽減を試みる。

2. ラウンドロビン方式によるルーティング(提案 1)

図1にラウンドロビン方式によるルーティング手法の概要を示す。秘密鍵を持ち認証機能を有する AP を「認証 AP」、単に認証 AP への転送機能のみを持つ AP を「非認証 AP」と定義する。非認証 AP は、認証リクエストを認証 AP まで転送することで認証を行う。認証方式は EAP-TLS である。接続が動的に変化する

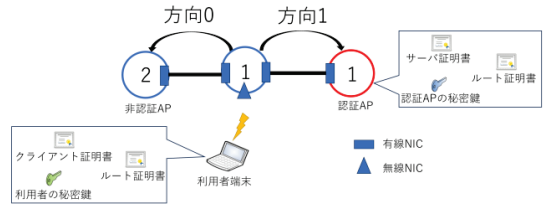


図1 ラウンドロビン方式によるルーティング

無線メッシュネットワークなどを利用する場合、非認証 AP は、LAN 内のどこに認証 AP が存在しているのか事前に把握することが困難である。そのため、認証 AP の探索を行う必要がある。探索は、認証リクエストをラウンドロビン方式で各転送先に順番に転送することで行う。認証 AP が発見されると、非認証 AP は認証 AP までの転送先をキャッシュし、確立された認証経路に沿って後続の認証リクエストをルーティングする。一度の探索で発見できない場合は、利用者端末の認証リトライ機能で再度探索を行う。転送先の変更及び認証経路のキャッシュは、非認証 AP 内部の SQLite データベースで行う。また、探索時に認証リクエストのループが生じる前に、RADIUS パケットの Proxy-State 属性を用いることでループを回避する仕組みを組み込んだ。図1の AP の配置で動作検証を行う。青丸が非認証 AP を、赤丸が認証 AP を表している。利用者端末からの認証リクエストを非認証 AP1 に送信し、方向0、方向1の順に転送することで検証


```
sqlite> select * from transfer;
id      auth_ap  ptr
-----
1        0
sqlite> select * from transfer;
id      auth_ap  ptr
-----
1        1
sqlite> select * from transfer;
id      auth_ap  ptr
-----
1        proxy1  1
```

初期状態

初回の認証試行後

2回目の認証試行後

認証APのキャッシュを確認

図 2 提案 1 のデータベースの変化

する。非認証 API のデータベースの変化の様子を図 2 に示す。id(主キー)、auth_ap(キャッシュされた転送先)、ptr(転送先の選定)で構成される。ptr の値が 0 の場合、方向 0 に転送する。計 3 回データベースを出力した。初回の認証試行は、方向 0 に転送されるためにリジェクトされた。その時 ptr の値が 0 から 1 に変化したことから、認証トライにより転送先の変更が正常に行われていることを確認した。認証トライによる 2 回目の認証試行は、認証 AP1 に転送された。その時、データベースの auth_ap に方向 1 への転送先がキャッシュされていることを確認した。検証結果より、ラウンドロビン方式のルーティング手法を用いることにより、一部の AP のみに秘密鍵を格納するローカル認証が可能であると考ええる。

3. 遅延時間を考慮したルーティング(提案 2)

2 つ目の手法として遅延時間を考慮したルーティング手法を提案する。図 3 にその概要を示す。遅延時間とは、非認証 AP が認証 AP に向けて転送を行い、認証成功メッセージを受信するまでの時間のことである。作業員が非認証 AP を設置し、探索用の認証要求を用いて、予め認証 AP の探索及び遅延時間の計測を行い、その中で最小の遅延時間の経路をキャッシュする。非正規アカウントを用いた探索用の認証要求で認証 AP を探索を行い、トポロジの変化に迅速に対応するため、定期的に探索を行う。非認証 AP は SQLite データベースを内部に有しており、遅延時間を保持するテーブルと認証経路をキャッシュするテーブルの 2 つを使用する。キャッシュ先で認証が失敗した場合、次に遅延時間が小さい経路へとキャッシュ先の変更を行い、継続的なルーティングを可能にする。

図 3 の AP の配置で動作検証を行う。非認証 API を起点に探索用の認証要求で方向 0、方向 1 の順に転送を行い、認証 AP の探索及び遅延時間の計測を行う。図 4 に 2 つのデータベースの変化の様子を示す。2 つのテーブルを 1 回ずつ出力した。方向 0 の遅延時間が 136 ms、方向 1 が 106 ms と計測で

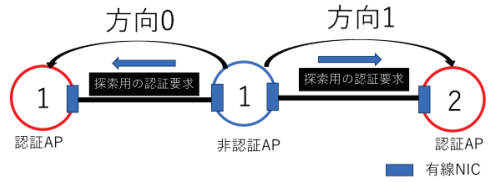


図 3 遅延時間を考慮したルーティング

```
sqlite> select * from delay_proxytime ;
id      proxy_number  time  current_proxy  rank
-----
1        0             136  0
2        1             106  0
sqlite> select * from forward;
id      auth_ap
-----
1        proxy1
```

最も遅延が小さいプロキシ先をキャッシュ

図 4 最小の遅延時間の経路をキャッシュ

```
sqlite> select * from delay_proxytime ;
id      proxy_number  time  current_proxy  rank
-----
1        0             136  0
2        1             106  0
sqlite> select * from forward;
id      auth_ap
-----
1        proxy0
```

キャッシュ先の変更を確認

図 5 キャッシュ先の変化

き、auth_ap フィールドに、方向 1 の認証経路がキャッシュされていることを確認した。

次に、キャッシュ先が自動的に変更されるかを検証するため、現在キャッシュされている認証 API を停止させて意図的にリジェクトを発生させる。その時の 2 つのデータベースキャッシュ先の変化を図 5 に示す。データベースの auth_ap フィールドより、遅延時間が次に小さいキャッシュ先へ変更されていることを確認できた。これらの結果より、最小の遅延時間でルーティングできることを示すことができ、効率的なローカル認証が行えると考ええる。

4. まとめ

ローカル認証の秘密鍵漏洩リスクを軽減するためにルーティング手法を 2 つ提案した。動作検証実験より、その有効性を確認することができた。今後はシミュレーションを用いることで、大規模環境での挙動を検証する。

文献

1) S. Kinoshita et al., "Fault-Tolerant Wireless LAN Roaming System Using Client Certificates," in Proc. IEEE 37th COMPSAC2013, Kyoto, Japan, 2013, pp. 822-823.

修士学位論文要約（令和6年3月）

時空間コンテキスト学習・記憶ニューラルネットワークの解析と回路実装 辻 孟

学位論文指導教員：堀尾 喜彦

Analysis and Circuit Implementation of Spatiotemporal Contextual Learning and Memory Neural Networks

Takeru TSUJI

Research Advisor: Yoshihiko HORIO

The spatiotemporal contextual learning and memory neural network is proposed based on physiological experiments in the CA1 region of the hippocampus. It is expected to realize a low-power and compact edge learning hardware device by implementing this model with analog circuits as a spiking neural network that operates asynchronously and in continuous time. In this study, we show two topics toward the implementation of such devices. First, a learning evaluation method suitable for hardware is proposed by using network outputs. Second, a hardware simulator is proposed to investigate the parameter values necessary for hardware implementation. In addition, a prototype circuit of the simulator is fabricated and its operation is verified. With these results, it is considered the device implementation of the model becomes easier.

1 はじめに

時空間コンテキスト学習・記憶ニューラルネットワーク (STCLMN)[1] は、海馬の CA1 における情報処理様式をもとに提案された。この STCLMN は時空間学習則 (STLR)[2] とヘブの学習則 (HEBB)[3] の両方を持ち、1 ショットで時空間パターン列の学習・記憶が可能である。この特徴から、非同期で連続時間に動作するスパイクングニューラルネットワークとして実装することで、低消費電力かつ小型なエッジ学習ハードウェアデバイスの実現を目指している。一方で、このようなデバイスを実装する上で2つの課題が想定される。

1つ目の課題は、ハードウェアに適した学習の評価手法として、容易に測定可能なネットワーク出力を活用した手法が必要になることであり、また、2つ目の課題は、ソフトウェア上のシミュレーションでは困難な、ハードウェア実装時の回路精度やパラメータ値の検討を行うことが可能な専用のハードウェアシミュレータの設計が必要であることである。本論文では、この2つの課題解決を研究目的とする。

2 単層 STCLMN の構造

単層 STCLMN の構造を図1に示す。N 個のニューロンから成るネットワーク中のそれぞれのニューロンは、M 個の STLR シナプスと、L 個の HEBB シナプスを持つ。ここで、時刻 t_k における i 番目のニューロンの内部状態 $p_i(t_k)$ 、出力 $y_i(t_k)$ は、それぞれ以下のように示される。

$$p_i(t_k) = \alpha^S \sum_{m=1}^M w_{i,m}^S(t_k) x_{i,m}^S(t_k) + \alpha^H \sum_{l=1}^L w_{i,l}^H(t_k) y_l(t_{k-1}), \quad (1)$$

$$y_i(t_k) = f(p_i(t_k) - \theta_F). \quad (2)$$

ここで、 $\alpha^S (\geq 0)$ 、 $\alpha^H (\geq 0)$ は、それぞれ STLR と HBLR の影響度の調整係数、 $f(\cdot)$ はステップ出力関数、 θ_F は発火閾値であり、 $w_{i,m}^S(t_k)$ 、 $x_{i,m}^S(t_k)$ は m 番目の STLR シナプスへの入力と STLR シナプス結合重み、 $w_{i,l}^H(t_k)$ 、 $x_{i,l}^H(t_k)$ は l 番目の HEBB シナプスへの入力と HEBB シナプス結合重みである。

3 STCLMN の解析・性能評価

ここでは、先行研究の知見を用いるため、 $M = 120$ 、 $N = 120$ 、 $\alpha^S = 1$ 、 $\alpha^H = 0$ である STLR シナプスのみを持つネットワークを用いる。入力には、5つのバイナリベクトル $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3, \mathbf{A}_4, \mathbf{A}_5$ の順列から得られる $120 (= 5!)$ 個のベクトル列 $\mathcal{P}_i (1 \leq i \leq 120)$ を用いる。

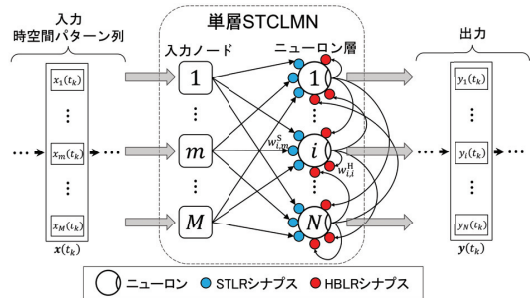


図1: 単層 STCLMN の構造

あるベクトル列 \mathcal{P}_i を学習したネットワークに対して、読出し信号を入力することで、ネットワークの出力から、学習により形成された記憶情報を反映していると考えられる出力ベクトル $\mathbf{y}_R^{\mathcal{P}_i}$ が得られる。同様に、全ての学習空間ベクトル列 $\mathcal{P}_i (1 \leq i \leq 120)$ に対してネットワーク出力ベクトル $\mathbf{y}_R^{\mathcal{P}_i} (1 \leq i \leq 120)$ を得る。この内、2つの出力ベクトル $\mathbf{y}_R^{\mathcal{P}_i}$ と $\mathbf{y}_R^{\mathcal{P}_j}$ から、以下のように HD_{ij} を計算する。

$$HD_{ij} = \left\| \mathbf{y}_R^{\mathcal{P}_i} - \mathbf{y}_R^{\mathcal{P}_j} \right\|. \quad (3)$$

得られた HD_{ij} から、入力ベクトル列の時間的構造による学習への影響を詳細に評価するために、[4]で提案された手法に従い、 \mathcal{P}_i と \mathcal{P}_j の構造に応じた集合を定義する。適切なパラメータを用いたシミュレーションによって得られた HD_{ij} に対して定義した集合を色分けしたヒストグラムを図2(a)に示す。更に、この HD_{ij} を入力ベクトル列の時間的構造による条件に応じて並び替えて作成した2DHDマップで、図2(b)に示すように、ネットワーク出力上に入力ベクトル列の時間的構造が反映されていることが確認された。これにより、学習性能をこの構造の有無により評価することが可能である。

4 STCLMN の回路実装

本研究では、STCLMN を回路実装に適するように連続時間・連続値に拡張されたモデル (eSTCLMN)[5] を実装対象とする。この eSTCLMN のアナログ回路実装に向けたハードウェアシミュレータの構造を図3に示す。

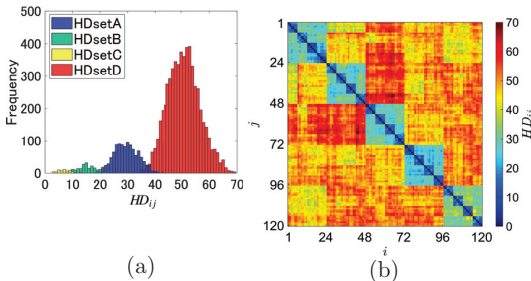


図2: [4]の提案手法。(a) 条件による色分けされたヒストグラム, (b) 2DHDマップ。

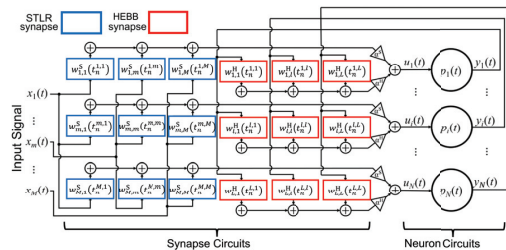


図3: ハードウェアシミュレータの構造

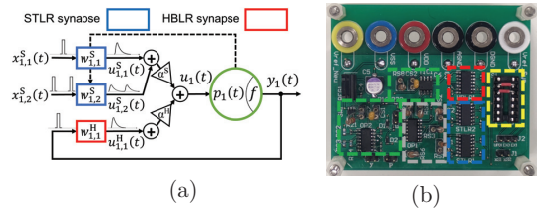


図4: 実装するネットワーク。(a) 最小単位のネットワーク, (b) プロトタイプ回路基板。

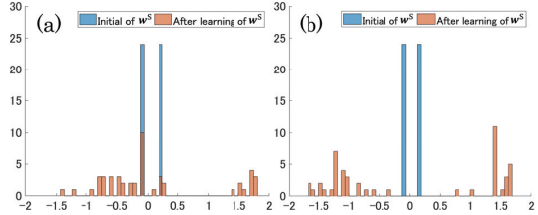


図5: 入力パターン学習後の STLR シナプス荷重値の分布。(a) シミュレーション実験, (b) 回路実験。

この回路において、各シナプス回路素子は内部クロックを持ち、非同期で動作できるマイクロコンピュータ (MCU) で実装する。対照的に、ニューロンはアナログ回路で実装する。したがって、システム全体は入力駆動型の非同期スパイクングデジタル/アナログ混成回路となる。また、このシミュレータにおける機能を、図4(a)に示すような最小規模のネットワークを持つプロトタイプ回路基板 (図4(b)) を用いて実験的に確認する。

図5に、入力パターン学習後のシミュレーション結果と回路実験における STLR シナプス荷重値の分布を示す。この結果から、プロトタイプ回路が動作していることが定性的に確認できた。

5 まとめ

入力ベクトル列の構造に注目した条件分けにより、ベクトル列が持つ時間的構造の影響を評価できることを示し、ネットワーク出力のみで詳細な学習の評価が可能となった。また、回路実装では、eSTCLMN 実装のためのハードウェアシミュレータを提案し、最小規模のシミュレータを回路実装を行い、シミュレーションと回路実験により機能を確認した。

参考文献

- [1] H. Tsukada and M. Tsukada, in *Advances in Cogn. Neuro Dyna.* (VII), **89–94** (2021).
- [2] M. Tsukada et al., *Neural Networks*, **9(8)**, **1357–1365** (1996).
- [3] D.O. Hebb, New York, Hohn Wiley (1949).
- [4] T. Tsuji et al., in *Proc. NOLTA.*, **415–418** (2023).
- [5] T. Orima et al., *Procedia Computer Science*, **222**, **478–487** (2023).

修士学位論文要約（令和6年3月）

MR 技術を用いたギター演奏技能育成支援システムに関する研究

吉田 周平

指導教員：菅沼 拓夫

A Study on Support System for Guitar Performance Training Using MR Technology

Shuhei YOSHIDA

Supervisor: Takuo SUGANUMA

Playing the guitar requires learning the skills of pressing and picking strings, as well as playing skills related to rhythm and tone. However, these skills are difficult for beginners to learn, especially if they are self-studying, so it is necessary to provide support for effective learning of guitar playing skills. Therefore, we propose a system using MR technology with a function for supporting the pressing and picking of strings and a function for evaluating playing skills. The results of user evaluation experiments show that the proposed system is easier to understand than common practice methods and is effective in supporting the development of guitar playing skills.

1. はじめに

ギターは人気のある楽器の一つであるが、演奏技能を習得するためには、基本的な演奏技能である押弦と撥弦に加え、リズムと音色に関する技能が必要である。しかし、これらの技能は初学者にとって難しく、特に独学の場合は非常に困難な課題であるため、効果的にギター演奏技能習得を行える支援が必要である。

この課題に対して、既存研究では Mixed Reality (MR) を活用することで直感的な学習指導を行うシステムが提案されてきた。しかし、当該システムは押弦方法の学習のみに着目しているため、リズムや音色に関する技能支援が未考慮である。

そこで、本研究では MR 技術を活用した押弦技能支援に加えて、音響分析を用いた演奏評価機能によるリズムや音色を考慮した演奏技能育成の支援を目指す。

2. 関連研究と課題

押弦方法を提示するシステムとして、Azuma らは Head Mounted Display (HMD) を用いることで、インタラクティブに操作できる仮想的なギターオブジェクトとハンドオブジェクトを現実空間に重畳表示し、直感的な押弦方法の理解を可能にしている。加えて、ギター型 MIDI コントローラーを使用することで演奏データを取得し、押弦位置の正誤判断によるフィードバックを行っている。

しかし、実際にギターで曲を演奏することを考

慮すると、音響分析に基づいた正誤判断の方が適していると言える。また、リズムや音色に関する技能育成支援が考慮されていない点も課題である。したがって、本研究で対象とする課題は以下の通りである。

(P1) 楽器演奏音を反映した押弦撥弦の学習支援

(P2) 適切なリズムと音色による演奏の学習支援

3. 提案

本研究では、押弦撥弦支援機能と演奏技能評価機能の2つを搭載したシステムを提案する。

(F1) 押弦撥弦支援機能

本機能では、仮想ギターオブジェクト上に弦を押さえている様子を模した仮想ハンドオブジェクトを表示することによって手指の形状を示し、仮想ギターオブジェクト上に押弦位置を示すマーカーを表示することによって正確な押弦位置を示す。また、ユーザーの演奏データから音響分析を行うことで、正しく押弦と撥弦ができていのかどうかリアルタイムで判定し、フィードバックを与える。

(F2) 演奏技能評価機能

本機能では、演奏データの音響分析を用いてリズムと音色の評価を行い、評価結果をユーザーにフィードバックする。具体的には、ピーク検出によって演奏されたリズムを分析し、正しいリズムとの差分から技能評価を行う。音色の評価は、演奏データをメルスペクトログラムの画像に変換し、畳み込みニューラルネットワークによる分類

を音色の良し悪しに基づいて行うことで実現する。ここで、画像分類はギターの本の弦ごとに「良い」「悪い」の2分類である。

4. 実装

提案システムはハードウェアに実際のギターと EVO4 と HoloLens2 (HMD) と MacBook Pro (Apple M1) を使用し、ソフトウェアに Unity と Mixed Reality Toolkit を用いて実装した。

押弦撥弦支援機能を図1に示す。上図が HMD を装着したユーザーの練習時の画面であり、下図が押弦位置を示したマーカーと仮想ハンドオブジェクトである。

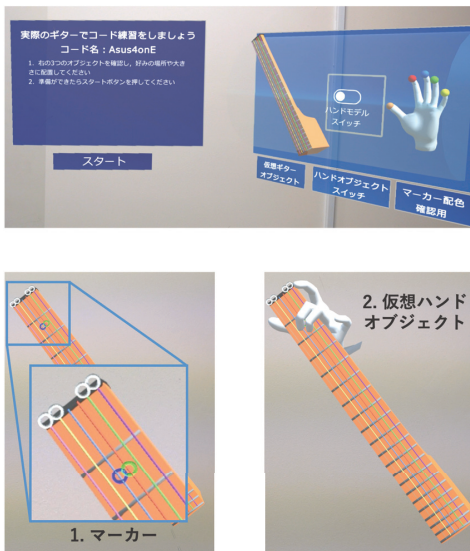


図1 (F1) 押弦撥弦支援機能

また、演奏技能評価機能を図2に示す。演奏位置を示すカーソルとリズム評価、音色評価の結果が仮想楽譜上に表示されている。

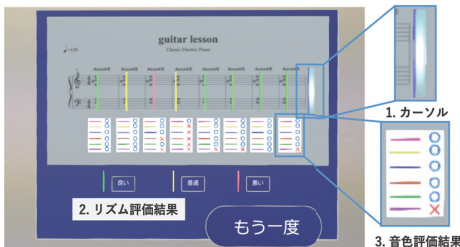


図2 (F2) 演奏技能評価機能

5. 評価

提案システムの効果を検証するために提案システムと実験用に作成した教本を用いて比較実験を行った。実験はギター未経験の20代、14人

(男性:13人, 女性:1人)を対象とし、教本を用いた練習と提案システムを用いた練習を続けて行った後にアンケート調査を実施した。アンケートの内容は以下の通りである。

- Q1. 教本のコード練習は理解しやすいか
 - Q2. システムのコード練習は理解しやすいか
 - Q3. 教本のリズム練習は理解しやすいか
 - Q4. システムのリズム練習は理解しやすいか
 - Q5. 教本の音色練習は理解しやすいか
 - Q6. システムの音色練習は理解しやすいか
 - Q7. 教本でさらに練習したいと感じたか
 - Q8. システムでさらに練習したいと感じたか
- 以上の設問に対して、被験者が5段階のリッカート尺度で回答した結果を表1に示す。

質問	評価				
	1	2	3	4	5
Q1	0	1	6	5	2
Q2	0	0	1	2	11
Q3	0	4	2	5	3
Q4	0	0	1	2	11
Q5	1	3	5	4	1
Q6	0	0	0	3	11
Q7	1	4	8	1	0
Q8	0	0	0	6	8

表1 アンケート結果

結果から、教本に対する評価はいずれも3付近に分布しているが、提案システムに対しては全てにおいて90%以上が4以上と回答していた。したがって、提案システムは一般的な学習方法と比較して理解しやすく、効果的な技能育成が可能であると言える。

6. まとめ

効果的なギター演奏技能育成支援システムについて研究を行い、押弦撥弦支援機能と演奏技能評価機能を提案した。

ユーザー評価実験の結果から、提案システムはギター演奏技能育成支援において効果的であることを明らかにした。

文献

1) Y. Azuma, H. Miyao, and M. Maruyama, "A Guitar Training System for Beginners Using a Mixed Reality Device and a MIDI Guitar," HCI International 2022 Posters, pp. 19-26, 2022.

修士学位論文要約（令和6年3月）

非侵襲血中成分分析のための中赤外光熱偏向分光システムの研究

伊藤 大登

指導教員：松浦 祐司

Mid-Infrared Photothermal Deflection Spectroscopy System for Non-Invasive Blood Component Analysis

Hiroto ITO

Supervisor: Yuji MATSUURA

A photothermal deflection spectroscopy system that detects the heat generated by mid-infrared absorption of sample molecules as local changes in the refractive index of a sensing prism in contact with sample was realized using a simplified system. The effectiveness of this system was confirmed by measuring glucose solution and human fingertips.

1. はじめに

赤外光を試料に照射した際の光吸収によって生じる熱を、試料に接触したプリズムの屈折率変化として検出する光熱偏向(PTD)分光法は、生体構成成分の非侵襲分析法として期待される。これまでは中赤外光の照射点付近で試料に接触させたプリズム内で近赤外プローブ光を全反射させる手法が主なものであったが、我々のグループでは小型かつ安価なシステムの実現に向けて、微小な結晶角柱内に可視プローブ光を通過させる簡易な測定方法を提案した。本報告では、その基本的な特性を評価した結果を報告する。

2. 原理

本報告で扱う PTD 分光法では、試料に赤外パルス光(励起光)を照射する(図 1 参照)。光が照射された分子は、分子を構成する原子間の伸縮・回転に起因する振動に依存した波長の光を吸収し、光吸収量に応じたエネルギーを熱として放出する。この熱エネルギーは熱波として試料と接している検出用プリズムに伝搬し、試料との接触面付近に屈折率変化を引き起こす。この変化に伴ってプローブ光が偏向するため、プローブ光の偏向量変化を位置検出器で検出することにより、試料に含まれる物質の赤外光吸収情報を取得することができ、中赤外分光法と同様に試料の成分分析が可能である。

3. 測定系

今回の手法で設計した測定系と、従来の PTD 分光法の測定系の概略を示す(図 1 および図 2)。従来の PTD 分光法(図 1)では、試料に接触させたプリズム内に近赤外プローブ光を入射させ、プリズム上端で全反射させる光路をとった。試料の光熱偏向信号を得るためには、プリズム下部から垂直に入射させる

励起光の照射点と全反射点を一致させる必要があり、これには緻密な光軸調整に加えて、台形の比較的大きなプリズムが必要になってしまうため、将来の小型かつ安価なシステムの障害となる可能性がある。従って本報告ではプローブ光をプリズム上端を水平に通過するように入射させる光路をとった(図 2)。励起光照射点を通り過ぎる光路とすることで従来の測定系よりも光軸調整が簡易になり、またより小型なプリズムで信号を検出できると考えられる。

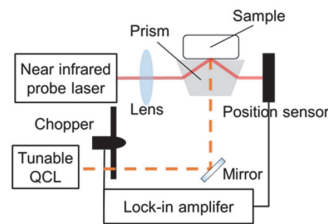


図 1 従来の測定系の概略

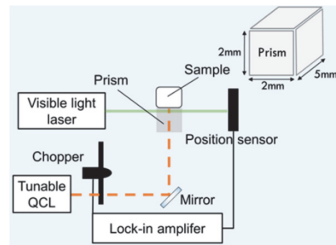


図 2 構築した測定系の概略

本測定系で用いたプリズムは、可視光から赤外の波長帯での透過率が高く、赤外分光に汎用的に用いられる硫化亜鉛を材質としている。PTD 分光法はプローブ光の偏向を試料の赤外吸収と読み換えて検出するといった原理であるため、プリズム屈折率の

温度依存性(熱光学係数)が大きい程検出感度が高くなる(表1参照). 硫化亜鉛の熱光学係数は、表1に示す通り短波長に対して大きくなっているが、0.5 μm 以下の波長の光を照射すると蛍光が生じるといった物性を有するため、本測定系では緑色レーザーがプローブ光として適していると判断しこれを用いた.

表1 硫化亜鉛の熱光学係数⁽¹⁾

波長 ⁽²⁾	熱光学係数 $(dn/dt)(\times 10^{-5} \text{ K}^{-1})$ ⁽²⁾
0.63 μm ⁽²⁾	6.4 ⁽²⁾
1.15 μm ⁽²⁾	5.0 ⁽²⁾
3.39 μm ⁽²⁾	4.6 ⁽²⁾
10.6 μm ⁽²⁾	4.6 ⁽²⁾

4. 水溶液を対象にした測定

本測定系の性能を評価するために、グルコース水溶液を試料とした測定を行った。図3は本測定系で検出される濃度5%のグルコース水溶液のPTDスペクトルを示したものである。なお、本測定では、純水のスペクトルをリファレンスとして計算している。図3には比較のため、ATR測定系にて測定した5%グルコース水溶液の吸収スペクトルを併せて示した。ATR法では、フーリエ変換赤外分光光度計(FT-IR)と多重反射型ATRプリズムとを組みあわせ、プリズム表面上に試料を配置して測定を行っている。本測定系で測定したPTDスペクトルは、ATR法で測定した吸収スペクトルとよく一致するピーク特徴が得られ、本測定系にて赤外吸収情報が問題なく取得できることが確認できた。

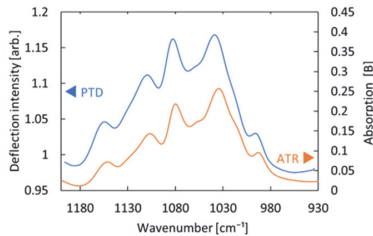


図3 5%グルコース水溶液の赤外吸収スペクトル

また、濃度が異なるグルコース水溶液を試料として得られたスペクトルの1035 cm^{-1} 付近の吸収ピークを用いて作製した検量線を図4に示す。濃度との高い線形性を確認することができ、吸収係数と比例するPTD信号強度が得られていることを確認した。この検量線は、各濃度のスペクトルでピークが明瞭に確認できる範囲までを用いて作成している。濃度0.3%以下ではややばらつきは大きくなるものの、ヒト血糖値100 mg/dL に相当する0.1%のグルコース濃度水溶液においても吸収ピークを確認できた。実用的なシステムの構築に向けては、ヒト血糖値5 mg/dL に相当する0.005%の濃度測定精度の実現が望ましい為、今後さらなる測定精度の向上が必要である。

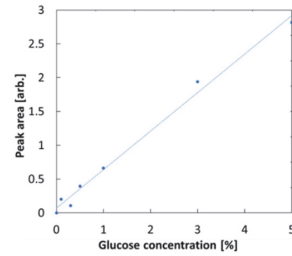


図4 グルコース溶液の定量分析

4. ヒトの指先を対象にした測定

小指指先の掌側を対象として測定を行った結果を図5に示す。プリズムの上面に測定部位を密着させ、水をリファレンスとして測定を行った。測定の際には測定部位の皮脂汚れを除去した後測定を行っている。連続して5回測定を行い、スペクトルのばらつきを検証した。比較としてATR法によって同測定部位に対して得られる吸収スペクトルを示す。

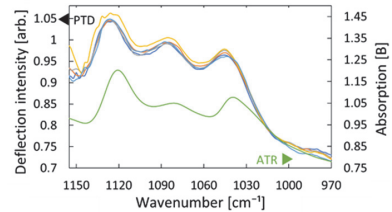


図5 指先を対象としたPTDスペクトル

本測定系を用いた結果において、比較的ばらつきの小さい生体スペクトルが検出できていることが確認できた。1030 cm^{-1} 付近、1078 cm^{-1} 付近、1120 cm^{-1} 付近の吸収ピークはそれぞれ角化細胞、角質層組織、乳酸に由来するものと考えられ、生体組織を構成する成分の取得に成功した。得られたPTDスペクトルはATRスペクトルと類似するものの、完全には一致していない。これはPTD法ではより表面から深い成分の取得が行われていることを示唆するものであり、今後は変調周波数を変化させることによる深さ方向の成分分析などを行う。

5. まとめ

本研究では、非侵襲な血糖値測定の実現に向け、中赤外領域の光を用いたPTD分光法を、従来よりも小型なプリズム、及び光軸調整が簡便となる光路に変更したシステムの実現を検討した。新たに構築したシステムを用いて得られたスペクトルをATR法と比較した結果、非生体試料では吸収係数に比例するPTD信号強度が得られることを確認し、生体試料に対しては、生体組織成分の吸収に起因するピークの取得に成功した。

文献

(1) 株式会社ウイング. “硫化亜鉛 (Zinc Sulfide)” .<https://wing-eco.com/infrared/zns/>,(2022/04/12)

修士学位論文要約（令和 6 年 3 月）

関節角度と関節剛性の閉ループ FES 制御の実現性に関する 計算機シミュレーション研究

太田 雄大

指導教員：渡邊 高志

A Computer Simulation Study on the Feasibility of Closed-Loop FES Control of Joint Angles and Joint Stiffness

Yudai OHTA

Supervisor: Takashi WATANABE

This study aimed to develop a functional electrical stimulation (FES) controller for paralyzed patients to assist with activities of daily living. An FES controller that controls both joint angles and joint stiffness was proposed and tested on a computer simulation. In a previous study, although a control method that performs closed-loop control of joint angles and open-loop control of joint stiffness was proposed the control performance of joint stiffness and its effect on disturbances was not tested. Therefore, the previous controller was also tested. First, the musculoskeletal model for using in FES controller test was constructed introducing Short Range Stiffness (SRS), because a conventional musculoskeletal model showed significantly different characteristics of joint stiffness of human subjects. Using the musculoskeletal model, control and disturbance rejection performance of the FES controllers and those of a PID controller for joint angle control using FES were tested. The proposed and previous controllers showed better performance in angle control and smaller angle change caused by disturbance than in the PID controller for joint angle control only. These results suggest that controlling joint stiffness may improve joint angle control performance and disturbance rejection performance. However, since no difference in disturbance rejection performance was observed between the previously proposed controller and the proposed controller, the open-loop control of joint stiffness may be useful.

1. はじめに

健常者は、関節剛性の調整によって外乱除去を行っている¹⁾。これに関連して、機能的電気刺激 (FES) を用いて、関節角度の閉ループ制御と関節剛性の開ループ制御を行う研究があるが²⁾、関節角度と関節剛性の制御性能や、外乱除去性能についての検討は十分に行われていなかった。そこで本研究では、関節角度と関節剛性を閉ループ制御する制御法を提案するとともに、筋骨格モデルを用いた計算機シミュレーションによって関節角度と関節剛性の制御性能および外乱除去性能の検討を行った。

2. 筋骨格モデルの関節剛性特性の改良

計算機シミュレーションにより FES 制御器を検討するために、筋骨格モデルの改良を行った。手関節の掌屈/背屈を対象とし、健常者 3 名で、2 筋 (橈側手根伸筋 (ECR)、尺側手根屈筋 (FCU)) に対する一定強度の電気刺激印加時の外乱印加による関節剛性を実験結果から計算し、刺激強度に対する関節剛性の特性を調査した。先行研究で構築された筋骨格モデル³⁾を用いて外乱印加実験と同条件で関節剛性を計算した結果、被験者の関節剛性特性と大きく異なった。こ

れに対し、筋骨格モデルに Short Range Stiffness (SRS)⁴⁾を導入することで関節剛性特性が被験者と同様になることを確認した。この時の被験者、SRS 導入前後の筋骨格モデルでの ECR の刺激強度増加に対する関節剛性特性の一例を図 1 に示す。これにより、FES 制御器の構築、テストに用いるための筋骨格モデルを用意した。また、外乱を用いずに筋特性の導関数などを用いて関節剛性を推定する擬似剛性によって関節剛性を適切に推定可能であることを確認した。

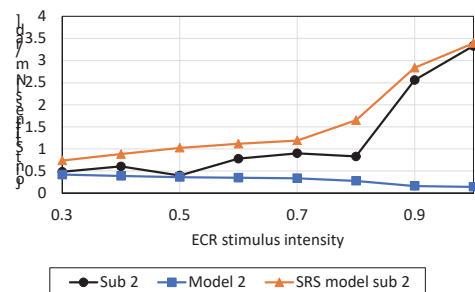


図 1 被験者、SRS 導入前後モデルの関節剛性 (Sub 2)

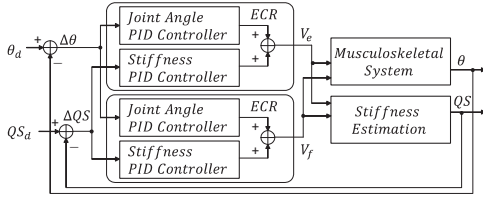


図2 提案制御器での制御系のブロック線図

3. 関節角度と関節剛性の閉ループ制御法

関節角度と関節剛性を閉ループ制御する制御法（提案法）を構築した。提案法は、刺激強度－関節角度と刺激強度－関節剛性の入出力特性を近似的に求め、その傾きをゲインに用いてPID制御器パラメータをCHR法に基づいて決定し、関節角度に対するPID制御器、関節剛性に対するPID制御器を各筋に適用した（図2）。

4. 関節角度・関節剛性制御器の性能の検討

提案法、先行研究法²⁾、関節角度のみのPID制御器（関節角度PID）について、関節角度と関節剛性的一方を一定値制御にもう一方をステップ状、正弦波状に制御した際の制御性能を評価した。まず関節角度（20 deg 背屈）のステップ制御性能を評価した。提案法の関節角度絶対値誤差平均（MAE）は関節角度PIDよりもやや増加したが、関節剛性を適切に制御できることを確認した。次に、関節角度の正弦波軌道（振幅 20 deg）追従制御性能を評価した。正弦波変化前の関節角度は 0 deg とし、正弦波状変化時間は 1 周期とした。このときの関節角度 MAE を図3に示す。提案法、先行研究法では、正弦波周期の短いときに関節角度 MAE が小さく、関節角度制御の速応性が高い可能性が示唆された。また、提案法で関節剛性を一定値に制御できることを確認した。最後に関節剛性のステップ状、正弦波状の制御性能を評価した。関節剛性絶対値誤差率平均は先行研究法で小さく、関節角度 MAE は提案法で小さい結果となった。これは、提案法のパラメータが関節角度を重視する制御となっており、先行研究法は関節剛性が開ループ制御であるため、関節剛性制御が優先されたためであると考えられる。

提案法、先行研究法ともに関節角度と関節剛性を概ね適切に制御でき、関節角度と関節剛性の制御性能はトレードオフの関係にあることを確認した。

5. 各制御法の外乱除去性能の検討

目標関節剛性を一定値とし、関節角度を-20, 0, 20 deg にそれぞれ一定値に制御している状態で 150 g の外乱荷重を 5 秒間印加した。外乱除去性能の評価として、関節角度最大誤差、外乱印加後 50 ms 誤差（50ms 誤差）、5 秒後誤差、外乱印加中の関節角度 MAE を図4に示す。最大誤差、50ms 誤差が提案法において小さかったことから、関節

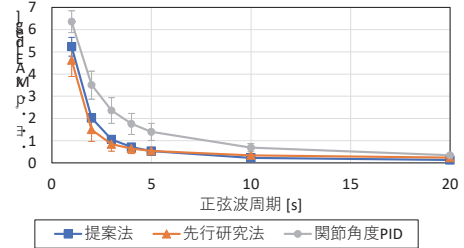


図3 各制御法における関節角度正弦波制御中の正弦波周期に対する関節角度 MAE

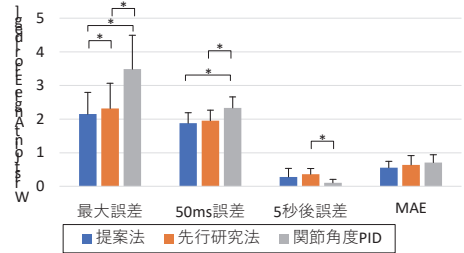


図4 各制御法における外乱応答評価項目

剛性を制御し、高めることによって外乱除去性能が向上することを確認した。また、先行研究法と提案法では、外乱除去性能に大きな違いはなく、先行研究法でも有効である可能性が示唆された。

6. まとめ

関節角度と関節剛性の同時制御において、提案法、先行研究法ともに、関節角度と関節剛性を概ね適切に制御でき、また、関節剛性を制御することによって、関節角度制御の速応性や外乱除去性能が向上することを確認した。今後は、制御器のパラメータ決定法の検討と実験的検証が必要であると考えられる。

文献

- 1) D. S. Goodin, M. J. Aminoff, “The basis and functional role of the late EMG activity in human forearm muscles following wrist displacement”, Brain Research, 589, pp. 39-47, 1992.
- 2) A. Takada, et al., “Coactivation Method Based on Common and Differential Modes for Joint Angle Control for Functional Electrical Stimulation Control”, IEEE 16th Int. Workshop on Advanced Motion Control (AMC), pp. 171-176, 2020.
- 3) T. Watanabe and K. Fukushima, “An approach to applying feedback error learning for functional electrical stimulation controller: computer simulation tests of wrist joint control”, Adv. Artif. Neural Syst., Vol. 2010, Article ID 814702, 2010.
- 4) F. D. Groote, et al., “Contribution of muscle short-range stiffness to initial changes in joint kinetics and kinematics during perturbations to standing balance: A simulation study”, Journal of Biomechanics, Vol. 55, No.11, pp. 71-77, 2017.

修士学位論文要約（令和6年3月）

FESによる動作補助中の 慣性センサを用いた随意活動度推定に関する基礎研究

鹿野 脩太

指導教員：渡邊 高志

A Basic Study on Estimation of Voluntary Activity Level Using Inertial Sensors during Movement Assistance by FES

Shuta KANO

Supervisor: Takashi WATANABE

In this study, aiming to demonstrate the feasibility of estimating voluntary activity level during movement assistance with FES using inertial measurement unit (IMU) signals, classification of different load conditions for the same movements was tested, in which elbow movement and movement assistance with FES were the same. First, elbow joint movements in the sagittal plane were measured in six healthy subjects under four load conditions (no weight, 1 kg, 2 kg, or 3 kg) while electrical stimulation was applied. IMUs were attached to the subject's non-dominant upper arm and forearm. Electromyography (EMG) was also measured using surface electrodes attached to the biceps brachii muscle. Second, machine learning models with different input signals and algorithms were designed to classify the load conditions. Four types of input signals were used from IMUs: acceleration and angular velocity, frequency spectrum, short-time Fourier transform (STFT), and continuous wavelet transform (CWT), and three algorithms were tested: k-nearest neighbor method, linear support vector machine, and Gaussian kernel support vector machine. The results showed that the average accuracy was 87.7% for intra-subject classification and 73.9% for inter-subject classification when the EMG signal was used, while 97.2% for intra-subject classification and 87.7% for inter-subject classification when the short-time Fourier transform of the IMU signal and a linear support vector machine were used. These suggests the feasibility of estimating voluntary activity level using the IMU signal.

1. はじめに

機能的電気刺激(FES)を用いたリハビリテーションにおいて、使用者の自発的な活動が伴うことにより、FESが麻痺患者に及ぼす神経可塑性が向上することが示唆されている¹⁾。したがって、FESによる動作補助中に患者が発揮した力の大きさ(随意活動度)を推定し、評価することが有効であると考えられる。特に慣性センサ(IMU)のみを用いた推定ができれば、IMUの計測信号を使用した患者の運動機能評価やFES制御へのフィードバックと併用可能になる。そこで本研究では、IMU信号のみによる随意活動度推定の実現可能性を検討した。本研究では、角度変化とFESによる動作補助が同一となる運動において、異なる重りの重さ(負荷条件)を随意活動度の違いとして設定し、IMU信号による負荷条件の分類の実現可能性を検討した。

2. 負荷条件分類モデルの作成

本研究では、同一の肘関節運動について4つの負荷条件(重りを持たない条件, 1kg, 2kg, 3kgのいずれかの重りを持つ条件)を設定し、これを機械学習によって分類した。入力信号として加速度・角速度(AccAngv)、

周波数スペクトル(Spec)、短時間フーリエ変換(STFT)、連続ウェーブレット変換(CWT)の4種類、アルゴリズムとしてk-近傍法(k-NN)、線形サポートベクターマシン(L-SVM)、ガウスカーネルサポートベクターマシン(G-SVM)の3種類を使用し、それぞれ異なるモデルを設計し、分類精度を比較した。また、随意運動の評価に一般的に用いられる筋電図(EMG)についても、電気刺激の周期ごとに算出したRoot Mean Square(RMS)値を入力信号としたモデルを作成して分類を行い、IMUを使用した場合と比較した。

3. 負荷条件分類実験

健康者6名を対象とし、IMU(サンプリング周波数100Hz)を非利き手側の上腕と前腕に伸縮性バンドで取り付け、座位にて、異なる負荷条件での肘関節の屈曲・伸展運動を計測した。また、上腕二頭筋のEMG(サンプリング周波数1kHz)を、表面電極と自作の筋電信号増幅器により計測した。このとき、FESによる運動の補助を想定し、上腕二頭筋に表面電極を付け、運動に合わせて電気刺激(刺激周波数20Hz)を印加した。被験者内分類では5分割交差検証、被験者間分類ではLeave-One-Subject-Out交差

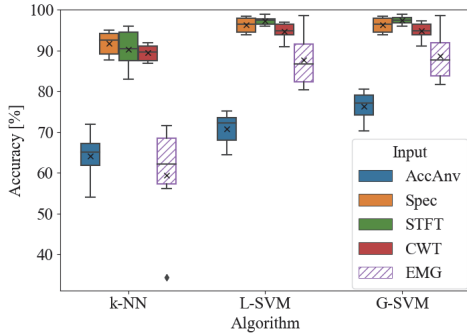


図1 被験者内分類における各モデルの分類正解率

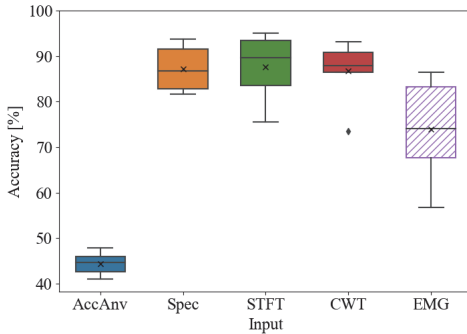


図2 被験者間分類における各モデルの分類正解率 (アルゴリズム:L-SVM)

検証の方法を用いて精度を評価した。

各モデルの分類正解率について、被験者内分類の結果を図1に、被験者間分類の結果を図2に示す。これらの箱ひげ図は全被験者の結果をまとめたもので、×印は全被験者の平均値を示している。なお被験者間分類ではアルゴリズムに L-SVM を使用した場合のみを示している。入力信号の種類で比較すると、IMU に関して、加速度・角速度以外で高い正解率が得られた。これらの信号には周波数情報が含まれるため、負荷の大きさによって動きの周波数成分が変化していることが示唆された。また短時間フーリエ変換を使用すると特に正解率が高くなったことから、周波数情報の時間変化にも負荷条件の差異が表れていると考えられ、この差異を検出するのに時間一周波数解析が有効である可能性が示唆された。IMU 使用時と EMG 使用時を比較すると、全体的に IMU の方が正解率が高かった。EMG 使用時の平均値は被験者内分類で 87.7%、被験者間分類で 73.9%であったのに対し、IMU 使用時(STFT)は被験者内分類で 97.2%、被験者間分類では 87.7%の平均値が得られた。本研究では上腕二頭筋のみの EMG を計測して分類に使用したが、実際には負荷の大きさが変わること、他の部位も含めた上肢全体の使い方が変化していた可能性が考えられ、本研究のように単一

筋の EMG のみを使用する場合は、随意活動度推定に必要な情報が十分に得られない可能性がある。アルゴリズムによる分類正解率の違いに関しては、IMU 使用時で、かつ入力信号が加速度・角速度以外の場合、アルゴリズム間の差はほとんど見られなかった。本研究ではアルゴリズムとしていずれも単純なものを使用しており、加えてデータセットの規模も小さかったため、アルゴリズムの違いよりも入力信号の違いの方がより強く分類精度に影響を及ぼしたと考えられる。被験者内分類と比較したとき、被験者間分類における正解率は、入力信号がいずれであっても低下していた。しかし、周波数スペクトルや短時間フーリエ変換を使用した場合の正解率は依然として高く、負荷条件による周波数情報の変化に関して、誰にでも共通する情報が存在している可能性が示唆された。IMU から得られたデータを入力として荷重を推定した先行研究²⁾では、88.1%の正解率で被験者内分類を行っており、本研究ではこれに劣らない精度で分類ができていたといえる。

計測した IMU 信号の周波数解析を行ったところ、各軸の信号には 0Hz 付近と 10 Hz 付近に大きな振幅をもつ成分が含まれていた。生理的振戦の主な周波数が 6-12Hz に分布していることから、10Hz 付近の成分はこれに由来するものと考えられる。また、6-12Hz の周波数帯域を除いた状態で負荷条件の分類を行ったとき、多くの被験者において分類精度が低下した。したがって、運動中における生理的振戦の生じ方が負荷の大きさによって変化しており、それが負荷条件の分類に役立った可能性が示唆された。また 25-50Hz を除いた場合にも精度の低下が見られたが原因は不明であり、今後詳細に検討する必要がある。

4. まとめ

同一の肘関節運動について計測した信号を使用し、負荷条件の分類を行った。入力信号として IMU 信号の短時間フーリエ変換、アルゴリズムとしてサポートベクターマシンを用いた場合に高い分類正解率が得られ、IMU のみを用いた随意活動度推定の実現可能性があることを確認した。

文献

- 1) Barsi GI, Popovic DB, Tarkka IM, Sinkjaer T, and Grey MJ., Cortical excitability changes following grasping exercise augmented with electrical stimulation, *Exp Brain Res.*, Vol. 191, No. 1, pp. 57–66, 2008.
- 2) Pesenti M, Invernizzi G, Mazzella J, Bocciolone M, Pedrocchi A, and Gandolla M., IMU-based human activity recognition and payload classification for low-back exoskeletons, *Sci Rep*, Vol. 13, No. 1, p. 1184, 2023.

修士学位論文要約（令和6年3月）

リンパ行性薬物送達法を用いた固形腫瘍に対する 放射免疫療法に関する研究

高木 洸樹

指導教員：小玉 哲也， 研究指導教員：小玉 哲也

A Study of Radioimmunotherapy for Solid Tumors Using Lymphatic Drug Delivery System

Koki TAKAGI

Supervisor: Tetsuya KODAMA, Research Advisor: Tetsuya KODAMA

Local irradiation to solid tumors activates antitumor immunity by altering the tumor microenvironment. Therefore, the combination of local irradiation and immunotherapy is expected to enhance therapeutic efficacy. Anti-CTLA-4 antibody, a type of immune checkpoint inhibitor, acts mainly in the lymph nodes in the anti-tumor immune response, but systemic administration is used in clinical practice, and efficient delivery to the lymphatic system is not expected. Lymphatic Drug Delivery System (LDDS) is a drug delivery method that administers drugs directly to the lymph nodes, and previous studies have shown high drug retention and tissue selectivity in the lymphatic system. Therefore, the use of LDDS to administer anti-CTLA-4 antibodies is expected to promote efficient delivery to the lymphatic system and improve therapeutic efficacy. In this study, we compared the therapeutic efficacy of LDDS and systemic administration (i.v.) in the administration of anti-CTLA-4 antibodies in immunotherapy alone and in combination with radiotherapy to evaluate the benefit of LDDS. In the immunotherapy-alone group, the use of LDDS slightly inhibited the growth of solid tumors, but not distant metastasis. On the other hand, in the radioimmunotherapy group, the growth of solid tumors was delayed, and distant metastasis was suppressed, especially in the LDDS group, which showed a high tumor suppression effect due to T cell-mediated immune activity. These results indicate that the combination of LDDS administration of anti-CTLA-4 antibody and local irradiation is effective in the treatment of solid tumors.

1. はじめに

放射線療法と抗 CTLA-4 抗体の併用は、固形腫瘍の臨床試験において、単独療法と比較して生存期間と奏効率を有意に改善することが報告された有用な治療法である¹⁾。現在、抗 CTLA-4 抗体の投与には血行性投与が用いられているが、本薬剤は主にリンパ節内で免疫抑制シグナルを遮断するため、リンパ系への効率的な薬物送達が望まれる。しかし、最適な薬物送達方法に関する報告は少なく、治療効果向上のためには研究の余地が残されている。リンパ行性薬物送達法(LDDS)は、リンパ系への効率的な薬物送達を実現する薬物投与手法であり、リンパ系への高い貯留性および組織選択性を有する^{2,3)}。したがって、抗 CTLA-4 抗体を LDDS 投与することで治療効果の向上が期待される。本研究では、免疫療法単独および放射免疫療法において抗 CTLA-4 抗体の投与に LDDS を用いた場合と従来手法である静脈投与を用いた場合における治療効果および副作用の比較、検討をおこなった。

2. リンパ行性薬物送達法を用いた免疫療法による治療効果の評価

MXH10/Mo/lpr マウス⁴⁾を用いた担がんマウスモデルに対する免疫療法において静脈投与または LDDS を用いて抗 CTLA-4 抗体を投与することで、投与経路による固形腫瘍に対する治療効果の比較をおこなった。担がんマウスモデルに対して生理食塩水を静脈投与する No treatment 群、抗 CTLA-4 モノクローナル抗体 (5 mg/kg) を 2 回静脈投与する Immunotherapy (i.v.) 群、抗 CTLA-4 モノクローナル抗体を 2 回、固形腫瘍と反対側または同側の腸骨下リンパ節に LDDS 投与する Immunotherapy (ntsLDDS) 群、Immunotherapy (tsLDDS) を作製し、各治療群における固形腫瘍に対する治療効果や遠隔転移の発生頻度を評価した。固形腫瘍の体積および病理組織解析では、LDDS 投与を用いた群における僅かな増殖抑制傾向が認められた。一方で、生物発光強度および肺および肝臓における遠隔転移の発生頻度については各群で顕著な差異は認められなかった。

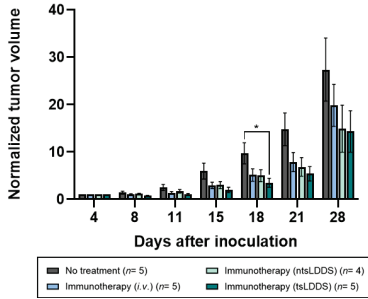


図1 固形腫瘍体積の経時的変化

3. リンパ行性薬物送達法を用いた免疫療法と放射線療法との併用による治療効果の評価

担がんマウスモデルに対する放射免疫療法において静脈投与またはLDDSを用いて抗CTLA-4抗体を投与することで、投与経路による固形腫瘍への治療効果の比較をおこなった。4Gyのエクソ線照射を2回実施するRadiotherapy群、4Gyのエクソ線照射および抗CTLA-4モノクローナル抗体(5mg/kg)の静脈投与またはLDDS投与を2回実施するRadioimmunotherapy(i.v.)群、Radioimmunotherapy(LDDS)群を作製し、各治療群における固形腫瘍に対する治療効果や遠隔転移の発生頻度を評価した。固形腫瘍の体積変化や生物発光強度変化、病理組織解析では、放射線単独群と比較し、放射免疫療法群においてより高い効果が認められ、特にLDDSを用いた群において最も高い腫瘍抑制効果が見られた。また、固形腫瘍組織における定量PCR解析により、Radioimmunotherapy(LDDS)群においてRadioimmunotherapy(i.v.)群と比較しCD4, CD8, IL-12 β , IFN- γ 等の免疫関連分子の発現量の増加が認められた。肺および肝臓への遠隔転移は、Radiotherapy群およびRadioimmunotherapy(i.v.)群では肝臓への転移が見られたが、Radioimmunotherapy(LDDS)群では転移は認められず、遠隔転移の抑制が見られた。

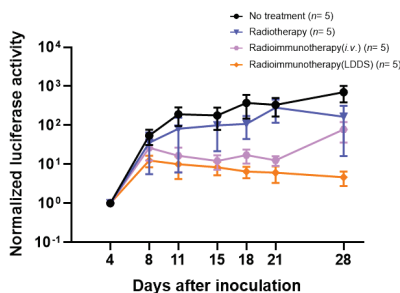


図2 *in vivo* 生物発光強度の経時的変化

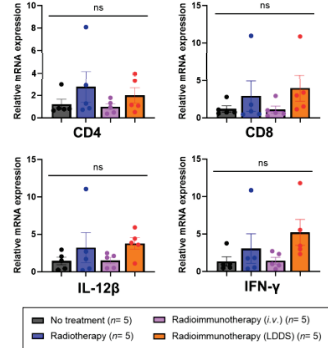


図3 実験終了時の固形腫瘍組織におけるqPCR解析結果

4. 固形腫瘍治療にともなう副作用の評価

治療実験をおこなったマウスから採取した肺、肝臓、心臓、膵臓、脾臓、腎臓、胃、大腸の組織に染色を施し、リンパ球の浸潤等の病理組織学的観点から各治療群における免疫関連有害事象の発症率および重篤度を比較した。肺、肝臓以外の臓器において顕著な炎症は認められなかった。肺においては、Radioimmunotherapy(i.v.)群において重篤な間質性肺炎が1例確認された。また、本群においては実験終了時の脾臓組織にてIL-6の高発現が認められた。また、肝臓ではImmunotherapy(LDDS)群において壊死性病変が1例認められた。免疫関連有害事象の発症機序は依然明確でないが、IL-6の高い血清レベルとの関連が報告されている⁵⁾。ゆえに本研究で見られた重篤な間質性肺炎はIL-6に起因する可能性があるが、その原因の特定にはさらなる研究が必要である。

5. まとめ

担がんマウスモデルに対する抗CTLA-4抗体のLDDS投与は、単独療法においては静脈投与と比較して僅かな治療効果の向上を示した。一方で、局所放射線と併用においてはLDDS投与により免疫関連分子の発現量の増加を伴う高い腫瘍抑制効果が得られ、静脈投与群では見られなかった遠隔転移の抑制が見られ、固形腫瘍治療における新たな治療法となる可能性が示唆された。

文献

- 1) Koller K.M., *et al.*, *Cancer Biol Ther*, **18** (2017).
- 2) Tada A, *et al.*, *Cancer Sci.*, **108** (2017).
- 3) Fujii H, *et al.*, *Cancer Med*, **8** (2019).
- 4) L Shao., *et al.*, *J. Immunol Methods*, **424** (2015).
- 5) Husain B., *et al.*, *J Cancer Res Clin Oncol*, **147** (2021).

修士学位論文要約（令和6年3月）

超音波ビーム焦点内の複数散乱体に対する後方散乱特性を用いた
赤血球集合度評価法に関する研究

武山 莉奈

指導教員：金井 浩，研究指導教員：荒川 元孝

Evaluation Method of Red Blood Cell Aggregation Using Backscattering
Properties for Numerous Scatterers in Focal Region of Ultrasound Beam

Rina TAKEYAMA

Supervisor: Hiroshi KANAI, Research Advisor: Mototaka ARAKAWA

Noninvasive measurement of the degree of red blood cell (RBC) aggregation is useful for evaluating blood properties. In our previous method, a scattering power spectrum measured for the vascular lumen was fitted with the reference scattering power spectra calculated from the scattering power spectrum measured for a single-sphere scatterer. In the present study, we proposed a method for calculating the reference scattering power spectra by summing the complex scattering spectra obtained for numerous scatterers in the ultrasound focal region by considering the distribution of numerous RBCs in the blood. By applying the reference scattering power spectra calculated by this method to the size estimation of microparticles simulating RBC aggregates, the estimated sizes were close to the true values. In *in vivo* measurements for the dorsal hand vein of healthy humans, the estimated sizes at rest were equivalent to the size of a single sphere with the same volume as an RBC, and those during avascularization became larger than those at rest, which was reasonable. The proposed method for obtaining reference scattering power spectra has the potential to accurately estimate the size of RBC aggregates.

1. はじめに

赤血球集合度は血液性状と関連し、血液性状評価に有用と考えられている指標である。我々は、超音波を用いた非侵襲的かつ定量的な赤血球集合体のサイズ推定法を提案してきた[1]。従来は、血管内腔から計測した散乱パワースペクトルを、単一球散乱体からの散乱パワースペクトルをもとに作成した参照散乱パワースペクトル群と整合することで、赤血球集合体のサイズを推定していた。一方、血管内腔から計測したパワースペクトルは超音波ビームの焦点領域内に多数の赤血球が分布することによるトランスデューサの音圧特性の影響が含まれ、従来の参照散乱パワースペクトルを用いたサイズ推定は、推定値が異なる可能性が考えられる。本研究では、血液中に多数の赤血球が分布する影響を考慮し、焦点内の多数の散乱体からの複素散乱スペクトルを足し合わせることで参照散乱パワースペクトル群を算出する方法を提案し、それらを用いて赤血球集合体のサイズ推定を行った。

2. 参照散乱パワースペクトルの作成

ビーム焦点を、中心を焦点深さ z_F 、高さ L 、直径 W の円柱形とし、焦点内に N_{fr} 個の散乱体が存在すると仮定する。焦点内の位置 $\mathbf{s}_i = (\xi_i, \zeta_i)$ ($i = 1, \dots, N_{fr}$)に存

在する直径 D の球散乱体から取得した複素散乱スペクトル $S_{D,i}(f; \mathbf{s}_i)$ は次式のように表される。

$$S_{D,i}(f; \mathbf{s}_i) = BS_D(f)X(f)G(f)H(f; \xi_i, \zeta_i)A(f; \zeta_i) \quad (1)$$

ここで、 $BS_D(f)$ は後方散乱特性、 $X(f)$ は印加信号の周波数特性、 $G(f)$ は超音波プローブの送受信特性、 $H(f; \xi_i, \zeta_i)$ は凹面トランスデューサの音圧分布を反映した音圧特性、 $A(f; \zeta_i)$ は伝播減衰特性を表す。また、 $\zeta_i = z_i$ である。このビーム焦点から得られる散乱スペクトル $S_{D,SUM}(f; \zeta_F)$ を、焦点内の位置 \mathbf{s}_i に存在する N_{fr} 個の散乱体からの複素散乱スペクトル $S_{D,i}(f; \mathbf{s}_i)$ の和と考へ、次式のように表す。

$$S_{D,SUM}(f; \zeta_F) = \frac{1}{N_{fr}} \sum_{i=1}^{N_{fr}} S_{D,i}(f; \mathbf{s}_i), \quad (2)$$

焦点内の散乱体の分布を M 通りに変えて同様に $S_{D,SUM,m}(f; \zeta_F)$ ($m = 1, \dots, M$)を算出し、次式のようにパワーで平均したものを参照散乱パワースペクトル $|S_{RD}(f; z_F)|^2$ とした。

$$|S_{RD}(f; z_F)|^2 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |S_{D,SUM,m}(f; \zeta_F)|^2 \quad (3)$$

本研究では、球散乱体からの散乱スペクトル $S_{D,i}(f; \mathbf{s}_i)$ を半球端ワイヤに対する超音波計測により取得した。直径 $20 \mu\text{m}$ の半球端ワイヤからの散乱スペ

クトルを、図 1(a)に示すように、超音波トランスデューサに対するワイヤの位置を変えて、ビーム焦点内で 15 カ所で計測した。Tomey 社製超音波診断装置 UD-8000(標本化周波数: 240 MHz)およびメカニカル・リニアアプローチ(中心周波数: 30 MHz)を用いた。次に、振幅と位相を考慮した内挿補間により、 ξ, ζ 方向に $1 \mu\text{m}$ 間隔で散乱スペクトル $S_{D,i}(f; \mathbf{s}_i)$ を用意した。焦点内に含まれ得る散乱体数 N_{fr} を算出し、その数の散乱体が焦点内にランダムに分布した際のスペクトルを式(2)で表すように加算し参照散乱パワースペクトル $|S_{\text{RD}}(f; z_{\text{F}})|^2$ を作成した。

提案手法により作成した参照散乱パワースペクトルと従来の単一球の参照散乱パワースペクトルのうち、 $D = 10, 20, 30 \mu\text{m}$ のものを図 1(b)に示す。提案手法により作成した参照散乱パワースペクトルは、従来法によるものと比べて、特に高周波でパワーが低下し傾きが変化した。散乱体サイズの推定では、散乱パワースペクトルの傾きを用いることから、提案法と従来法では推定される散乱体サイズが異なる可能性がある。

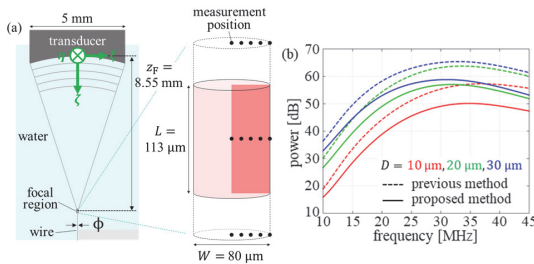


図 1: (a) ワイヤ計測の模式図, (b) 作成した参照散乱パワースペクトル。

3. ファントム実験

作成した参照散乱パワースペクトルの精度を評価するために、赤血球集合体を模擬したマイクロ粒子に対してサイズ推定を行った。直径 $19 \mu\text{m}$ と $6 \mu\text{m}$ の粒子を 1% の体積比率で水に加えたものを血液模擬ファントム A, B とした。減衰特性差を補正した計測パワースペクトルを、従来の単一球の参照散乱パワースペクトルと提案する多数の散乱体を模擬した参照散乱パワースペクトルと整合し、それぞれマイクロ粒子のサイズ推定を行った。

ファントム A における、補正後の計測パワースペクトルと参照散乱パワースペクトルの整合結果を図 2 に示す。従来の参照散乱パワースペクトルを用いた場合は $28 \mu\text{m}$ と推定されたが、提案法では $18 \mu\text{m}$ と推定された。ファントム B は、従来法では $11 \mu\text{m}$ 、提案法では $5 \mu\text{m}$ と推定され、いずれも提案法の方が真値に近く推定された。これより、提案した手法は従来の手法より散乱体のサ

イズ推定に有用であることが示された。

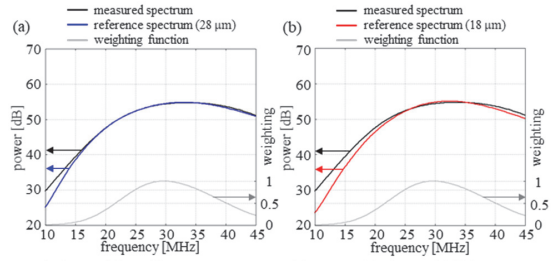


図 2: 補正後のマイクロ粒子に対する計測パワースペクトルと参照散乱パワースペクトルの整合結果, (a) 従来法, (b) 提案法。

4. in vivo 実験

20 代健康被験者 3 名の手背静脈に対して、赤血球集合体のサイズを推定した。血管内腔から得られたパワースペクトルに対して減衰特性差を補正し、提案する多数の散乱体を模擬した参照散乱パワースペクトルと整合することでサイズ推定を行った。安静時と、赤血球が集合しやすい駆血時において散乱パワースペクトルを計測した。

図 3 に (a) 推定サイズの経時変化, (b) 安静時と駆血時の推定サイズの関係を示す。安静時には、赤血球単体と同程度の体積を持つ単一球サイズに推定された。また、すべての被験者で安静時よりも駆血時の方が大きいサイズに推定され、駆血による赤血球集合の亢進を反映した妥当な結果が得られた。

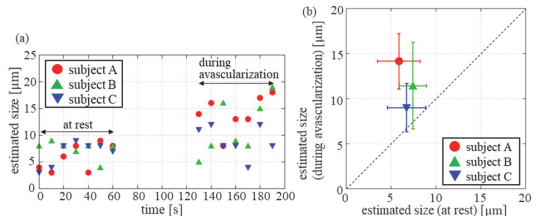


図 3: ヒト in vivo 計測に対する (a) 推定サイズの経時変化, (b) 安静時と駆血時の推定サイズの関係。

5. まとめ

血液中に多数の赤血球が分布する影響を考慮し、焦点内の多数の散乱体からの複素散乱スペクトルを足し合わせることで参照散乱パワースペクトル群を算出する方法を提案した。その結果、従来よりも高精度な推定結果が得られ、本手法が正確な赤血球集合体サイズ推定に有用であることが示された。

参考文献

[1] K. Higashiyama, et al., Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 61, SG1046 (2022).

修士学位論文要約（令和6年3月）

頸動脈内腔表面粗さの超音波計測とシステムの設計に関する研究

山根 綾太

指導教員：金井 浩， 研究指導教員：荒川 元孝， 森 翔平

A Study on Designing of Ultrasonic Measurement System
of Luminal Surface Roughness on Carotid Artery

Ryota YAMANE

Supervisor: Hiroshi KANAI, Research Advisor: Mototaka ARAKAWA, Shohei MORI

For early diagnosis of atherosclerosis, we have been developing an ultrasonic method to measure the minute luminal surface roughness utilizing the natural longitudinal displacement of the intima-media complex (IMC) of the carotid artery caused by pulsation. Since IMC is also displaced in the axial direction by pulsation, it is necessary to remove this pulsation component. In the present study, we proposed a method to remove the pulsation component by spatially convolving a high-pass filter. Moreover, to automate the measurement system, we proposed a method to automatically determine the region of interest (ROI) to measure the displacement of the IMC and a method to automatically limit the analysis time phase to the time phase in which the IMC displaces to the head during the cardiac diastole. The luminal surface roughness on the carotid artery was measured for six healthy volunteers, both young and elderly, using the proposed automatic measurement system. The improved convenience of automating the surface roughness measurement would reduce the task of healthcare workers who use this measurement system and is expected to contribute to clinical applications.

1. 背景・目的

我々は、動脈硬化症の極早期診断を目指し、頸動脈内腔の高さ数 μm の表面粗さを超音波計測する手法を開発してきた¹⁾。プローブから血管前壁までの間の音速が不均一な領域の影響により、通常の B モード像では頸動脈内腔表面の微小な粗さを高精度に計測することは難しい。そこで、本手法では拍動による頸動脈後壁の内膜-中膜複合体 (IMC) の血管長軸方向変位を利用し、固定した超音波ビームごとに頸動脈内腔表面粗さを計測する¹⁾。IMC は拍動により血管径方向にも変位するため、この拍動成分を除去する必要がある。本論文では拍動成分の空間周波数を考慮した上で除去する手法を提案した。

また、本手法の計測システムの自動化を目的に、計測対象である IMC に関心領域 (ROI) を自動決定する方法と、超音波受信信号のみを用いて解析時相を自動限定する方法を提案した。

2. 原理

2.1 頸動脈内腔表面粗さの超音波計測法

本手法では、固定した超音波ビームごとに、位相差トラッキング法²⁾で計測した頸動脈内腔表面の血管長軸位置ごとの高さの差により発生する血管径方向変位と、ブロックマッチング法³⁾で計測した IMC 全体の血管長軸方向変位を組み合わせることで音速不均一領域の影響を受けずに頸動脈内腔表

面粗さを計測する。しかし、拍動により IMC は血管径方向にも変位するため、各フレームにおいて計測した IMC の深さに対して空間ハイパスフィルタを血管長軸方向に畳み込むことで拍動成分を除去する。その後、IMC の血管長軸方向変位の大きさ (約 1mm) が超音波ビーム間隔 δx (本研究では 150 μm) よりも大きいことを利用し、ビームごとに計測した表面粗さを複数ビームで結合することで計測範囲を拡張する。

2.2 ROI の自動決定法

血管内腔に手動で設定した深さよりも深い領域において、全ビーム・全深さの最大値で正規化した包絡振幅が閾値を超える極大値を持つ深さの中で、最も浅い深さを ROI の中央深さとする。このとき、閾値が過小な場合は内腔の領域、過大な場合は外膜の領域を誤検出してしまう。IMC を ROI とする適切な閾値を決定するために、血管内腔や外膜の領域と比較して IMC の領域内の RF 波形が隣接ビーム間で類似することを利用する。各閾値で検出した包絡振幅極大深さを IMC の中央として求めた、隣接ビーム間の RF 信号どうしの相関値の全ビームの平均値 (平均相関関数) が最大となるときの閾値を用いて ROI の自動決定を行う。

2.3 超音波受信信号のみを用いた解析時相限定法

IMC の変位を推定する窓関数内に外膜からの信号が含まれる場合、IMC の血管径方向変位が過小に推定される。そこで、その変位推定においては、

1 心周期中に IMC が血管長軸方向に往復運動することに着目し、表面粗さを計測する時相を IMC と外膜の瞬時変位差が小さい心臓拡張期に限定することで、外膜からの信号の影響を抑制する。また、心電図などを用いず、超音波受信信号のみを用いて解析時相を自動限定する。IMC の血管径方向変位を取得した全フレームにおいて中心ビームについてのみ解析し、その自己相関関数から、計測時間中の平均的な 1 心周期の時間を推定する。その後、ある心周期の中の IMC の血管径方向変位が最大から最小になる時相を心臓拡張期として検出する。その後、推定した心臓拡張期内で IMC の血管長軸方向変位を解析する。IMC が血管長軸方向に動かない時相では表面粗さを求められないため、IMC の血管長軸方向変位波形の傾きから、表面粗さ計測への寄与が大きい IMC が頭側に大きく動く時相を求める。

2.4 実験方法

20 代健常男性 3 名, 50 代健常男性 2 名, 60 代健常男性 1 名の右総頸動脈長軸像から超音波 RF データを取得した。超音波診断装置 (ProSound F75; Hitachi Aloka, Tokyo, Japan) にリニアプローブ (UST-5415; Hitachi Aloka, Tokyo, Japan) を取り付けて計測した。中心周波数とサンプリング周波数はそれぞれ 7.5 MHz, 40 MHz である。ビームのサンプリング間隔 δx は 150 μm , フレームレートは 187 Hz とした。空間ハイパスフィルタの -6 dB における遮断周波数を 1.22 mm^{-1} とした。

3. 実験結果・考察

1 例として、20 代健常者 1 名の実験結果を示す。図(a)は平均相関関数を示す。閾値が過小・過大な場合は平均相関関数の値が低下していることが確認できる。この平均相関関数が最大となる閾値 (0.018) を用いて ROI を決定した結果を図(b)に示す。IMC からの反射信号のみを内部に含むように ROI が自動決定された。

図(c)に IMC の血管径方向変位, (d)に IMC の血管径方向変位の自己相関関数, (e)に推定した心臓拡張期における IMC の血管長軸方向変位, (f)に本手法により決定された解析時相内の IMC の血管径方向変位を示す。本手法により、解析時相を心臓拡張期内の IMC が頭側に大きく動く所望の時相に限定できた。図(g)に、従来法¹⁾および提案法を用いて計測した表面粗さを、ビームごとにそれぞれ青線、赤線で示す。提案法の方が、計測した表面粗さのビーム間のばらつきが小さいことが分かる。また、提案法では表面粗さのうちハイパスフィルタの遮断周波数よりも低い空間周波数成分は除去されている。

5. 結論

本研究では、頸動脈内腔表面粗さ超音波計測における拍動成分の除去法と、本手法の臨床応用を

目的とした計測システムの設計について検討した。提案する拍動成分の除去法により、内腔表面粗さのビーム間のばらつきが低減した。また、提案する ROI の自動決定法と解析時相の限定法は、本計測システムを利用する医療従事者の負担軽減につながる。

文献

- 1) K. Kitamura, *et. al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 51, 07GF08 (2012).
- 2) H. Kanai, *et. al.*, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 46, 1229 (1999).
- 3) J. H. Velduis and G. W. Brouland, Image Vision Comput. 17, 905 (1999).

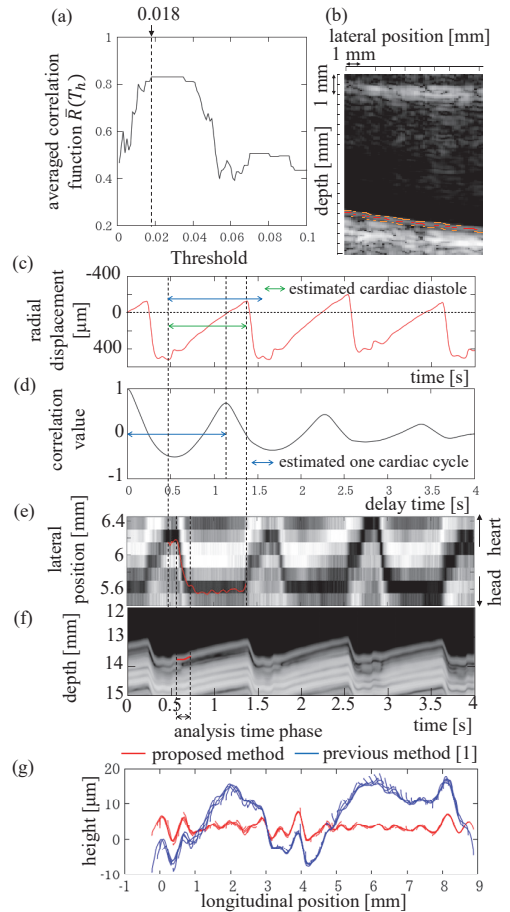


図 1: 20 代健常男性に対する実験結果. (a) 平均相関関数, (b) 平均相関関数が最大となる閾値で自動決定した ROI (赤線: ROI 中央, 橙線: ROI 内腔/外膜側), (c) IMC の血管径方向変位, (d) IMC の血管径方向変位の自己相関関数, (e) 推定した心臓拡張期における IMC の血管長軸方向変位 (赤線), (f) 提案法より限定した解析時相における IMC の血管径方向変位 (赤線), (g) ビームごとの表面粗さ計測結果 (青線: 従来法¹⁾, 赤線: 提案法).

東北大学電通談話会記録について

東北大学において八木秀次教授の下に電気通信法の研究が開始されたのは大正8年に遡る。

大正12年から斎藤報恩会の支援をうけ大きく飛躍し、今日よく知られている数々の成果があがりはじめた。電気通信法の研究が進展していくにしたがい、大正末期頃から研究発表会が毎週火曜日に開かれ、熱心な討論が行われてきた。この発表に際しては謄写版のプリント配布を行っていた。これがいろいろなルートを通して外部の関係研究者に時々配布されたので、公刊物の論文に東北大学電気火曜談話会記録という名称で引用されることが次第に多くなった。そのような経緯を経ていつのまにか、この謄写版のプリントは公式出版物として扱われるようになった。

しかし戦争のため研究発表は自然に立ち消えという形になってしまった。戦後、昭和23年頃から復活し、再び活発な討論を繰返すようになった。発表された論文のプリントを綴って東北大学電気通信研究所、工学部電気工学科、工学部通信工学科、連合談話会記録と銘を打って昭和23年に第17巻（火曜談話会記録の通算推定）として関係各方面に配布することになった。この報告はその後順調に発刊され、昭和27年度から現在の誌名となって現在に及んでいる。その間火曜談話会は工学研究会となり、現在、伝送工学研究会、音響工学研究会、仙台プラズマフォーラム、EMC仙台ゼミナール、コンピュータサイエンス研究会、システム制御研究会、情報バイオエレクトロニクス研究会、スピニクス研究会、ニューパラダイムコンピューティング研究会、超音波エレクトロニクス研究会、ブレイン機能集積工学研究会、情報・数物研究会、生体・生命工学研究会、ナノ・スピン工学研究会、先進的情報通信工学研究会の15分科会をもっている。

本誌の目的は、主に電気通信研究所の専任、兼任の教官の研究室における研究成果の発表の場の一つたることにある。その中には工学研究会で発表され討論をうけたものがすくなくない。また機関の研究活動を広く知っていただくことも主な目的の一つであり、この趣旨から最終講義、通研シンポジウムの分野展望、招待論文などを随時掲載している。

本誌は昭和27年度に現在の誌名となって以来年4回の刊行であったが、第60巻より年3回の刊行と改められ、第75巻より年2回の刊行になり現在に至っている。現在、次の編集機構をもっている。

編 集 委 員	編 集 幹 事
齋藤 浩海 吉澤 晋	堀尾 喜彦
日暮 栄治 大関 真之	吹留 博一
本間 尚文	

令和6年7月18日 作成 令和6年7月19日 発行 東北大学電通談話会記録 第93巻第1号	発行者 東北大学電気通信研究所 所長 羽入 貴弘 仙台市青葉区片平2丁目1番1号 電話 217-5420 印刷所 北日本印刷株式会社 仙台市若林区石垣町35番6 電話(代表) 224-7781
---	--

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University
Sendai, Japan