

THE RECORD OF ELECTRICAL AND
COMMUNICATION ENGINEERING CONVERSAZIONE
TÔHOKU UNIVERSITY

Vol. 92 No. 1 July 2023

東北大学電通談話会記録

第 92 卷 第 1 号

令和 5 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 92 卷 第 1 号 目 次

令和 4（2022）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					
技術社会システム					
1.	埋込磁石型磁気ギヤの高性能化・高機能化に関する研究		水穴 裕真	(中村 教授)	2
情報科学研究科					
情報基礎科学専攻					
2.	深層学習を用いた顔画像解析および顔認証に関する研究		河合 洋弥	(青木 教授)	6
システム情報科学専攻					
3.	高次感性知覚における多感覚情報統合に関する研究		阿部 翔太	(坂本 教授)	10
応用情報科学専攻					
4.	小売店舗における消費者行動の柔軟な認識システムに関する研究		温 佳昊	(菅沼 教授)	14
博士前期課程					
工学研究科					
電気エネルギーシステム専攻					
5.	電力システムの安定運用を維持する需給調整力市場に関する研究		加藤 啓太	(斎藤 教授)	18
6.	60kV級撤去CVケーブルにおける水トリー発生様相の観察と 交流損失電流の評価に関する研究		木博 翼	(斎藤 教授)	20
7.	Fe-Si薄膜における磁化ダイナミクスのSi組成依存性に関する研究		ジャン イイ	(遠藤 教授)	22
8.	複数のTEVセンサを活用した箱型筐体電力設備における 部分放電信号の到来方向研究に関する研究		白石 幸範	(斎藤 教授)	24
9.	電力システムの周波数安定化を対象とした負荷制御における 通信遅延による制御性能劣化の低減方策		堰合 賢吾	(斎藤 教授)	26
10.	電力系統周波数安定化のためのVSGによる有効な慣性力供給方法		高橋 大雅	(斎藤 教授)	28
11.	磁気ノズル中を膨張する非マクスウェル電子の熱力学特性		佃 耕介	(安藤 教授)	30
12.	配電用ポリマーがいしの表面撥水性と気象条件を考慮した 漏れ電流発生量の評価手法に関する研究		辻 知耀	(斎藤 教授)	32
13.	局所異方性測定による歪センサの動作解析		豊田 恵伍	(石山 教授)	34
14.	大口径大電力ヘリコンスラストに向けた 高周波プラズマ源開発		ナーグル タナーテット	(安藤 教授)	36
15.	風力発電機を対象にしたN-1電源制限時の 電力系統における過渡安定度向上手法		錦織 佑太	(斎藤 教授)	38
16.	頭部傾斜型前庭感覚提示システム利用時における感覚特性に関する研究		福島 知明	(杉田 教授)	40
17.	永久磁石リラクタンسジェネレータの制御法に関する研究		包 思遠	(中村 教授)	42

18. 高純度Fe薄帯における構造と磁気特性の熱処理効果に関する研究	馬 小童 (遠藤 教授)	44
通信工学専攻		
19. 超100GHz CMOS増幅器用回路素子モデリングに関する研究	青木 拓海 (末松 教授)	46
20. ミリ波オンチップアンテナの放射パターン測定系に関する研究	石森 晃 (末松 教授)	48
21. 下り回線における複数スモールセル基地局間の 干渉を考慮した周波数割当に関する研究	伊藤 栄輔 (西山 教授)	50
22. 共通鍵暗号モジュールに対する深層学習を用いた 高精度サイドチャンネル解析に関する研究	蝦名 克海 (本間 ^尚 教授)	52
23. ストカスティック演算に基づく大規模組合せ最適化問題の 高速求解に関する研究	勝木 康太 (羽生 教授)	54
24. 大容量分散ストレージシステムのデータアクセス性能に 関する研究	川田 悠貴 (田中 ^陽 教授)	56
25. シリコン光導波路を用いたスクイズド光源に関する研究	木村 彰吾 (山田 教授)	58
26. 遅延耐性ネットワークにおけるデータ到達確率向上のための 中継端末選択に関する研究	斉藤 陽 (西山 教授)	60
27. 光・無線融合フルコヒーレント伝送に関する研究	佐藤 大晟 (廣岡 教授)	62
28. グラフェンチャネルFETのゲートスタックプロセス高度化と その高速・高感度THz波検出への応用に関する研究	田村 紘一 (尾辻 教授)	64
29. 確率的暗号化状態処理の実装に関する研究	田村 佑樹 (本間 ^尚 教授)	66
30. 光注入同期の偏波無依存化に関する研究	長屋 輝 (廣岡 教授)	68
31. 耐量子計算機性暗号モジュールの安全性評価に関する研究	田中裕太郎 (本間 ^尚 教授)	70
32. メモリ暗号化スキームの実装理論に関する研究	羽田 大倫 (本間 ^尚 教授)	72
33. 多モードファイバにおけるGAWBS雑音特性に関する研究	平井 孝明 (廣岡 教授)	74
34. 無線IoTセンサノード検出用Wi-Fiバックスキャット受信機に 関する研究	藤谷 雄紀 (末松 教授)	76
35. 中赤外分光による皮膚ガス計測に関する研究	布施 堯之 (松浦 教授)	78
36. 量子カスケードレーザを用いた中赤外光音響分光法による血中成分分析	前野 雅信 (松浦 教授)	80
37. 基地局機能分離下でのクラスタを考慮した周波数割当に関する研究	眞尾 幸佑 (西山 教授)	82
38. 基地局機能分離環境における端末収容と帯域割当に関する研究	松澤 和泉 (西山 教授)	84
39. 無線アクセスバックホール統合伝送における無線資源割当に関する研究	八島 拓也 (西山 教授)	86
電子工学専攻		
40. 外部磁場を用いた鎖状鉄ナノ粒子の合成	赤星 栄治 (齊藤 教授)	88
41. 次世代通信デバイスのモノリシック集積化に向けた SiC上グラフェンの電波送受信機能に関する研究	石田 智也 (佐藤 教授)	90
42. 植物免疫制御に向けたプラズマ合成五酸化二窒素に対する 植物早期応答解明	岩本 拓仁 (金子 教授)	92
43. プラズマ活用その場観測CVDによる機能化二次元シート材料の 高品質合成	岩本 祐汰 (金子 教授)	94
44. ランダム構造探索法による新奇ホウ化物超伝導体の理論研究	上原 健也 (白井 教授)	96
45. 走査型非線形誘電率顕微鏡による Al ₂ O ₃ /ダイヤモンド界面の微視的評価に関する研究	尾形 結友 (白井 教授)	98
46. (W-Zn) 酸化物の複合薄膜形成と光触媒作用	角田 聖 (齊藤 教授)	100
47. 日常モニタリングのための慣性センサを用いた 歩容変化の検出と分類に関する研究	片山 堅斗 (渡邊 教授)	102

48.	不活性雰囲気でのコールドスプレー法により 作製したナノ結晶集合体の組織と軟磁気特性	久留宮悠平 (齊藤)	教授	104
49.	六方晶窒化ホウ素へのグラフェンのヘテロエピ成長と それを用いたデバイス応用への研究	小濱 路生 (佐藤)	教授	106
50.	座位での下手投げ動作の機能的電気刺激制御に関する基礎研究	近藤 友樹 (渡邊)	教授	108
51.	混合変調半導体レーザーの変調帯域拡大に関する研究	島 卓未 (八坂)	教授	110
52.	グラフェンと非熱平衡流動相との界面における発電特性	武田 光流 (齊藤)	教授	112
53.	強磁性体/絶縁体接合における交換相互作用の 機械学習モデルに関する研究	中村 友哉 (白井)	教授	114
54.	熱延伸法を用いたプローブ型 多機能電気化学デバイスの開発に関する研究	西本 理乃 (吉信)	教授	116
55.	窒素固定反応のための液面非熱プラズマ生成	藤田 立樹 (金子)	教授	118
56.	感覚運動制御を担うレザバーニューラルネットワークの 構造最適化に関する研究	藤本ありさ (佐藤)	教授	120
57.	自動分注機構を有するマルチチャンバ構造と 化学イメージセンサを用いた生菌濃度測定	堀江 洋太 (吉信)	教授	122
58.	ヒータ加熱を援用したホットカソードRFスパッタ法による 酸化物および窒化物薄膜の成膜速度の高速化	宮崎 大輝 (齊藤)	教授	124
59.	ジョセフソン伝送線路を用いた物理リザバーに関する基礎的研究	渡邊 紘基 (佐藤)	教授	126
60.	慣性センサを用いたニューラルネットワークによる 歩行中の体重心位置推定に関する研究	渡邊 駿典 (渡邊)	教授	128

技術社会システム専攻

61.	エアモビリティ駆動システム用回転機に関する研究	朝雛えみり (中村)	教授	130
62.	高SNR・高速グローバルシャッタCMOSイメージセンサと 流体濃度分布計測応用に関する研究	及川 哲 (中村)	教授	132
63.	磁気回路解析の高精度化のための動的ヒステリシスモデル および磁気特性測定手法に関する研究	川口 正隆 (中村)	教授	134
64.	顔映像を用いた非接触式血中酸素飽和度測定法	佐々木颯馬 (中村)	教授	136
65.	小型EV用アキシヤルギャップ型SRモータの運転領域拡大に関する研究	中澤 貫太 (中村)	教授	138
66.	高感度・広ダイナミックレンジ軟X線CMOSイメージセンサと その低ノイズ・高効率信号読み出しに関する研究	原田 将真 (中村)	教授	140
67.	高SNR・広ダイナミックレンジCMOSイメージセンサの 3次元高集積構造と非破壊光量判定機能に関する研究	堀江 駿斗 (中村)	教授	142
68.	LLG方程式に基づく磁気ヒステリシスの算定精度向上に関する研究	渡部 樹 (中村)	教授	144
69.	全セル同時駆動型近接容量センサとその応用に関する研究	渡部 吉祥 (中村)	教授	146

情報科学研究科

情報基礎科学専攻

70.	スパースイジングモデルベース量子アニーリングシミュレーションの ための直接マッピングアーキテクチャ	大間 祐太 (張山)	教授	148
71.	虹彩および眼周囲画像を用いた個人認証に関する研究	川上 庄慶 (青木)	教授	150
72.	LPWAを用いたIoT機器のための 移動エージェントフレームワークに関する研究	坂本 和也 (長谷川)	教授	152
73.	畳み込みニューラルネットワークを用いた 指紋認証の高性能化に関する研究	流石 凜彩 (青木)	教授	154

74. 購買行動予測のための機械学習ベース マルチエージェントシミュレーション	庄司 航太 (張山)	教授	156
75. 深層学習を用いた画像対応付けと3次元復元への応用に関する研究	星 秀平 (青木)	教授	158
76. 画像認識に基づくブランクトンモニタリングに関する研究	吉田凌太郎 (青木)	教授	160
77. 顔認証におけるなりすまし攻撃検知の高精度化に関する研究	渡邊 浩太 (青木)	教授	162

システム情報科学専攻

78. 記憶を制限した神経衰弱における戦略の解析	浦田 智稀 (篠原)	教授	164
79. ドメインに特化したテキスト圧縮器の生成に関する研究	江上 尚志 (篠原)	教授	166
80. 3次元音空間の印象を規定する物理要因に関する基礎的研究	沖田 歩 (坂本)	教授	168
81. 深層強化学習を用いた人狼ゲームエージェントの構築に関する研究	工藤 海斗 (周)	教授	170
82. 文字列検索の索引構造からテキストを求める問題に関する研究	熊谷滉士郎 (篠原)	教授	172
83. 聴覚オブジェクト認知を考慮した 音コンテンツ空間化に関する基礎的研究	栗林 真幸 (坂本)	教授	174
84. グラフの耐故障分割問題に関する研究	佐藤 勇人 (伊藤)	教授	176
85. 相乗りにおける割り当てアルゴリズムに関する研究	菅原 直希 (周)	教授	178
86. 球状アレイを用いた音源分離アルゴリズムの 実装方法が分離性能に及ぼす影響	武元 航 (坂本)	教授	180
87. ベクトルシンボル構造を用いたパターンマッチングに関する研究	田中 聡 (篠原)	教授	182
88. 耐故障性を持つ配電経路の策定アルゴリズムに関する研究	野崎 哲平 (伊藤)	教授	184
89. グラフ上の拡散競争におけるナッシュ均衡存在判定問題に関する研究	松崎 雄大 (周)	教授	186
90. 自己運動の物理的および主観的規定因が 頭部回転中の音空間知覚に及ぼす影響	守部颯一郎 (坂本)	教授	188
91. 組合せ遷移の枠組みによる点彩色の最適化に関する研究	柳澤 佑介 (周)	教授	190
92. 可笑しみのある音声の合成法に関する基礎的研究	渡邊 悠希 (坂本)	教授	192

応用情報科学専攻

93. 様々な速度の対象に対応可能な時空間情報に基づく移動物体検出手法	遠藤 広人 (菅沼)	教授	194
94. ベイズ最適化を用いた量子化学計算における Domain Foldingアルゴリズムの拡張	川島 祐輝 (田中(和))	教授	196
95. デジタルツインの概念に基づく インテリアデザイン支援システムに関する研究	曾根 悠生 (菅沼)	教授	198
96. 入力系列の時間構造に対する時空間学習則の シナプス結合重み空間について	熊谷 太翼 (堀尾)	教授	200
97. マルチエージェントに基づく学習データ流通基盤に関する研究	本田 光来 (菅沼)	教授	202

医工学研究科

医工学専攻

98. フィードバック誤差学習型FES制御器の適用法の 簡略化に関する基礎研究	井口 俊吾 (渡邊)	教授	204
99. Bluetooth電波を用いた端末装着不要な 屋内位置推定に関する研究	梅原 優佑 (本間(経))	教授	206
100. 長尺中空光ファイバガスセルを用いた中赤外吸収分光法による 高感度ガス計測の研究	大村 勇索 (松浦)	教授	208
101. 転移リンパ節に対する局所放射線免疫療法に関する研究	栗生 晏暉 (小玉)	教授	210

102.	粒子フィルタに基づくX線動画画像中の 3次元体内構造変動の推定法に関する研究	篠原 匠 (本間 ^(経) 教授)	212
103.	血管壁粘弾性特性の血圧依存性の超音波計測に関する研究	鈴木 沙綺 (金井 教授)	214
104.	微小流路内における細胞層バリア機能の インピーダンス評価に関する研究	阪東 怜奈 (吉信 教授)	216
105.	慣性センサを用いた深層学習による歩行事象検出法の 片麻痺者への適用に関する基礎研究	樋口 健 (渡邊 教授)	218

VOL. 92 No. 1

CONTENTS

Summary of Doctor-Course Dissertations '22

Yuma MIZUANA (Supervisor : K. NAKAMURA)

- A Study on Performance and Functionality Improvement of Interior Permanent Magnet
Magnetic Gear 2

Hiroya KAWAI (Supervisor : T. AOKI)

- Face Image Analysis and Face Recognition Using Deep Learning 6

Shota ABE (Supervisor : S. SAKAMOTO)

- A study on multisensory integration in high-level perception of reality 10

Jiahao WEN (Supervisor : T. SUGANUMA)

- A Study on Flexible Recognition System for Customer Activity in Retail Environments 14

Summary of Master-Course Dissertations '22

Keita KATO (Supervisor : H. SAITOH)

- Study of Reserve Markets for Maintaining Reliable Operation of the Power System 18

Tsubasa KOGURE (Supervisor : H. SAITOH)

- Study on Observation of Water Trees Occurrence and Evaluation of AC Loss Current in 60kV
Class Removed XLPE Cable 20

Ye JIANG (Supervisor : Y. ENDO)

- Study on effect of Si composition on magnetization dynamics of various thick Fe-Si polycrystalline
films 22

Yukinori SHIRAISHI (Supervisor : H. SAITOH)

- Study on Estimating the Arrival Direction of Partial Discharge Signals in Box Housing Power
Facilities Utilizing Multiple TEV Sensors 24

Kengo SEKIAI (Supervisor : H. SAITOH)

- Method for Suppressing Control Performance Degradation due to Communication Delay in Load
Control for Frequency Stabilization of Power System 26

Hiromasa TAKAHASHI (Supervisor : H. SAITOH)

- Effective Inertia Power Supply Method by VSG for Power System Frequency Stabilization 28

Kosuke TSUKUDA (Supervisor : A. ANDO)

- Thermodynamic property of non-maxwellian electrons expanding in a magnetic nozzle 30

Kazuaki TSUJI (Supervisor : H. SAITOH)

- Study on Evaluation Method of Leakage Current Generated Considering Surface Hydrophobicity
and Weather Conditions of Polymeric Insulator for Power Distribution 32

Keigo TOYODA (Supervisor : K. ISHIYAMA)

- Analysis of Strain Sensor Operation by Local Anisotropy Measurement 34

Thanatith NAKUL (Supervisor : A. ANDO)

- Development of Radiofrequency Plasma Source toward a Large-Diameter and High-Power
Helicon Plasma Thruster 36

Yuta NISHIKIORI (Supervisor : H. SAITOH)	
A Method for Improving Transient Stability of Power System under N-1 Generation Control	38
Tomoaki FUKUSHIMA (Supervisor : N. SUGITA)	
A study on the sensory characteristics related to the use of head-tilted vestibular sensation prompting system	40
Siyuan BAO (Supervisor : K. NAKAMURA)	
A Study of Permanent Magnet Reluctance Generator Control Strategy	42
Xiaotong MA (Supervisor : Y. ENDO)	
Study on the Effect of Annealing Temperature on Structure and Magnetic Properties of High-purity Fe Ribbons	44
Takumi AOKI (Supervisor : N. SUEMATSU)	
Study on Circuit Modeling for over 100 GHz band CMOS Amplifiers	46
Teru ISHIMORI (Supervisor : N. SUEMATSU)	
A Study on Radiation Pattern Measurement System for Millimeter-Wave On-Chip Antenna	48
Eisuke ITO (Supervisor : H. NISHIYAMA)	
A Study on Frequency Allocation Considering Downlink Interference among Multiple Small Cell Base Stations	50
Katsumi EBINA (Supervisor : N. HOMMA)	
Deep Learning based Accurate Side-channel Analysis on Common Key Cryptographic Modules	52
Kota KATSUKI (Supervisor : T. HANYU)	
Research on high-speed solution for large-scale combinatorial optimization problems based on stochastic operations	54
Yuki KAWADA (Supervisor : Y. TANAKA)	
Study on data access performance of high-capacity distributed storage	56
Shogo KIMURA (Supervisor : H. YAMADA)	
Study on Squeezed Light Source Using a Silicon Optical Waveguide	58
Akira SAITO (Supervisor : H. NISHIYAMA)	
A Study on Relay Node Selection for Improving Data Arrival Probability in Delay/ Disruption-Tolerant Networking	60
Taisei SATO (Supervisor : T. HIROOKA)	
Study on Coherently-Linked Optical and Wireless Transmission	62
Koichi TAMURA (Supervisor : T. OTSUJI)	
Study on Graphene FET Gate Stack Process Technology and its Application for Fast and Sensitive THz Detection	64
Yuki TAMURA (Supervisor : N. HOMMA)	
Implementation of Encrypted Data Processing based on Stochastic Computing	66
Hikaru NAGAYA (Supervisor : T. HIROOKA)	
A Study on Polarization Independent Optical Injection Locking	68
Yutaro TANAKA (Supervisor : N. HOMMA)	
Security Evaluation of Post-Quantum KEMs Module	70
Hiromichi HANEDA (Supervisor : N. HOMMA)	
A Study on Implementation Theory of Memory Encryption Scheme	72
Takaaki HIRAI (Supervisor : T. HIROOKA)	
Study on GAWBS Noise Characteristics in Multi-mode Fiber	74
Yuki FUJIYA (Supervisor : N. SUEMATSU)	
A Study on Wi-Fi Backscatter Receiver for Wireless IoT Sensor Node Detection	76
Takayuki FUSE (Supervisor : Y. MATSUURA)	
Skin gas measurement based on mid-infrared spectroscopy	78
Masanobu MAENO (Supervisor : Y. MATSUURA)	
Analysis of blood components by mid-infrared photoacoustic spectroscopy using a quantum cascade laser	80

Kosuke MASHIO (Supervisor : H. NISHIYAMA)	
A Study on Frequency Allocation Considering Clusters in Radio Access Network Disaggregation	82
Izumi MATSUZAWA (Supervisor : H. NISHIYAMA)	
A Study on User Equipment Accommodation and Bandwidth Allocation in Environments with Radio Access Network Disaggregation	84
Takuya YASHIMA (Supervisor : H. NISHIYAMA)	
A Study on Radio Resource Partitioning in Integrated Access and Backhaul	86
Eiji AKAHOSHI (Supervisor : S. SAITO)	
Synthesis of chain-like iron nanoparticles using an external magnetic field	88
Tomoya ISHITA (Supervisor : S. SAITO)	
Study on Radio Wave Transmitting and Receiving Functions of Graphene on SiC for Monolithic Integration of Next Generation Communication Devices	90
Hiroto IWAMOTO (Supervisor : T. KANEKO)	
Investigation of Initial Responses in Plants Exposed to Plasma-Synthesized Dinitrogen Pentoxide	92
Yuta IWAMOTO (Supervisor : T. KANEKO)	
High Quality Synthesis of Functionalized 2D Sheet Materials by Plasma Assisted In-Situ CVD	94
Kenya UEHARA (Supervisor : M. SHIRAI)	
Theoretical Study of Novel Superconducting Borides by Random Structure Searching	96
Yu OGATA (Supervisor : M. SHIRAI)	
Study on Microscopic Evaluation of Al ₂ O ₃ /Diamond Interface using Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy	98
Sho KAKUTA (Supervisor : S. SAITO)	
Formation of (W-Zn) oxide composite thin film and its photocatalysis	100
Kento KATAYAMA (Supervisor : T. WATANABE)	
A Study on Detection and Classification of Gait Change Using an Inertial Sensor for Daily Monitoring	102
Yuhei KURUMIYA (Supervisor : S. SAITO)	
Microstructure and Softmagnetics of Nanocrystalline Assemblies Prepared by Cold Spraying in Inert Atmosphere	104
Roki KOHAMA (Supervisor : S. SAITO)	
A Study on Graphene Hetero-epitaxial Growth on Hexagonal Boron Nitride and its Application to Devices	106
Tomoki KONDO (Supervisor : T. WATANABE)	
A Basic Study on Functional Electrical Stimulation Control of Underhand Throwing Movement in the Sitting Position	108
Takumi SHIMA (Supervisor : H. YASAKA)	
Study on Modulation Bandwidth Expansion of Hybrid Modulation Semiconductor Laser	110
Hikaru TAKEDA (Supervisor : S. SAITO)	
Characteristics of Power Generation at the Interface between Graphene and Non-Thermal Equilibrium Fluid Phase	112
Yuya NAKAMURA (Supervisor : M. SHIRAI)	
Study on machine learning model of exchange interaction in ferromagnetic/insulator junction	114
Rino NISHIMOTO (Supervisor : T. YOSHINOBU)	
Development of Probe-Type Multifunctional Electrochemical Devices Using Thermal Drawing Method	116
Ritsuki FUJITA (Supervisor : T. KANEKO)	
Non-thermal Plasma Generation at Liquid Interface for Nitrogen Fixation	118
Arisa FUJIMOTO (Supervisor : S. SAITO)	
Study on Optimization of Reservoir Neural Network Structure for Sensorimotor Control	120

Yohta HORIE (Supervisor : T. YOSHINOBU)	
Measurement of Viable Bacteria Concentration Using a Multi-Chamber Structure with Automated Dispensing Mechanism and a Chemical Image Sensor	122
Daiki MIYAZAKI (Supervisor : S. SAITO)	
High Rate Deposition of Oxide and Nitride Thin Films by Heater-Assisted Hot Cathode RF Sputtering	124
Kohki WATANABE (Supervisor : S. SATO)	
A Basic Study on Physical Reservoir Computing using Josephson Transmission Line	126
Toshinori WATANABE (Supervisor : T. WATANABE)	
A Study on Estimation of the Center of Mass Position During Walking Using Inertial Sensors with Neural Network	128
Emiri ASAHINA (Supervisor : K. NAKAMURA)	
A Study of Rotating Machines for Air Mobility Drive System	130
Tetsu OIKAWA (Supervisor : K. NAKAMURA)	
A Study on High SNR High Speed Global Shutter CMOS Image Sensors and Applications for Fluid Concentration Distribution Measurements	132
Masataka KAWAGUCHI (Supervisor : K. NAKAMURA)	
A Study of Dynamic Hysteresis Model and Magnetic Characteristic Measurement Method for High-Accuracy Magnetic Circuit Analysis	134
Soma SASAKI (Supervisor : K. NAKAMURA)	
Non-Contact Measurement of Blood Oxygen Saturation Using Facial Video	136
Kanta NAKAZAWA (Supervisor : K. NAKAMURA)	
A Study of Expanding the Operating Range of Axial-Flux type SR Motor for Compact EV	138
Shoma HARADA (Supervisor : K. NAKAMURA)	
A Study on High Sensitivity Wide Dynamic Range Soft X-ray CMOS Image Sensors and Low Noise High Efficiency Signal Readout Thereof	140
Hayato HORIE (Supervisor : K. NAKAMURA)	
A Study on 3D Highly Integrated Structure and Non-destructive Light Intensity Determination Function of High SNR Wide Dynamic Range CMOS Image Sensors	142
Itsuki WATANABE (Supervisor : K. NAKAMURA)	
A Study of Calculation Accuracy Improvement of Magnetic Hysteresis based on LLG Equation	144
Yoshiaki WATANABE (Supervisor : K. NAKAMURA)	
A Study on Proximity Capacitance Sensors of Simultaneous Driving Cell Type and Applications Thereof	146
Yuta OHMA (Supervisor : M. HARIYAMA)	
Direct Mapping Architecture for Sparse-Ising-Model-Based Quantum Annealing Simulation	148
Shokei KAWAKAMI (Supervisor : T. AOKI)	
Person Authentication Using Iris and Periocular Images	150
Kazuya SAKAMOTO (Supervisor : G. HASEGAWA)	
Research on Mobile Agent Framework for IoT Devices over LPWA	152
Nagisa SASUGA (Supervisor : T. AOKI)	
Performance Improvement of Fingerprint Recognition Using Convolutional Neural Network	154
Kota SHOJI (Supervisor : M. HARIYAMA)	
Machine-Learning-Based Multi-Agent Simulation for Purchasing Behavior Prediction	156
Shuhei HOSHI (Supervisor : T. AOKI)	
Image Correspondence Using Deep Learning and Its Application to 3D Reconstruction	158
Ryotaro YOSHIDA (Supervisor : T. AOKI)	
Plankton Monitoring Based on Image Recognition	160

Kota WATANABE (Supervisor : T. AOKI)	
Accuracy Improvement of Spoofing Attack Detection for Face Recognition	162
Tomoki URATA (Supervisor : A. SHINOHARA)	
Strategy of the memory game when players' memory is limited	164
Takashi EGAMI (Supervisor : A. SHINOHARA)	
Research on generating domain-specific text compressors	166
Ayumu OKITA (Supervisor : S. SAKAMOTO)	
The Effects of Acoustical Physical Parameters on the Perceptual Impression of Three-Dimensional Sound Space	168
Kaito KUDO (Supervisor : X. ZHOU)	
A Study on the Construction of Werewolf Game Agents Using Deep Reinforcement Learning	170
Koshiro KUMAGAI (Supervisor : A. SHINOHARA)	
Inferring strings from position heaps in linear time	172
Masaki KURIBAYASHI (Supervisor : S. SAKAMOTO)	
A Fundamental Study on Sound Content Spatialization Method Based on Auditory Object Perception	174
Hayato SATO (Supervisor : T. ITO)	
A Study on Fault-Tolerant Partitioning Problem of Graphs	176
Naoki SUGAWARA (Supervisor : X. ZHOU)	
Algorithms for Finding Ride-Sharing Assignment	178
Wataru TAKEMOTO (Supervisor : S. SAKAMOTO)	
The Effect of the Implementation Method of Sound Source Separation Algorithm Using a Spherical Microphone Array on the Separation Performance	180
Soh TANAKA (Supervisor : A. SHINOHARA)	
Research on pattern matching using Vector Symbolic Architectures	182
Teppei NOZAKI (Supervisor : T. ITO)	
Research on Algorithms for Fault-Tolerant Distribution Routes in Electrical Distribution Networks	184
Yudai MATSUZAKI (Supervisor : X. ZHOU)	
On the Decision Problem Determining the Existence of a Nash Equilibrium for Competitive Diffusion on Graphs	186
Soichiro MORIBE (Supervisor : S. SAKAMOTO)	
Effects of Objective and Subjective Characteristics of Self-motion on Sound Space Perception during Head Rotation	188
Yusuke YANAGISAWA (Supervisor : X. ZHOU)	
Optimization of Vertex-Coloring Under the Reconfiguration Framework	190
Yuki WATANABE (Supervisor : S. SAKAMOTO)	
A Fundamental Study on Synthesis of Humorous Voices	192
Hiroto ENDO (Supervisor : T. SUGANUMA)	
Moving Object Detection Method Based on Spatio-temporal Information for Various Speed Targets	194
Yuki KAWASHIMA (Supervisor : K. TANAKA)	
Extension of Domain Folding Algorithm for Quantum Chemical Calculations Using Bayesian Optimization	196
Yuki SONE (Supervisor : T. SUGANUMA)	
Research on Interior Design System Based on the Concept of Digital Twin	198
Daisuke KUMAGAI (Supervisor : Y. HORIO)	
Effects of temporal structure in input series on synaptic weight space formed through spatio-temporal learning rule	200

Miku HONDA (Supervisor : T. SUGANUMA)	
A Study on Multi-agent Based Learning Data Sharing Infrastructure	202
Shungo IGUCHI (Supervisor : T. WATANABE)	
A Basic Study on Simplification of Application Method of Feedback Error Learning FES Controller	204
Yusuke UMEHARA (Supervisor : N. HOMMA)	
A study on indoor localization by using Bluetooth radio waves without wearing a device	206
Yusaku OMURA (Supervisor : Y. MATSUURA)	
Highly sensitive gas measurement by mid-infrared absorption spectroscopy using a long hollow optical fiber gas cell	208
Shizuki KURIU (Supervisor : T. KODAMA)	
A Study on Local Radioimmunotherapy for Metastatic Lymph Node	210
Takumi SHINOHARA (Supervisor : N. HOMMA)	
A Study on Particle Filter-based Estimation Method for Three-dimensional Motion of the Internal Body Structures in X-ray Image Sequence.....	212
Saki SUZUKI (Supervisor : H. KANAI)	
A Study on Ultrasonic Measurement of Blood Pressure Dependence on Viscoelastic Properties of Vascular Wall	214
Reina BANDO (Supervisor : T. YOSHINOBU)	
Characterization of the barrier function of a cell layer in terms of its impedance measured in a microfluidic channel	216
Ken HIGUCHI (Supervisor : T. WATANABE)	
A Basic Study on Application of Gait Events Detection Method by Deep Learning Using Inertial Sensor to Hemiplegics	218

令和 4 (2022) 年度学位論文関連短編

博士学位論文要約（令和5年3月）

埋込磁石型磁気ギヤの高性能化・高機能化に関する研究

水穴 裕真

指導教員：中村 健二

A Study on Performance and Functionality Improvement of Interior Permanent Magnet Magnetic Gear

Yuma MIZUANA

Supervisor: Kenji NAKAMURA

Magnetic gears can transmit power without any mechanical contact. Therefore, acoustic noise and vibration are lower, and maintainability is higher than mechanical gears. In particular, a flux-modulated type magnetic gear is expected to be put into practical use due to higher torque density in comparison with conventional magnetic gears. In this study, we discussed performance and functionality improvements of interior permanent magnet (IPM) magnetic gear. Various examination for the torque and efficiency improvements of IPM magnetic gear are carried out by using finite element method (FEM), and the validity is proved by experiment. In addition, a novel induction/synchronous magnetic gear with a cage rotor bar is proposed in order to improve the restarting performance of magnetic gear after stalling. The prototype tests and analysis using FEM are conducted.

1. はじめに

磁気ギヤは非接触で動力伝達可能であるため、振動・騒音が小さく、摩擦や発塵がない。また、潤滑油系統が不要であり、保守性の向上が期待できる。その中でも、磁束変調型磁気ギヤは、すべての内外回転子磁石がトルク伝達に寄与するため、他種の磁気ギヤに比べてトルク密度や効率が¹⁾高く、実用化が期待されている。

磁束変調型磁気ギヤは原理上、非同期の高調波磁束に由来する磁石渦電流損が生じることが知られている。先行研究²⁾では、磁石渦電流損の低減を目的として、磁石を鉄心内部に埋め込んだ埋込磁石型 (IPM) 磁気ギヤが提案されている。しかしながら、磁気ギヤの IPM 化に伴い、有効磁束の減少によるトルクの低下が懸念される。加えて、解析による評価のみであり、実機での検証は行われていない。また、磁気ギヤは過大な負荷がかかった際に脱調して動力伝達を遮断するトルクリミッタ機能を有しているが、脱調後は負荷を相当程度取り除かない限り、再始動することができない。

本研究では、IPM 磁気ギヤの高性能化・高機能化を目的として各種検討を行った。初めに、FEM を用いて、IPM 磁気ギヤの課題分析および高性能化に関する検討を行った。次いで、埋込磁石型磁気ギヤの試作・試験を行った。最後に、脱調後の再始動性向上を目的として、磁気ギヤの回転子にかご形導体を付加した誘導同期磁気ギヤを新たに提案し、実機による実験や FEM による検証を行った。

2. IPM 磁気ギヤの高性能化に関する検討

図 1 に、従来構造の IPM 磁気ギヤの諸元を示す。内外回転子の極対数はそれぞれ 3 と 31 であり、ギヤ比は 10.33 となる。直径は 150 mm、軸長は 25 mm である。ポールピースおよび回転子鉄心の材質はそれぞれ圧粉磁心 (SMC) と無方向性ケイ素鋼板 (35A250) であり、磁石材料はネオジム焼結磁石 (Nd-Fe-B) である。内外回転子磁石を同極対向させてスポーク状に埋め込み、幅 1 mm の磁気ブリッジをギャップ側に設けた構造となっている。また、磁石磁束の短絡を防止するため、バックヨークには非磁性のステンレスを用いている。

図 1 に示した従来構造の IPM 磁気ギヤについて、FEM による課題解析を行った。その結果、磁石磁束の一部が磁気ブリッジを通過することでトルクに寄与する有効磁束が減少していること、内側回転子において軸方向への漏れ磁束が大きいこと、ポールピースで生じる鉄損が大きいことの 3 点が、従来の IPM 構造の問題点であることを明らかにした。

Outer rotor	
Inner rotor	
Pole-pieces	
Gear ratio	10.33
Outer diameter	150 mm
Axial length	25 mm
Bridge width	1 mm
Air gaps	2 mm (inner) 1 mm (outer)
Inner pole-pairs	3
Outer pole-pairs	31
Number of pole-pieces	34
Core material	35A250
Pole-piece material	Dust core
Magnet material	Sintered Nd-Fe-B

図 1 従来構造の IPM 磁気ギヤの諸元

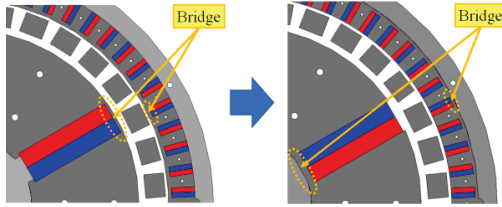


図2 磁気ブリッジ位置の変更

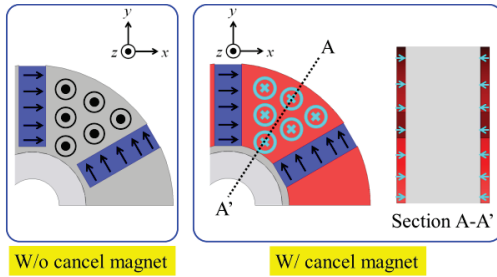


図3 軸方向の漏れ磁束の低減策

従来のIPM構造の問題点に基づき、図1のIPM磁気ギヤに対して、3つの性能向上策を導入した。まず、図2に示すように、磁気ブリッジ位置をギャップ側から非磁性ヨーク側に変更することで、有効磁束を増加させた³⁾。次いで、図3に示すように、内側回転子鉄心の側面に磁石を貼り付けることで、軸方向の漏れ磁束を低減させるとともに、トルクを向上させた⁴⁾。最後に、軟磁性材料の中でも鉄損が小さいアモルファス合金を回転子鉄心およびポールピースに適用することで、鉄損を低減させるとともに、トルクを向上させた⁵⁾。上記の性能向上策を組み合わせることで、図1に示した従来構造のIPM磁気ギヤと比べて、最大トルクは計算上、約42%向上した。

3. IPM磁気ギヤの試作試験

図4に、試作したIPM磁気ギヤの外観を示す。磁気ギヤは計7台試作した。また、外側非磁性ヨークおよび支持部材には、軽量かつ高強度であり、優れた電気特性を有する繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Plastic: FRP)を用いた。

図5に、実験システム構成を示す。入力側には、サーボモータを接続し、磁気ギヤを任意の速度で回転させる。出力側には、ヒステリシスブレーキを接続し、所望の負荷トルクを印加する。入出力軸には、それぞれトルクメータを接続し、内外回転数および入出力トルクを測定する。入力側を低速・大トルクの外側回転子、出力側を高速・低トルクの内側回転子とし、磁気ギヤを増速動作させて実験を行った。

図6に、内側回転数を300rpmで一定としたまま、負荷を徐々に増やしたときの、内外回転子のトルクの時間変化を示す。なお、試作機1が図1に示した従来のIPM磁気ギヤ、試作機7が3つの性能向上策

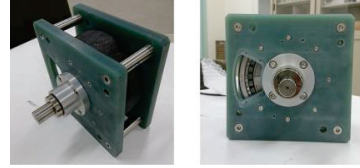


図4 試作したIPM磁気ギヤの外観

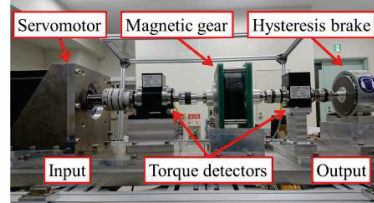
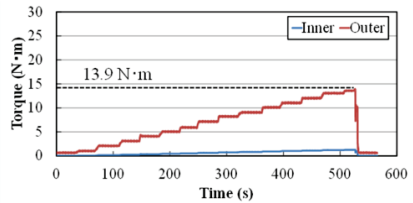
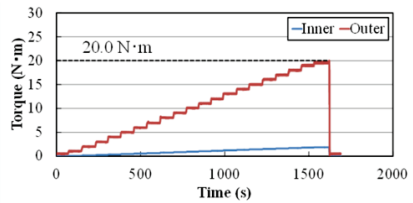


図5 実験システムの構成



(a) 試作機1



(b) 試作機2

図6 トルクの時間変化(内側回転子:300rpm)

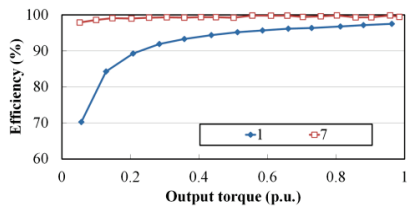


図7 効率の測定結果(内側回転子:100rpm)

すべてを導入したIPM磁気ギヤである。同図より、外側回転子の最大トルクは、試作機1が13.9N・mであるのに対し、試作機7は20.0N・mであり、トルク性能が約44%向上していることがわかる。

図7に、効率の測定結果を示す。内側回転数は100rpm一定である。同図を見ると、従来のIPM磁気ギヤである試作機1に比べて、すべての性能向上策を導入した試作機7の方が高効率であることがわかる。また、試作機7の最大効率は99.85%に達した。

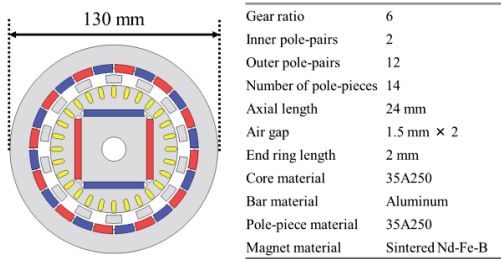


図 8 原理検証機の諸元

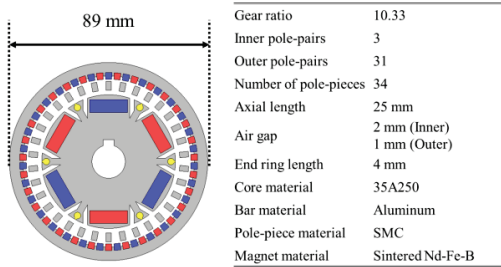


図 9 改良機の諸元

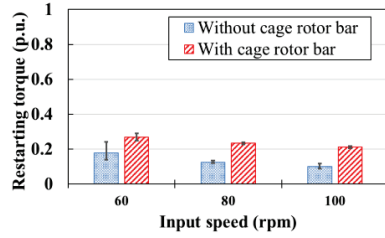
4. IPM 磁気ギヤの再始動性向上に関する検討

本節では、脱調後の再始動性向上を目的として、磁気ギヤの回転子にかご形導体を付加した誘導同期磁気ギヤを提案し、各種検討を行う⁹⁾。

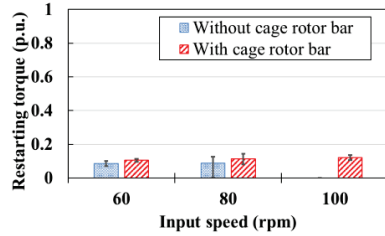
初めに、誘導同期磁気ギヤの試作・試験を行った。図 8 に、原理検証機の諸元を示す。内外回転子の極対数はそれぞれ 2 と 12 であり、ギヤ比は 6 である。内側回転子には 28 本のアルミ導体バーが周方向に等間隔で配置されている。エンドリングの厚さは 2 mm である。図 9 に、トルクと効率の改善を目的とした改良機の諸元を示す。内外回転子の極対数はそれぞれ 3 と 31 であり、ギヤ比は 10.33 である。伝達トルク改善のため、内側磁石をギャップ面に近づけている。また、効率改善のため、導体バーの本数を 28 本から 6 本に減らしている。

図 10 に、復帰トルクの測定結果を示す。復帰トルクとは、磁気ギヤを一度脱調させてから負荷を下げていき、内外回転子が再度同期したときのトルクである。本研究では、この復帰トルクを再始動性の評価指標とする。入力回転数を 60 rpm、80 rpm、100 rpm とし、各回転数で 10 回ずつ測定を行った。棒グラフは測定結果の平均値、エラーバーは測定結果のばらつきである。同図を見ると、いずれの回転数においても誘導同期磁気ギヤの方が通常の磁気ギヤよりも復帰トルクが大きいのことがわかる。脱調後の再始動性が向上しており、誘導同期磁気ギヤの有用性が明らかとなった。

図 11 に、最大トルク密度の測定結果を示す。

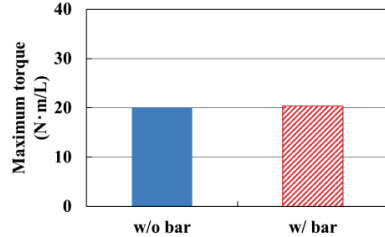


(a) 原理検証機

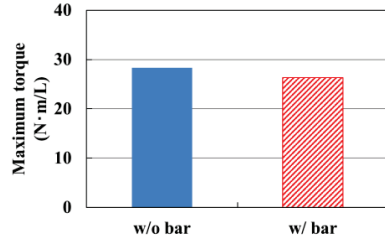


(b) 改良機

図 10 復帰トルクの測定結果



(a) 原理検証機

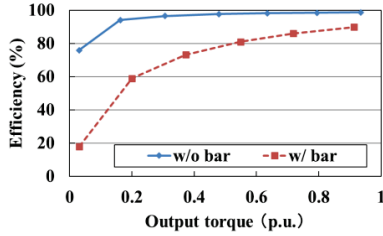


(b) 改良機

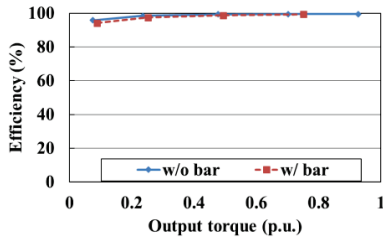
図 11 最大トルク密度の測定結果 (入力回転数 60 rpm)

入力回転数は 60 rpm である。同図より、改良機は原理検証機よりも伝達トルクが向上していることがわかる。

図 12 に、入力回転数 60 rpm における効率の測定結果を示す。同図を見ると、原理検証機では誘導同期磁気ギヤの方が通常の磁気ギヤに比べて効率が大幅に低下しているのに対し、改良機では両者の効率がほぼ同等であることがわかる。これは、導体バーの本数を減らしたことで誘導電流による損失が小さくなったためである。



(a) 原理検証機



(b) 改良機

図12 効率の測定結果 (入力回転数 60 rpm)

次いで、原理検証機と改良機の復帰トルクの改善効果をより詳しく比較検証するため、FEMを用いて、これら2種類の回転子を有する誘導機の特性格算定を行った。

図13に、検証に用いたモデルを示す。固定子鉄心や巻線仕様は等しい。これらのモデルについて、FEMの周波数応答解析により、速度対トルク特性を算定した。

図14に、速度対トルク特性の算定結果を示す。同図より、原理検証機と同じ回転子構造を有する誘導機の方が、トルクが全体的に大きいことがわかる。この解析結果は原理検証機の方が改良機よりも復帰トルクの改善効果が大きくなっていった実験結果と符合している。

5. まとめ

本研究では、IPM磁気ギヤの高性能化・高機能化を目的として、FEMによる解析や実験を行った。従来のIPM磁気ギヤの課題についてFEMによる解析を行い、その改善策について解析と実験の両面から検討した。その結果、実機の最大トルクは20.0 N・mとなり、従来構造のIPM磁気ギヤに対して約44%向上した。また、最大効率は99.85%を達成した。さらに、回転子にかご形導体を付加した誘導同期磁気ギヤを新たに提案し、試作試験やFEMによる解析を行った。その結果、磁気ギヤの脱調後の再始動性向上を実現し、誘導同期磁気ギヤの有用性を明らかにした。

今後は、有用性を復帰トルクのさらなる向上を目的として、導体バーの本数や形状について検討する予定である。

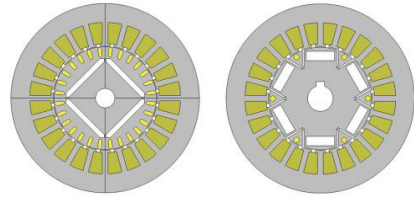
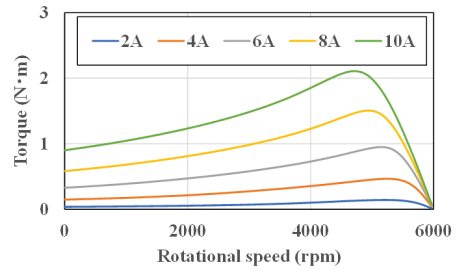
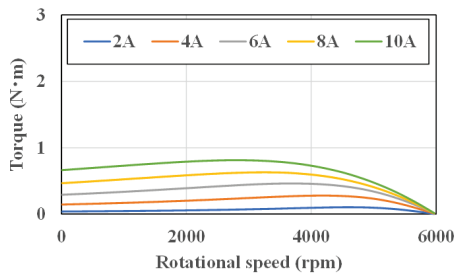


図13 復帰トルク改善効果検証モデル (左:原理検証機, 右:改良機)



(a) 原理検証機



(b) 改良機

図14 速度対トルク特性の算定結果

文献

- 1) K. Atallah and D. Howe, *IEEE Trans. Magn.*, **37** (2001) 2844.
- 2) T. Ikeda, K. Nakamura, and O. Ichinokura, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **33** (2009) 130
- 3) Y. Mizuana, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Oishi, Y. Tachiya, K. Kuritani, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, **64** (2020) 771.
- 4) Y. Mizuana, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Oishi, Y. Tachiya, and K. Kuritani, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **45** (2021) 50.
- 5) 水穴裕真, 中村健二, 鈴木雄真, 大石悠平, 立谷雄一, 操谷欽吾, *日本磁気学会論文特集号*, **4** (2020) 52.
- 6) Y. Mizuana, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Tachiya and K. Kuritani, *2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022-ECCE Asia)*, (2022) 1261.

博士学位論文要約（令和5年3月）

深層学習を用いた顔画像解析および顔認証に関する研究

河合 洋弥

指導教員：青木 孝文

Face Image Analysis and Face Recognition Using Deep Learning

Hiroya KAWAI

Supervisor: Takafumi AOKI

The performance of face recognition has been dramatically improved by Convolutional Neural Network (CNN), while more performance improvement is required for practical use. To improve the performance of face recognition, it is important to focus on face-specific features extracted from face images. In this paper, we propose novel face recognition methods and face image analysis methods related to face structure, face attributes, and face features: data augmentation using face parsing, face attribute estimation using multi-task CNN, and privacy protection based on embedding face features. Through a set of experiments using public face image datasets, we demonstrate that the proposed methods are effective in improving the performance on face recognition and face image analysis.

1. はじめに

スマートフォン等の個人用携帯端末の普及や、近年の新型コロナウイルス感染症の流行に伴い、ネットショッピング等のオンラインサービスや、無人レジ等の無人・非対面サービスが増加している。これらのサービスでは、不正利用防止やパーソナライズ化のために、個人を認証してサービスを提供することが必要不可欠である。パスワードやICカード等が一般的に個人認証のために用いられているが、使用するに当たり記憶や所持を必要とするため、紛失・防止・盗難のリスクがある。これに対して、顔の特徴を用いて個人を認証する顔認証が注目されている¹⁾。顔認証では、一般的なカメラを用いて非接触・非拘束で撮影された顔画像を認証に使用できる。日常動作を継続したまま認証が可能であり、かつ衛生的であることから、顔認証は小型端末におけるログイン認証や、改札におけるウォークスルー認証、小売店における無人決済等、様々な場面において広く用いられている。一方で、顔認証には、顔の識別性が比較的低い、加齢や姿勢、撮影環境の変化に対する頑健性が低いといった認証精度に関する問題や、なりすまし攻撃、プライバシー侵害といった安全性に関する問題がある。顔認証の信頼性と安全性を向上させるためには、顔特有の情報や、顔画像から抽出される顔特徴量について十分に考慮する必要がある。顔には、目・鼻・口等のパーツの形状や配置に関する構造情報や、年齢・

性別・髪型等の属性情報が含まれており、これら顔特有の情報と顔特徴量について解析・応用することで、顔認証の性能向上や、顔画像に関する新分野の開拓につながることを期待される。

本論文では、顔の構造情報、属性情報、顔特徴量に関連し、Face Parsingを用いた顔認証のためのデータ拡張手法、マルチタスクCNNを用いた顔属性推定手法、顔特徴量の埋め込みに基づくプライバシー保護手法を提案する^{2) 3) 4) 5)}。まず、顔認証モデルの学習中に、顔画像から複数の顔のパーツ領域をランダムに消去することで、顔の向きやマスクの着用等により生じるオクルージョンへの頑健性を向上させる。次に、学習に基づいてCNNの構造を顔属性推定のために自動で最適化することで、顔に含まれる多数の顔属性を単一のCNNを用いて効率的に推定する。最後に、顔画像から抽出された顔特徴量を他の画像中に埋め込むことで、顔画像の外見と顔認証モデルによる識別結果をずらし、本人の意図しない場面や用途で顔画像が利用されることを防止する。大規模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、提案手法が顔認証および顔画像解析の性能向上に有効であることを実証する。

2. Face Parsingを用いた顔認証のためのデータ拡張

顔認証では、姿勢変化、表情変化、前髪や装飾品等の遮蔽物によって顔画像の一部にオクルージョンが生じる。顔認証において重要な情報が失われることで、

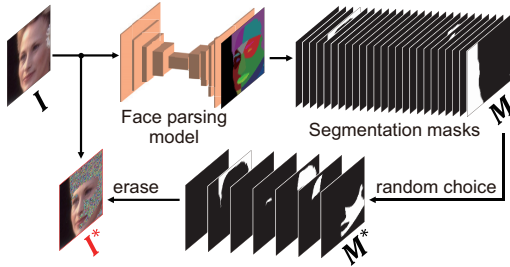


図1 FSErasingの概要

顔認証の認証精度が低下する恐れがある。そこで、顔のセマンティックラベルに基づいて顔画像中の一部の領域を消去する、Face Semantic Erasing (FSErasing) と呼ばれるデータ拡張手法を提案する²⁾。消去処理が適用された顔画像を用いて顔認証モデルの学習を行うことで、顔認証モデルのオクルージョンに対する頑健性を向上させる。FSErasingの概要を図1に示す。まず、学習済みのFace Parsingモデルを用いて N クラスのセグメンテーションマスク M を推定する。次に、 M から n クラス分のセグメンテーションマスク M^* を重複なしでランダムに抽出する。クラス数 n は、事前に設定された範囲から画像毎にランダムに選択される。 M^* に基づいて、マスク領域を画素毎のランダムノイズで置換することで、出力画像 I^* を生成する。

顔認証におけるFSErasingの有効性をCNNのための一般的なデータ拡張手法であるCutout⁶⁾およびRandomErasing⁷⁾と比較する。まず、Face Parsingデータセットの中で最も規模の大きいFaceSyntheticsデータセット⁸⁾を用いてFace Parsingモデルの学習を行う。本論文では、公式の19クラスのセマンティックラベルの代わりに、顔領域を額、ほお、あご、眉間、眼周囲等の9つの領域に分割した独自の25クラスのセマンティックラベルを用いる。次に、大規模顔画像データセットであるLarge-scale CelebFaces Attributes (CelebA) データセット⁹⁾を用いて顔認証モデルの学習を行う。評価用顔画像データセットであるIn-the-wild Age Database (AgeDB)¹⁰⁾およびCross-Pose LFW (CPLFW)¹¹⁾に対する認証精度の比較を表1に示す。各データセットには6,000組の顔画像ペア(本人ペア3,000組, 他人ペア3,000組)が含まれており、特にAgeDBデータセットについては年齢の異なる顔画像で、CPLFWデータセットについては顔の向きの異なる顔画像でペアが構成されている。データ拡張を用いない場合(baseline)と用いた

表1 データ拡張手法ごとの認証精度の比較

Method	Accuracy [%]	
	AgeDB	CPLFW
baseline	90.42	83.78
w/ Cutout	87.98	85.13
w/ RandomErasing	88.68	84.83
w/ FSErasing	90.08	85.23

場合とで認証精度を比較すると、いずれの手法を用いた場合でもCPLFWデータセットに対する認証精度が向上している。このことから、顔画像の一部をランダムに消去するデータ拡張手法が顔のポーズ変化に対する頑健性向上に有効であるといえる。また、一般的なデータ拡張手法であるCutoutやRandomErasingを用いた場合、AgeDBデータセットに対する認証精度が低下していることが分かる。両手法は画像中のランダムな矩形領域を消去するため、背景や髪のような面積の大きなパーツについては常に領域の一部が保持される。背景や髪型、髪色は撮影のタイミングによって容易に変化するため、安定的に出現するこれらのパーツを重視して認証が行われたことで、経年変化に対する頑健性の低下につながったと考えられる。

3. マルチタスクCNNを用いた顔属性推定

年齢、性別、民族、肌色、服装といった抽象的・局所的な特徴を属性と呼び、多数の属性の有無を顔画像に基づいて推定することを顔属性推定と呼ぶ。顔属性は部位の共通性や共起性等の多様な関係を有しており、属性間の関係を考慮してCNNのアーキテクチャ設計を行うことが効率的な顔属性推定のために重要である。従来の顔属性推定手法では、顔の部位に基づいて顔属性を複数のグループに手動で分割し、グループ内で重みパラメータを共有している^{12) 13)}。手動でのアーキテクチャ設計は、多大な労力と時間を要する上、複雑な顔属性間の関係性を十分に考慮できない。そこで本論文では、Merged Multi-CNN (MM-CNN) と呼ばれる独自のマルチタスクCNNを提案する³⁾。MM-CNNのネットワークアーキテクチャを図2に示す。多数の畳み込みブロックが5つの段階に分けて並列化される。各ブロックの出力は、Merging Weight と呼ばれる学習可能な重みパラメータを用いて重みづけされた後、チャンネルごとに平均化されてMerging Layerから出力される。Merging Weightを通常の重みパラメータと同時に学習に基づいて最適化することで、MM-CNNのアーキテクチャを顔属性推定のた

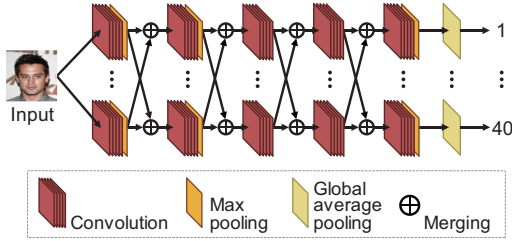


図2 MM-CNNのネットワークアーキテクチャ

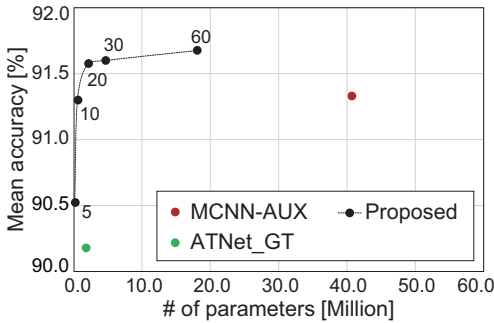


図3 マルチタスク CNN のパラメータ効率の比較

めに自動で最適化する．なお，重みパラメータ数の削減を目的として，最終畳み込み層の出力チャンネル数を2とし，Global Average Pooling (GAP) により二値に集約してそのまま出力する独自のアーキテクチャが採用されている．

MM-CNN の性能を顔属性推定のための従来のマルチタスク CNN である MCNN-AUX¹²⁾，ATNet_GT¹³⁾ と比較する．CNN の学習と評価には CelebA データセット⁹⁾ を用いる．データセットに含まれる 40 種類のバイナリ顔属性ラベルに基づいて，属性ごとに正解率を算出し，その平均値を比較する．各手法の平均正解率と重みパラメータ数の比較を図3に示す．図中の添え字は畳み込み層の出力チャンネル数を制御するハイパーパラメータの値を示す．MM-CNN は，手動で設計された従来のマルチタスク CNN と比較して優れたパラメータ効率を達成している．また，MM-CNN では，集約方法，畳み込み層の出力チャンネル数および並列数，分類器のアーキテクチャを変更することで，重みパラメータ数と推定精度のバランスを細かく調整できる．

4. 顔特徴量の埋め込みに基づくプライバシー保護

顔認証を用いた様々なサービスが社会に普及しつつある現代において，プライバシー保護は顔認証分野における重要な研究課題の一つとなっている．認証

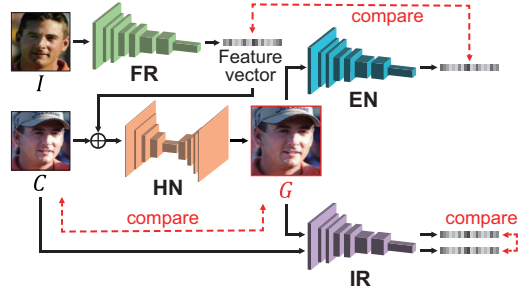


図4 顔特徴量の埋め込みモデルの概要

サーバへの攻撃による登録情報の流出や，顔認証を用いたインターネット上からの顔画像の自動収集により，利用者のプライバシーが侵害される恐れがある．そのため，生体情報を秘匿したまま個人認証を行うCancelableバイオメトリクスや，顔画像の外見情報を保持したまま顔認証モデルによる認証を困難にする非識別化の検討が行われている．本論文では，顔認証におけるプライバシー保護を実現するための全く新しいアプローチとして，顔特徴量の埋め込みに基づくプライバシー保護手法を提案する．提案手法の概要を図4に示す．学習済みの顔認証モデル (FR) を用いて顔画像 I から顔特徴量を抽出し， I とは異なる人物の顔画像 C と結合して Hiding Network (HN) に入力する．HN は画像生成モデルであり，HN から出力された画像の外見が C と一致するように学習が行われる．次に，HN から出力された画像を Extracting Network (EN) に入力し，特徴量を抽出する．EN は一般的なエンコーダモデルであり，EN から出力された特徴量が I から抽出された顔特徴量と一致するように学習が行われる．さらに， C と HN から出力された画像を学習済みのエンコーダモデル (IR) にそれぞれ入力する．IR は画像分類のために事前に学習されており，IR から出力された特徴量が一致するように HN と EN の学習が行われる． C を保護対象の顔画像とすることで，顔画像の外見情報を保持し，個人性を破棄した非識別化画像を生成できる⁵⁾．

顔画像の非識別化における提案手法の性能を従来の非識別化手法である MIM¹⁴⁾ および LGC¹⁵⁾ と比較する．CelebA⁹⁾ および Labeled Faces in the Wild (LFW)¹⁶⁾ の2つの大規模顔画像データセットを学習と評価に用いる．LFW データセットにおいて，本人同士の顔画像からなる 3,000 ペアを抽出し，各ペアの片方の顔画像のみに非識別化処を適用する．学習済みの顔認証モデルを用いて顔認証を行い，他人同士と識




Method	De-id image	ASR [%]	SSIM
MIM		56.7	0.935
LGC		58.5	0.935
Proposed		71.0	0.963

図5 非識別化画像の例と非識別化性能の比較

別されたペアの割合 (Attack Success Rate: ASR) に基づいて非識別化性能を評価する。また, Structural Similarity Index Measure (SSIM) を用いて生成された非識別化画像の画質を評価する。各手法の ASR と SSIM の比較を図5に示す。提案手法は従来手法である MIM や LGC と比較して, 非識別化性能と画質の両方で極めて優れた結果を示している。C の人物の目や口元の特徴を反映する形で非識別化を行うことで, 未知の顔認証モデルに対して高い非識別化性能を達成できていると考えられる。また, 提案手法では, I を保護対象の顔画像とすることで, 個人性を保持し, 顔画像の外見情報を別のものに置き換えた認証可能画像を生成できる⁴⁾。

5. まとめ

本論文では, 顔の構造情報, 属性情報, 顔特徴量に関連し, Face Parsing を用いた顔認証のためのデータ拡張, マルチタスク CNN を用いた顔属性推定, 顔特徴量の埋め込みに基づくプライバシー保護の3つの手法を提案した。複数の大規模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, 提案手法が顔認証および顔画像解析の性能向上に有効であることを実証した。今後は, 表情認識やなりすまし攻撃検知といった他の顔画像解析技術の検討を行いながら, 複数の顔画像解析手法の組み合わせによる新たな技術の創出を目指す。

文献

1) S.Z. Li and A.K. Jain, Handbook of Face Recognition, Springer, 2011.

2) H. Kawai, K. Ito, H.T. Chen, and T. Aoki, “Is CNN really looking at your face?,” Proc. Asian Conf. Pattern Recognition, pp.525–539, Nov. 2021.

3) H. Kawai, K. Ito, H.T. Chen, and T. Aoki, “Face attribute estimation using multi-task convolutional neural network,” J. Imaging, vol.8, no.4, pp.1–20, Apr. 2022.

4) 神津岳志, 河合洋弥, 伊藤康一, 青木孝文, “ステガノグラフィを用いたプライバシー保護顔認証とその安全性評価,” 画像の認識・理解シンポジウム, pp.1–4, July 2021.

5) 塙剛生, 河合洋弥, 伊藤康一, 青木孝文, “顔画像非識別化によるプライバシー保護に関する検討,” 暗号と情報セキュリティシンポジウム, pp.1–8, 2023.

6) L. Xu, Y. Li, and J. Li, “Improved regularization of convolutional neural networks with point mask,” Proc. Int’l Conf. Artificial Intelligence and Security, pp.16–25, July 2022.

7) Z. Zhong, L. Zheng, G. Kang, S. Li, and Y. Yang, “Random erasing data augmentation,” Proc. AAAI Conf. Artificial Intelligence, vol.34, no.7, pp.13001–13008, Feb. 2020.

8) E. Wood, T. Baltrusaitis, C. Hewitt, S. Dziadzio, T.J. Cashman, and J. Shotton, “Fake it till you make it: Face analysis in the wild using synthetic data alone,” Proc. Int’l Conf. Computer Vision, pp.3681–3691, Oct. 2021.

9) Z. Liu, P. Luo, X. Wang, and X. Tang, “Deep learning face attributes in the Wild,” Proc. Int’l Conf. Computer Vision, pp.3730–3738, Dec. 2015.

10) S. Moschoglou, A. Papaioannou, C. Sagonas, J. Deng, I. Kotsia, and S. Zafeiriou, “AgeDB: The first manually collected, in-the-wild age database,” Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, pp.1997–2005, June 2017.

11) T. Zheng and W. Deng, “Cross-Pose LFW: A database for studying cross-pose face recognition in unconstrained environments,” Technical report, Beijing University of Posts and Telecommunications, Feb. 2018.

12) E.M. Hand and R. Chellappa, “Attributes for improved attributes: A multi-task network utilizing implicit and explicit relationships for facial attribute classification,” Proc. AAAI Conf. Artificial Intelligence, pp.4068–4074, Feb. 2017.

13) D. Gao, P. Yuan, N. Sun, X. Wu, and Y. Cai, “Face attribute prediction with convolutional neural networks,” Proc. IEEE Int’l Conf. Robotics and Biomimetics, pp.1294–1299, Dec. 2017.

14) Y. Dong, F. Liao, T. Pang, H. Su, J. Zhu, X. Hu, and J. Li, “Boosting adversarial attacks with momentum,” Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.9185–9193, June 2018.

15) X. Yang, D. Yang, Y. Dong, H. Su, W. Yu, and J. Zhu, “RobFR: Benchmarking adversarial robustness on face recognition,” CoRR, vol.abs/2007.04118, pp.1–28, July 2020.

16) 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 7-49, University of Massachusetts, Amherst, Oct. 2007.

博士学位論文要約（令和5年3月）

高次感性知覚における多感覚情報統合に関する研究

阿部 翔太

指導教員：坂本修一

A study on multisensory integration in high-level perception of reality

Shota ABE

Supervisor: Shuichi SAKAMOTO

In daily life, people receive various impressions from objects and events in their environment using inputted foreground/background information. This ability can be expressed as high-level perception of reality. Although the high-level perception of reality enriches our daily life, the perception process is still unclear. Multisensory integration is likely to play an important role in this process. Therefore, in this study, I examined the relationship between the high-level perception of reality and multisensory integration. The impressions induced by foreground/background information, such as the senses of presence and verisimilitude, were used as indices to evaluate the high-level perception of reality. As a result, it was found that the degree of perceptual correspondence among the characteristics of multisensory information affects the senses of presence and verisimilitude. Based on these findings, the process model of the high-level perception of reality including the multisensory integration was proposed.

1. はじめに

人は日常生活の中で、種々の物理情報にあふれる周辺環境を認識すると同時に、周辺環境や事象に対して「きれいな感じ」、「居心地の良い感じ」、「いつもと違う感じ」等の様々な印象を生起させる。このような印象の中で、対象に関する背景的な情報も考慮に入れて印象を生起させる能力は高次感性と表現することができ、より豊かな日常生活を送る上で重要な能力であると考えられる。しかし、人間がどのように高次感性を働かせているか、その過程は未だ明らかになっていない。高次感性は、物体とその周辺環境に関連する印象の生起に寄与することから、その処理過程を解明することで、より自然でリアルなコンテンツの構築やより快適で居心地の良い空間の構築を容易にすることにつながると考えられる。

人間は周辺環境を認識する際に、複数の感覚器官によって得られた感覚情報を統合的に処理することで外界の正確な認識につなげている¹。高次感性知覚においては周辺環境の正確な認識が必要不可欠であると考えられるため、このような統合処理が重要な役割を果たしている可能性が高い。しかしながら、これまでに高次感性知覚について検討した過去研究の多くは視聴覚情報による検討に偏重していたため、多感覚情報の統合処理が高次感性知覚に果たす役割は十分には検討されていなかった。視聴覚情報のみならず、体全体の揺れや動きの知覚に関連する平衡感覚や身体運動感覚、体性感覚等が高次感性知覚に

影響を与えることが示されているため²、より多くの感覚情報を用いてその統合過程がどのように高次感性知覚に影響を与えるかを検討することは非常に重要である。

以上を踏まえて、本論文では、高次感性のメカニズムを視聴覚情報に全身振動情報を加えた多感覚情報の統合処理として明らかにすることを目的とした。この目的を達成するために、本論文では高次感性知覚の指標として「その場にいるような感じ」という意味をもつ臨場感と、「本物らしい感じ」という意味を持つ迫真性に着目した。なぜなら、高次感性知覚は前景と背景の情報処理という別の処理システムが関与しており、高次感性により生起される印象は前景と背景それぞれに対応した指標を用いて多次的に評価される必要があるからである。このような視座のもと、本論文では、高次感性のメカニズムを前景、背景と関連する印象である「臨場感」、「迫真性」を用いて多感覚情報の統合処理として解明した。

2. 視聴覚情報と全身振動の大きさの知覚的な適合性の検討

本研究では、まず多感覚コンテンツ体験時に体験者が適切だと感じる全身振動情報の大きさが、視聴覚情報のどのような特性と関連しているかについて調査した。具体的には、被験者に多様な種類の多感覚コンテンツを提示し、そのコンテンツに適していると感じる振動の大きさを調整させる実験を行った。

表 1. 各実験条件と音響，映像特徴量の関係性の検討 (重回帰分析)

説明変数	目的変数	目的変数	目的変数
	AO 条件の 最適振動レベル 標準偏回帰係数	VO 条件の 最適振動レベル 標準偏回帰係数	A&V 条件の 最適振動レベル 標準偏回帰係数
ラウドネス	0.23*	-	0.23*
ラフネス	0.037*	-	0.059*
シャープネス	-0.16*	-	-0.23*
メル周波数ケプストラム係数 (1次)	0.011	-	-0.059*
メル周波数ケプストラム係数 (2次)	-0.26*	-	-0.21*
顕著物体の画面内割合	-	-0.13*	-0.053
顕著物体内のオプティカル フローの大きさの総和	-	0.17*	0.12*
全画素のオプティカルフロー の大きさの分散	-	0.23*	0.028*
ViLA	0.67*	0.61*	0.56*
調整済み決定係数 R^2	0.68*	0.64*	0.64*

* : $p < .05$

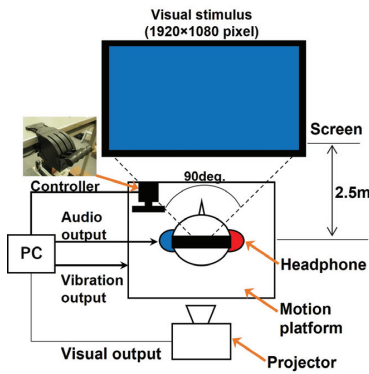


図 1. 実験環境の概要

実験では、視聴覚情報と振動の大きさの関係を明確にするために、音情報のみの提示をする条件 (Audio Only : AO), 映像情報のみを提示する条件 (Visual Only : VO), 音と映像の両方を提示する条件 (Audio & Visual : A&V) の 3 つの実験条件を用意した。

実験刺激として、動画共有サイト³から 20 のコンテンツを収集し、映像情報については、解像度が 1920 × 1080 pixel, フレームレートが 30 fps, 音情報については、量子化ビット数 16 bit, サンプリング周波数 48 kHz, A 特性音圧レベルが等しくなるように統制した。加えて、各コンテンツの音情報から全身振動情報 (Vibration from low-frequency audio : ViLA⁴) を生成し、調整前の全身振動情報として採用した。生成した全身振動情報の量子化ビット数は 16 bit, サンプリング周波数は 8 kHz であった。

実験環境を図 1 に示す。ヘッドホンで提示される各コンテンツの A 特性音圧レベルは 75 [dB] であった。また、被験者の横に設置されているスロットル

レバーは全身振動情報の大きさを調整するために用いられた。被験者には、刺激が提示されている間、手元のレバーを操作して「そのコンテンツ (場面) に適していると感じる振動の大きさ」をリアルタイムで調整するよう求めた。被験者は正常な視覚 (矯正を含む) と聴覚を有する大学生, および大学院生 27 名で、各実験条件に 9 人ずつ割り当てた。

調整された視聴覚情報と適合する振動の大きさ (最適振動レベル) について音響, 映像特徴量を説明変数とした重回帰分析を行うことで、最適振動レベルと視聴覚情報との関連性を検討した。重回帰分析の結果を表 1 に示す。表 1 から、各説明変数においては、標準偏回帰係数の大きさに違いはあるものの、AO 条件の 1 次のメル周波数ケプストラム係数以外はすべて有意の影響を示した ($p < .05$)。加えて、ラウドネス, シャープネス, 2 次のメル周波数ケプストラム係数といった音響特徴量やオプティカルフローのような動きに関連する映像特徴量は特に最適振動レベルの決定に及ぼす影響が大きかった。このことは、体験者がこれらの特徴量を用いて視聴覚情報と知覚的に適合する振動レベルを判断していることを示唆している。一方で、いずれの実験条件も決定係数が 0.6 程度であり、視聴覚情報の特性で決定できない余地も存在していることも示している。

3. 全身振動の大きさと音の時間的, 量的な類似性が高次感性により生じられる印象に与える影響

次に、多感覚情報間の知覚的な適合が高次感性により生じられる印象に与える影響について、多感覚情報間の時間的, 量的な類似性に基づいて検討した。具体的には、視聴覚情報の特性と時間的, 量的な類似性が異なるいくつかの全身振動条件を生成し、それらが臨場感, 迫真性に与える影響について検討した。

まず、多感覚情報間の時間的な類似性が印象の生起に与える影響を検討した。視聴覚情報と時間的な類似性が異なる振動条件を用意するために、音の低周波数成分を全身振動情報として提示することがより強い臨場感、迫真性の生起につながるという報告⁵に着目し、音に適用する低域通過フィルタの遮断周波数をパラメータに用いた。各振動条件の振動レベルは、視聴覚情報とあわせて計測した全身振動情報の振動レベルと等しくなるように調整した。また、比較として計測した全身振動も実験条件として用いた。

実験刺激として、バスケットボールの3 on 3を観察するコンテンツを用いた。映像はビデオカメラ、音はダミーヘッド、全身振動は加速度ピックアップを用いて収録した。それぞれのパラメータは、視覚刺激(解像度:1920×1080 pixels, フレームレート:30 fps), 聴覚刺激(サンプリング周波数:48 kHz, 量子化ビット数:16 bit), および振動刺激(サンプリング周波数:8 kHz, 量子化ビット数16 bit)であった。実験環境は図1に示されているものと同一であり、ヘッドホンで提示されるA特性音圧レベルは71.6 [dB], 計測した振動レベルは85.6 dBであった。被験者には各振動条件が提示されるコンテンツを臨場感と迫真性のそれぞれについて評定尺度法で評価させた。被験者は正常な視覚(矯正を含む)と聴覚を有する大学生, および大学院生18名で, それぞれの評価指標に9名割り当てた。

図2に、最適振動レベルの時間変化と各実験条件の振動レベルの時間変化間の時間的な類似性と印象強度の関係性を表す図を示した。なお、最適振動レベルは第2章で導出された重回帰式を用いて導出しており、時間的な類似性は相関係数を用いて表現している。図2を見ると、特に迫真性において時間的な類似性の高さが印象強度の上昇に結び付いている一方で、臨場感評価においては時間的な類似性の違いによる印象強度の変化が小さいことがわかる。このような二つの評価指標における傾向の違いは、臨場感と迫真性の評価対象の違いと関連していると考えられる。すなわち、迫真性は主に前景に対する評価指標であるため、前景的な情報における多感覚情報間の適合の違いを認識し、印象強度に強く影響したと考えられる。一方で、臨場感は主に背景的な情報に関する評価指標であるので、迫真性ほどは多感覚情報間の時間的な適合が重要ではなく、あまり印象強度に違いが生じなかったと考えられる。加えて、臨場感においては振動の大きさが大きな影響を与えることが示されている⁶ため、本実験において実験条件間で全体的な振動レベルを統制したことも評価に違いが生じなかった要因と考えられる。

次に、量的な類似性が印象の生起に与える影響を検討した。量的な類似性が異なる振動条件は、第2

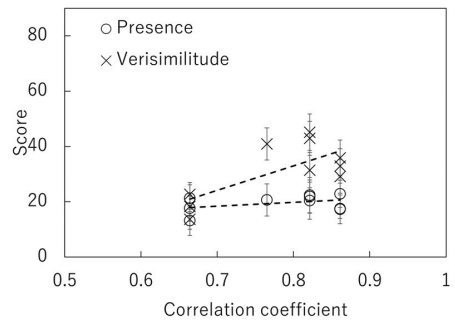


図2. 最適振動レベルと各振動条件間の時間的類似性(相関係数)と印象強度の関係

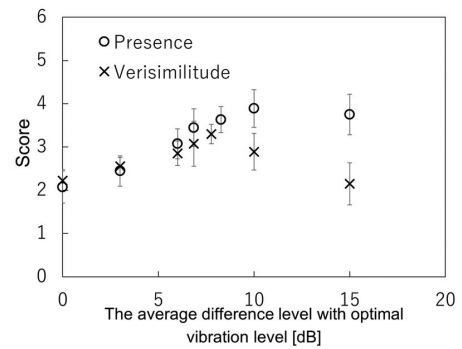


図3. 最適振動レベルと各振動条件間の量的類似性(平均レベル差)と印象強度の関係

章の実験結果から構築した重回帰モデルを用いて生成した。重回帰モデルにより算出された最適振動レベルを持つ実験条件に加え、そこから全体の振動レベルを+3 dB, +6 dB, +10 dB, +15 dBとした実験条件を用意した。また、これらの振動条件と比較するために、視聴覚情報とあわせて計測した全身振動も実験条件として用意した。

実験刺激、実験環境、評価指標は時間的な類似性の影響を調査した実験と同一であり、本実験で用いたコンテンツにおける最適振動レベルは76.2 dBであった。また、被験者は正常な視覚(矯正を含む)と聴覚を有する大学生, および大学院生9名である。

実験の結果、最適振動レベルよりも大きな振動レベルで全身振動情報を提示することが、臨場感、迫真性の向上につながることを示された(図3)。そこで、第2章の結果において、本実験で用いたコンテンツと“コンテンツ内に含まれる物体や事象”という観点で類似しているコンテンツを検討したところ、そのコンテンツにおいて重回帰モデルと最適振動レベルの誤差が大きかったことが示された。よって、その誤差を考慮に入れて本コンテンツの最適振動レベルを再検討した結果、最適振動レベルが上昇し、よ

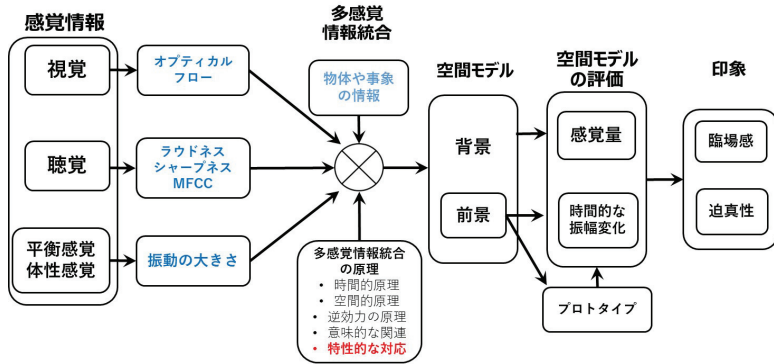


図 4. 高次感性知覚モデル

り強い臨場感、迫真性を生起させる振動レベルに近い値となった。このことは、多感覚情報間の適合が印象の生起に寄与する可能性を示しており、多感覚情報間の適合にはコンテンツ内の物体や事象の情報を考慮することが重要であることを示唆している。ただし、臨場感評価においては、再検討した最適振動レベル以上の振動レベルを提示した場合においても更なる印象強度の増加を示しており、臨場感における感覚情報の大きさの重要性を示している。

4. 多感覚情報統合過程を含む高次感性知覚モデルの構築

ここまで得られた知見をもとに、高次感性知覚モデルの構築を行った。構築したモデルを図4に示す。図4においては、多感覚情報から印象の生起に至るまでの過程が示されている。このモデルの中で“感覚情報”から抽出させている特徴量については第2章で得られた知見が用いられているが、第2,3章において、多感覚情報間の適合を表現する際に、コンテンツ内の物体や事象の情報を考慮することが重要であることが示唆されていた。そこで、モデル内の“多感覚情報統合”を表現するために、第2章で構築した重回帰モデルを拡張し、以下のような多感覚情報間の適合を表現する計算式を提案した。

最適振動レベル =

対象 A に対する振動の期待度に対応する回帰係数

× 対象 A に関連する映像、音響特徴量

+ 対象 B に対する振動の期待度に対応する回帰係数

× 対象 B に関連する映像、音響特徴量

+ ...

また、第3章において、多感覚情報間の時間的、量的な適合の度合いが臨場感、迫真性にそれぞれ異なる影響を与えることが示された。臨場感、迫真性はそれぞれ背景、前景に関係する指標であるため、こ

のことは図4のモデルにおける“空間モデル”、“空間モデルの評価”部分の概形の妥当性を示している。臨場感、迫真性の具体的な特性としては、第3章において臨場感評価が特に感覚情報の大きさが重要であることが示された一方で、迫真性については多感覚情報間が時間的、量的に適合していることが重要であることが示唆された。

5. 結論

本論文では、多感覚情報の統合処理と、それが印象生起に与える影響を前景、背景に関する指標を用いて検討することで高次感性のメカニズムの解明を目指した。その結果、人間は多感覚情報の種々の特性と環境下に存在する物体の情報を考慮して、多感覚情報間の適合性を判断している可能性があることを明らかにした。加えて、前景、背景情報における多感覚情報間の適合の時間的、量的な評価が、前景、背景に関連する印象の生起につながることを示した。

今後、多感覚情報の統合過程を含む高次感性知覚の更なる解明を行うためには、前景、背景情報が多感覚情報感の適合にどのように影響するかということや、臨場感、迫真性以外の高次感性により生起される印象においても本研究で得られた知見と同様の知見が得られるかどうかについて検討する必要があると考えられる。

文献

- 1) C. Spence, Attention, Perception & Psychophysics, 73, 971-995, 2011.
- 2) 寺本渉ら, TVRSJ, 15(1), 7-16, 2010.
- 3) <https://vimeo.com/>
- 4) 崔正烈ら, 情報処理学会論文誌, 59(11), 1986-1994, 2018.
- 5) S. Merchel et al., J. Audio Eng. Soc., 62(4), 220-234, 2014.
- 6) S.Sakamoto et al., MTA, 2(1), 46-50, 2014.

博士学位論文要約（令和5年3月）

小売店舗における消費者行動の柔軟な認識システムに関する研究

オン カ コウ
温 佳昊

指導教員：菅沼 拓夫， 学位論文指導教員：阿部 亨

A Study on Flexible Recognition System for Customer Activity
in Retail Environments

Jiahao Wen

Supervisor: Takuo Suganuma, Research Advisor: Toru Abe

With the advancement of Industry 4.0, cutting-edge technologies such as Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), and machine learning (ML) have been incorporated into retail stores to gather in-store information, including customer activity (CA). These technologies have facilitated improvements in marketing, staff management, inventory control, and order management. As store operations evolve, target CAs and store environments may undergo changes, necessitating adaptations in the methods and models employed. Traditional customer activity recognition (CAR) systems, which integrate various recognition techniques based on ML and end-to-end (E2E) models, are specialized for specific scenarios, resulting in limited flexibility in adapting to these changes. To address this issue, we proposed a primitive-based customer behavior recognition method (CBR) designed to adapt to target changes. This method recognizes customer behavior (CB), an important type of CA, through the combination of primitives. Additionally, we introduced a hierarchy-based CAR system that organizes various CAR methods within a hierarchical structure to adapt to environment changes. The experimental results demonstrate that incorporating the proposed primitive-based CB recognition method into our hierarchy-based CAR system achieves significant flexibility in adapting to target CAs and environment changes. This indicates a substantial contribution to the development of smart retail and the ongoing progression of Industry 4.0.

1. Introduction

The emergence of Industry 4.0 has marked the beginning of a new era of digitalization and automation, characterized by the incorporation of technologies such as IoT, cloud computing, AI, and ML. These advancements have transformed industries across the board, with smart retail being a prime example. The smart retail¹⁾ concept includes the use of IoT and data analytics to optimize various retail solutions, such as store management, market planning, and security. The rapid development of online shopping has prompted traditional retail stores to introduce smart retail solutions to obtain market growth.

One of the crucial parts of smart retail is the recognition of customer activity (CA), which refers to various types of customer's situations in store spaces, including customer location, moving route, and behavior, etc. CAs can be classified into different levels based on the degree of abstraction of the information they provide. The accurate and flexible recognition of CAs is essential for various retail purposes, such as marketing and shoplifting prevention. However, cur-

rent CAR systems, which mainly rely on ML-based models, face challenges in adapting to changes in target CAs and retail environments. These challenges, denoted as target change and environment change, necessitate the development of a more flexible CAR system.

The primary objective of this study is to design a flexible CAR system capable of adapting to both target and environment changes. We identify two main issues to address: (P1) hard to adapt to target changes, particularly in the case of CB which is one of the CAs, and (P2) hard to adapt to environment changes, such as changes in store layout or product supply.

To tackle these issues, we propose two solutions: (S1) a primitive-based CBR method, which recognizes customer behaviors through the combination of primitives, and (S2) a hierarchy-based CAR system, which organizes CAR methods into different levels, from lowest to highest, by the level of their output CAs.

To sum up, this study positions itself in the CAR research, emphasizing the importance of flexibility in

smart retail solutions. By addressing the challenges of adapting to (C1) target changes and (C2) environment changes, we aim to develop a flexible CAR system through (S1) and (S2) to support a wide range of retail purposes, thereby fostering the growth of smart retail.

2. Primitive-Based CBR Method

Since CB is one of the most important CAs, CBR is crucial for smart retail as it provides valuable insights into customer attitudes, needs, motivations, preferences, and the impact of marketing strategies or management operations²⁾. Target CB changes frequently due to different customer-product interactions and retail purposes. Existing research on CBR has identified some common CBs, including viewing the shelf, pick product, return product, etc. No single method can cover all some common CBs, indicating the lack of flexibility of current methods. Current CBR methods mainly rely on visual data obtained from surveillance cameras and use ML-based models, such as Hidden Markov model (HMM)³⁾, convolutional neural network (CNN)⁴⁾, and dynamic Bayesian networks⁵⁾. Although these models have improved CBR accuracy, they share a common limitation in terms of flexibility when dealing with target CB changes because they require re-collection of training data and re-training the model, which takes lots of time. This section aims to address the issue of flexibility in CBR methods with good accuracy.

We propose (S1) a primitive-based CBR method that recognizes CB from videos captured by in-store cameras. This method recognizes CBs by combinations of primitives, each of which is the motion of an entity or the relation between two entities in each frame of the video. An entity can be a body part, product, and any other object relevant to retail store services. First, we utilize existing methods to detect entities' bounding boxes in each frame and track their trajectories. Then, we identify primitives for each frame based on the trajectories. The identified primitives form a sequence, which is used to recognize target CBs by matching the sequence and predefined CB combinations.

A primitive is written using an expression that typically consists of three elements, which can be represented as:

subject verb object,

where *subject* and *object* is the name of the entity that performs *verb* or is related to another entity. *verb* describes the motion of *subject* or the relation between the *subject* and *object*. For instance, a primitive rep-

	# of frames	count	Pr (%)	Re (%)	F1 (%)
viewing	132 (3.8%)	9	84.9	89.4	87.1
browse	2149 (61.4%)	54	98.4	97.8	98.1
walking	80 (2.3%)	8	85.4	95.0	89.9
select(1 hand)	524 (15.0%)	27	89.7	89.7	89.7
select(2 hands)	60 (1.7%)	4	89.8	88.3	89.1
pick	323 (9.2%)	47	96.0	96.0	96.0
touch	6 (0.2%)	1	100.0	83.3	90.9
return	227 (6.5%)	31	96.0	95.2	95.6
Total			92.5	91.8	92.0

Figure 1 Results of laboratory dataset

	# of frames	count	Pr (%)	Re (%)	F1 (%)
inspect shelf	32674 (27.8%)	836	88.9	84.1	86.4
inspect product	40984 (34.9%)	302	73.3	96.0	83.1
reach to shelf	20145 (17.2%)	918	94.4	84.1	88.9
retract from shelf	23552 (20.1%)	928	99.8	62.7	77.0
Total			89.1	81.7	83.9

Figure 2 Results of MERL dataset

resenting a hand moving to a shelf can be written as: *hand move_to shelf*, where *hand* and *shelf* correspond to *subject* and *object*, and *move_to* is *verb*. By combining and sequencing multiple primitives, we can create a pattern that represents a more complex CB, called CB definition.

To identify primitives from input trajectories, we use an LSTM⁶⁾-based model as a classifier for *verb*. To recognize CBs, we design BM⁷⁾-based algorithms to match the pattern of each pre-defined CBs in the sequence of identified primitives. This primitive-based CBR method allows flexible adaptation to (C1) target changes by redefining new target CBs using combinations of primitives.

We evaluated our proposed method for its flexibility and accuracy on a laboratory dataset and the public MERL⁴⁾ dataset. The method demonstrated greater flexibility compared to existing ML-based methods, requiring significantly less time (2–3 man-hours) and fewer parameters to adapt to changes in target CBs. In terms of accuracy, as shown in Figure 1 and Figure 2, our method achieved an average F1-score of 92.04% on the laboratory dataset and 83.86% on the MERL dataset by merely changing CB definitions, indicating that our approach is both flexible and accurate in recognizing customer behaviors in different retail situations.

3. Hierarchy-Based CAR System

CAR in smart retail is essential for optimizing store management, marketing planning, and providing valuable insights¹⁾. A CAR method is a specific approach used to recognize a particular type of CA within a CAR system. A CAR system is a collection of interconnected CAR methods designed to recognize vari-

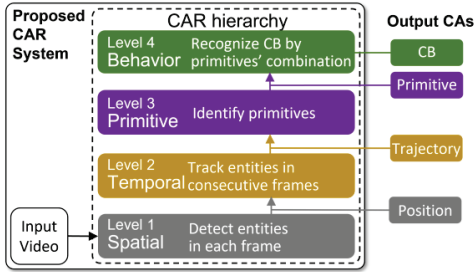


Figure 3 Proposed hierarchy-based CAR system
ous CAs in retail spaces. It typically involves data acquisition, data preprocessing, feature extraction, and behavior recognition. A CAR system can incorporate multiple CAR methods to recognize different types of CAs and can adapt to different retail environments.

Existing CAR methods focuses on spatial features (human and object detection), temporal features (tracking), and behavior recognition, etc. Methods employed for these tasks include conventional approaches like Histogram of Oriented Gradients and advanced techniques using CNN⁸). The common structure of existing CAR systems involves running multiple machine learning-based complete CAR models in parallel with the same input video, leading to performance and flexibility issues. Spatial features extraction, such as human detection, often employs a combination of multiple sensors, like top-view and RGB-depth cameras. Temporal features, including tracking tasks, use methods like the Kalman filter, particle filter, and Intersection over Union tracker. Behavior recognition methods, which mainly focus on customer-product interactions and indirect behavior, use models like HMM³), Dynamic Bayesian Networks⁵), and Support Vector Machines (SVM)⁹).

Current CAR systems¹⁾¹⁰) run several CAR methods in parallel with the same input video. This structure makes the CAR systems struggle to adapt to the ever-changing retail environment, such as introduction of new product types, cameras view alterations, and store layout adjustments. The overlapped processes between CAR models in the system leads to reduced performance with the increased number of CAR models. When the input video changes, the high coupling between inputs and CAR models leads to the modifications of all the CAR models. These two problems results in the inflexibility of existing CAR systems.

We propose (S2) a hierarchy-based CAR system designed to improve flexibility when adapting to retail environment changes. The proposed system includes four levels: Spatial, Temporal, Primitives, and Be-

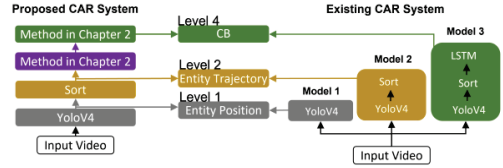


Figure 4 Implementation of two CAR systems
havior, as depicted in Figure 3. Each level is responsible for abstracting information from its lower level, allowing for the replacement of CAR methods at any level to adapt to different retail environments. Level 1 (Spatial) processes input video to extract spatial information in each camera frame. The main task at this level is to detect entities' bounding boxes. In level 2 (Temporal), temporal features are derived by abstracting spatial features from consecutive frames. The extracted features include pixel-level features such as optical flow, and entity-level features like trajectories. This level is responsible for tracking tasks, using outputs from level 1. Level 3 (Primitives) identifies entity's motion or inter-entity relationships in each frame, and outputs a sequence of primitives. Level 4 (Behavior) recognizes CBs by matching predefined target CBs and the sequence of primitives from level 3.

The proposed CAR system effectively addresses the issues of overlapping processes and high coupling between inputs and CAR models, resulting in two significant advantages. Firstly, the hierarchical organization of CAR models separates the functions of models across different levels, minimizing processing overlap. Consequently, the system maintains robust performance even when environment changes necessitate the addition of new levels or models. Secondly, the different inputs for each level enable partial modifications rather than modifications of all CAR models to handle environment changes that impact inputs. This modular design allows for independent modification of each level, enhancing the system's flexibility to changing environments.

We implemented the proposed hierarchy-based CAR system and an E2E ML model-based CAR system, both using video input as shown in Figure 4. Our proposed system employs YOLOv4¹¹) and Sort¹²) for object detection and tracking, while the existing system consists of three complete CAR models. We used the MERL⁴) shopping dataset and our laboratory dataset, both containing entity bounding box and CB annotations.

To evaluate the system's performance when adding

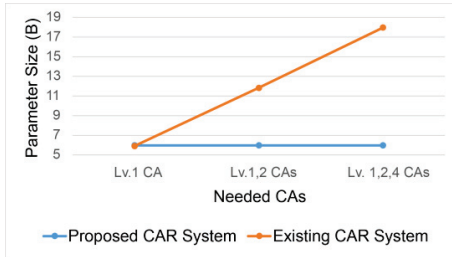


Figure 5 FLOPs results

CAR models, which reflects the ratio of overlapped processes between CAR models, we increased the needed CAs from only needing Level 1 CA to needing all the CAs, which leads to the addition of CA levels or CAR models. We measured the FLOPs and parameter size during the experiments. Results depicted in Figure 5 and Figure 6 demonstrate that the performance of existing CAR system decreases when the number of CAR models increases, while our proposed system experiences minimal performance impact.

Besides, although the F1-scores of our proposed CAR system on both datasets, 83.9% for the MERL dataset and 92.0% for the lab dataset, are lower than those of the ML-based system, 87.4% for the MERL dataset and 95.6% for the lab dataset, the accuracy of our system can be improved by employing better methods or extracting additional features at lower levels. Therefore, proposed CAR system is flexible to adapt to (C2) environment changes.

4. Conclusion

By combining (S1) a primitive-based CBR method with (S2) a hierarchy-based CAR system, the study achieved a flexible CAR system that can effectively adapt to (C1) target changes and (C2) environment changes in smart retail. A flexible CAR system is capable of handling a wide range of CAs, managing various sensor inputs, and maintaining performance even with increased CAR models, which significantly contributes to the development of smart retail. Future research directions include adding more primitives to describe orientation information, enhancing CB prediction capabilities, expanding higher CA level, and making the hierarchy compatible with additional sensors in retail environments.

References

- 1) Hernandez D.A.M., Nalbach O., and Werth D., How computer vision provides physical retail with a better view on customers, *IEEE 21st Conf. Business Informatics*, **1** (2019) 462–471.
- 2) Szwacka-Mokrzycka J., Trends in consumer behaviour changes: overview of concepts, *Acta Sci.*

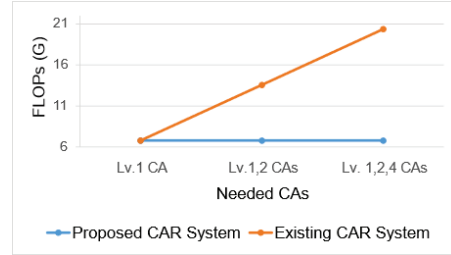


Figure 6 FLOPs results

Pol. Oecon., **14** (2015) 149-156.

- 3) Popa M.C., Rothkrantz L.J.M., Wiggers P., and Shan C., Shopping behavior recognition using a language modeling analogy, *Patt. Recogniti. Lett.*, **34** (2013) 1879-1889.
- 4) Singh B., Marks T.K., Jones M., Tuzel O., and Shao M., A multi-stream bi-directional recurrent neural network for fine-grained action detection, *2016 IEEE Conf. on Comp. Vis. and Patt. Recognit.*, (2016) 1961-1970.
- 5) Liu J.W., Gu Y.L., and Kamjjo S.S., Customer behavior recognition in retail store from surveillance camera, *IEEE Int. Symp. Multimedia*, pp. 154-159. 2015.
- 6) Hochreiter S., and Schmidhuber J., Long short-term memory, *Neural comput.*, **9** (1997) 1735-1780.
- 7) Boyer R.S., and Moore J.S., A fast string searching algorithm, *Commun. ACM*, **20** (1977) 762-772.
- 8) Generosi A., Ceccacci S., and Mengoni M., A deep learning-based system to track and analyze customer behavior in retail store, *Int. Conf. on Consum. Electron.-Berl.*, (2018) 1-6.
- 9) Yamamoto J., Inoue K., and Yoshioka M., Investigation of customer behavior analysis based on top-view depth camera, *IEEE Winter Conf. Appl. Comput. Vis.*, (2017) 67-74.
- 10) Paolanti M., Pietrini R., Mancini A., Frontoni E., and Zingaretti P., Deep understanding of shopper behaviours and interactions using RGB-D vision, *Mach. Vis. Appl.*, **31** (2020) 1-21.
- 11) Bochkovskiy A., Wang C. Y., and Liao H. Y. M., Yolov4: optimal speed and accuracy of object detection, *arXiv preprint arXiv:2004.10934*, (2020).
- 12) Bewley A., Ge Z., Ott L., Ramos F., and Upcroft B., Simple online and realtime tracking, *IEEE int. conf. on image processing*, (2016) 3464- 3468.

修士学位論文要約（令和5年3月）

電力システムの安定運用を維持する需給調整力市場に関する研究

加藤 啓太

指導教員：斎藤 浩海

Study of Reserve Markets for Maintaining
Reliable Operation of the Power System

Keita KATO

Supervisor: Hiroumi SAITOH

In Japan, the power system has two main electricity markets: the spot market for energy trading and the balancing market for reserve trading. The existence of these two markets has resulted in challenges related to the shortage of power supply and reserve procurement. These challenges have not been quantitatively discussed. Therefore, we have formulated a decision-making mechanism for reserve providers who own dispatchable generators that can bid in both the spot market and the reserve market. We have discussed the power supply capacity characteristics of a dispatchable generator based on reserve provider decisions. Our findings indicate that reserve market prices can lead to a reduction in power supply. In our numerical analysis, we have also identified the corresponding reserve market price required to maintain reliable operation. Additionally, we have explored the use of a local reserve market to address procurement shortages. We have examined the potential benefits of a local reserve market and analyzed how changes in market participants' decisions can affect the reliability of electricity systems.

1. はじめに

現在、日本では、需給を一致させるための主な電力市場として電力スポット市場と需給調整市場が存在する。この2つの市場に関する課題として、スポット市場への入札供給力不足と需給調整市場への入札調整力不足が挙げられている¹⁾。著者は、この課題が生じる原因を理論的に明らかにし、電力システムの安定運用のための電力市場を研究した。理想的な完全競争の電力市場モデルを仮定し、その下で合理的な調整力提供者(RP)の意思決定メカニズムを定式化し、意思決定による発電機の供給特性に関して考察を行った。また、数値解析によりスポット市場価格と調整力市場価格の相互作用による需給平衡に及ぼす影響を明らかにした。さらに、調整力の調達不足を解決するためにローカル調整力市場を考え、RPの異なる意思決定メカニズムに基づいた解析を行い、調整力調達に与える影響を明らかにした。

2. 理論分析のための仮定の電力システムモデル

電力システムモデルを次のように仮定した。まず電力システムは多数の小規模火力発電機(SG)と太陽光発電PVおよび需要家から構成されているものとした。電力市場はスポット市場、調整力 Δ kWh 市場、調整力 kWh 市場から構成され、全ての市場は完全競争市場であると仮定した。また調整力提供者 RP(SGを所有)は全ての市場に入札可能とし、PV発電事業者はスポット市場にのみ0JPY/kWhで入札をするものとした。

ここで RP の合理的な意思決定は、全ての市場から得られる利潤の合計を最大にするように電源出力を決定するものとした。ただし系統運用者 SO が調整力を発動する前に、RP は調整力 Δ kWh 市場(以下、調整力市場)において収入を得られるので、調整力 kWh 市場では RP の利潤ゼロとなるように市場価格が決定されるものと仮定した²⁾。

3. 電力スポット市場と需給調整市場の相互作用が需給平衡に及ぼす影響

系統容量 10 MW 規模の同じ構成のローカル系統が 1000 存在し、それらがすべて連系されているモデルを仮定した。各ローカル系統には、2 機の SG、1 機の PV が存在する。SG の特性は、発電費用関数 $C^E(P) = (0.00250P^2 + 2.2P + 66) \times 0.5$ [JPY]、最低出力 2000 kW、定格出力 5000 kW とし、2 機共に同じ特性とした³⁾。PV は、スポット市場に 5000 kW を入札するが、実需給時に出力が 4000 kW に低下し、ローカル系統内で 1000 kW の不足インバランスが生じる状況を想定した。SO は、1654 kW の調整力を調整力市場から調達し、実需給時に調整力を発動してインバランス解消するものとした。需要家(小売)は、スポット市場で調達できた電力量のみを消費できるものとした。また、需要量の予測誤差はないものとした。これらの仮定のもと、スポット市場価格 π^E を 15 JPY/kWh に設定し、調整力市場価格 π^R が 1、2、3 JPY/kWh のケースおよび調整力市場が存在しないウ

ース($\pi^R = 0$)について解析した。なお RP の市場価格の予測には誤差は生じないものとした。

図 1 に各時点の電力需給平衡を示す。時点(a)では、調整力市場が存在しない場合、SG は 2560 kW の供給力を入札する。しかし調整力市場価格 1 JPY/kW の場合は、供給力を400kW 低下させ、2160 kW を入札している。また、2、3 JPY/kW の場合は、入札せず、発電機を停止する意思決定を行っている。これらの結果より、調整力市場価格が高くなるとスポット市場で約定する供給力が低下することがわかる。

時点(b)では、1、3JPY/kW の2 ケースでは、SO が募集量の 1654 kW の調整力を調達できている。しかし調整力市場が存在しない場合と 2 JPY/kW の場合では、調整力を調達できていない。これは、調整力を調達可能な調整力市場価格の範囲が存在し得ることを示している。また 3 JPY/kW の場合は、SG 1 が調整力を提供するため最低出力で系統に接続する必要があることを示している。すなわち、スポット市場で落札されなかった電源による供給力が生じており、その結果供給過剰を引き起こしている。そのため、需給平衡維持のため、SO は PV 出力を抑制する必要があることを示している。

時点(c)では、予測誤差の結果生じたPV出力の低下により、各ケースで供給力が 1000 kW 減少し、不足インバランスが生じている。3 JPY/kW の場合は、SO は PV に対して 1000 kW まで出力抑制を行うことで、需給平衡を維持している。時点(d)では、調整力市場が存在しない場合と 2 JPY/kW の場合で、SO が調整力を発動できず、インバランスを解消できていない。その結果、需給平衡を維持するために 1000 kW の負荷遮断が行われる必要がある。一方、1 JPY/kW の場合は、調整力を 1000 kW を発動することで需給平衡を維持できている。3 JPY/kW の場合は、PV 出力の抑制によって需給平衡が維持されている。

上述した通り、調整力市場の存在により負荷遮断を回避できることが理論的に確認された。また、需給

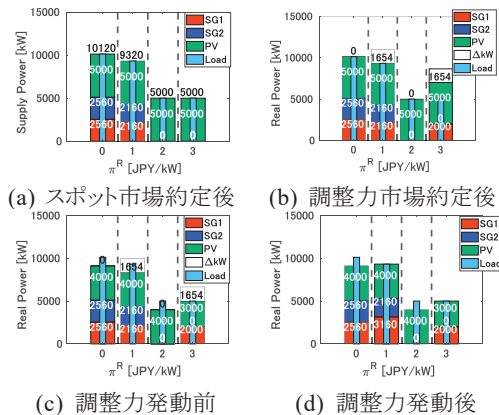


図 1 各時点における電力需給平衡

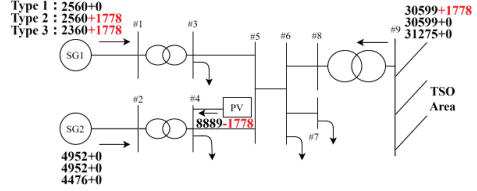


図 2 ローカル系統の有効電力潮流

平衡を維持するための適切な調整力市場価格が存在することを明らかにした。

4. ローカル調整力市場における調整力提供者の意思決定の違いによる調整力調達問題

調整力調達不足の解決のために、分散した調整力資源から調整力を得るためにローカル調整力市場(以下、L-PREx)が有用でないかと考えられる。ただし、市場調達による不確実性の一つとして RP の意思決定の仕方が調達される調整力および電力潮流に影響を及ぼすと考えられる。そこで次の 3 タイプの意思決定の仕方について解析を行った。Type 1: スポット市場のみに入札。Type 2: スポット市場で利潤最大化を行い、スポット市場と L-PREx に入札。Type 3: 2つの市場の合計の利潤を最大化して、スポット市場と L-PREx に入札。

図 2 にローカル系統の有効電力潮流を示す。第 1 項が供給力、第 2 項が調整力またはインバランスを示す。Type 1 では、PV 出力の変動によって生じた不足インバランスの 1778 kW が上位系統(TSO Area)によって吸収されている。Type 2 と Type 3 では、ローカル系統内の調整力により PV 出力の変動を吸収している。以上より、L-PREx が存在すればローカル系統内で需給バランスを維持できることがわかった。なお Type2、Type3 では調整力発動により、G1 の出力が計画時よりも 1778kW 大きくなっている。このことは、ノード#1-#5 間とノード#2-#5 間の潮流を大きく変化させることを示しているので、送電容量制約等により調整力の発動が制限される可能性がある。

5. まとめ

本研究ではマイクロ経済学に基づいた理想的な電力市場を前提とした解析により、需給平衡を維持するための調整力市場価格が存在し得ることを示した。また、電力ネットワークの潮流制約により調整力を発動できない可能性があり得ることも示した。

文献

- 1) 資源エネルギー庁:「あるべき市場の仕組みについて」, 第 2 回 あるべき卸電力市場、需給調整市場及び需給運用の実現に向けた実務検討作業部会 資料 4 (2022)
- 2) 経済産業省:「需給調整市場ガイドライン」(2021)
- 3) 電気学会:「電力系統標準モデルの拡充システムモデル」(2001)

修士学位論文要約（令和 5 年 3 月）

60kV 級撤去 CV ケーブルにおける水トリー発生様相の観察と 交流損失電流の評価に関する研究

木樽 翼

指導教員：斎藤 浩海, 研究指導教員：八島 政史

Study on Observation of Water Trees Occurrence and Evaluation of AC Loss Current in 60kV Class Removed XLPE Cable

Tsubasa KOGURE

Supervisor : Hiroumi SAITOH, Research Advisor : Masafumi YASHIMA

When XLPE cables are operated for several years to several decades, an insulation degradation phenomenon called water-tree occurs, which significantly degrades the insulation performance of XLPE cables. In this study, we first observed the occurrence of micro bow-tie trees in three 60kV class removed XLPE cables that were subjected to a pre-breakdown discharge detection test and an AC loss current measurement test, based on the analysis for slices of the insulation layer cross sections. Next, the observed micro bow-tie trees are simulated by an electric field model, and the AC loss current, the third harmonic component are analyzed and compared with the diagnostic results of the AC loss current measurement test conducted on the removed cable. Furthermore, we will attempt to estimate the breakdown voltage of the cable by analyzing the maximum electric field value at the tip of the micro bow-tie tree.

1. はじめに

60kV 級の経年撤去 CV ケーブルに対して実施された絶縁破壊前駆遮断試験の結果から、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⁾。一方で、前駆遮断点以外の微小な水トリーの存在を報告した例は少ない。また、60kV 級 CV ケーブルに対する絶縁劣化診断手法である交流損失電流法は、交流損失電流に含まれる第 3 次高調波成分に基づいて劣化判定が行われているが、実ケーブルの水トリーに対して上記の特徴が現れるとの検証はなされておらず、劣化指標としての適否を解明する必要がある。

本研究では、3 本の 60kV 級撤去 CV ケーブルに対して、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、観察から得られた微小ボウタイトリーを電界モデルによって模擬し、交流損失電流ならびに第 3 次高調波成分の波高値 (I_3)、その重畳位相 (θ_3) を解析し、撤去ケーブルにて実施された交流損失電流測定試験による診断結果と対比する。さらに、微小ボウタイトリー先端の最大電界値 (E_{max}) の解析からケーブルの絶縁破壊電圧の推定を試みる。最後に、微小ボウタイトリーが 2 種類の水トリー劣化指標に及ぼす影響について考察する。

2. 60kV 級撤去 CV ケーブルにおける水トリー発生様相の観察

本研究で調査対象とした 60kV 級撤去 CV ケーブルは、東北電力ネットワーク管内で実運用された 3 本の

線路(線路①, 線路②, 線路③)である。マイクロSCOPEを用いてケーブルスライス片の拡大画像を撮影すると、全ての線路において、電界の方向に沿って伸展した無数の微小ボウタイトリーを確認することができた。そこで、各線路につき 4 枚のスライス片を無作為に抽出し、スライス片 1 枚につき約 5mm² の範囲を 12 ヶ所撮影した。撮影した画像に対し、画像解析ソフトを用いて、トリー長 0.008mm 以上のボウタイトリーの長さおよび個数を計測し(トリー長 0.001mm 刻み)、N-L 分布を作成した(図 1)。その結果、長いボウタイトリーほど本数が少ない傾向が確認された。また、観察されたボウタイトリーの本数は、線路①>線路③>線路② という順番であったが、線路の経年は、線路②>線路③>線路①であり、経年とボウタイトリーの発生数は必ずしも一致していないことが判明した。水トリー発生数を決める要因として、CV ケーブルの布設環境、運用条件などが要因として考えられる。

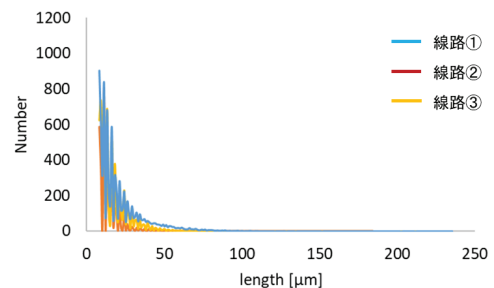


図 1 ボウタイトリーの N-L 分布

3. 水トリーのモデル化—交流損失電流の評価

電界モデルによる解析では、有限要素法に基づく電界計算ソフト(Simcenter MAGNET Electric)を用いた。60kV級撤去CVケーブルの絶縁層にて観察された微小ボウタイトリーは様々な形状および大きさを有しており、これらを個別にモデル化することは困難である。そこで、ボウタイトリーの標準モデルを線路ごとに作成し、これが絶縁層内に分散していると仮定して解析を行った。標準モデルの形状は回転楕円体を2つ連結させたモデルとし、寸法については各線路の絶縁層から観察されたボウタイトリーの平均長さ a と太さを適用した。0.300mmを標準モデルの長さとして固定し、算出した縦横比を太さに適用した。ボウタイトリーの標準モデルのケーブルモデル内での配置箇所は文献²⁾を参考にし、50本配置した。各種物性値は文献²⁾を参考に設定し、非線形の程度を表す定数 k を 9.50×10^{-10} 、線形抵抗要素 r を 1.0×10^{11} とした。印加電圧は撤去ケーブルにて交流損失電流を実測した際の測定条件と揃えるために、線路①では15kV 50Hz、線路②では18kV 50Hz、線路③では12kV 50Hzとし、交流損失電流に含まれる第3次高調波成分の波高値(I_3)とその重畳位相(θ_3)を解析した。

筆者らの先行研究では、電界モデルを用いた水トリーの解析結果から、 I_3 は水トリーの体積および本数にほぼ比例するという知見を得ている。これを考慮し、撤去ケーブルにて実測された値との比較を行うため、ケーブル全体にわたる I_3 をN-L分布から体積と本数で換算し、式(1)から推定した。長さ L [mm]の微小ボウタイトリー N_L [本]によって発生する I_3 の値を I_3^L [A]、観察範囲とスライス片面積の比を R_S 、スライス片の厚さとケーブル長の比を R_L とし、観察された全ての長さの微小ボウタイトリー(最小長さ a [mm]、最大長さ b [mm])における I_3^L の値を足し合わせることで、ケーブル試験長全体に流れる第3次高調波成分の波高値 I_3 を推定した。

$$I_3 = \sum_{L=a}^b I_3^L \cdot R_S \cdot R_L \quad (1)$$

推定値と実測値を比較すると(表1)、線路①、②については、ケーブル全体にわたる微小ボウタイトリーを考慮することで概ねの推定が可能であるとわかった。ただし、線路③については I_3 で4.5倍、 θ_3 で1.4倍程度の差が生じたため、今後その要因を検討する予定である。

表1 I_3 , θ_3 の推定値と実測値の比較

	導電率A	導電率B	導電率C
推定値 I_3 [A]	8.04×10^{-6}	6.91×10^{-6}	5.85×10^{-6}
推定値 θ_3 [°]	-56.5	-50.4	-44.3
実測値 I_3 [A]	4.7×10^{-6}		
実測値 θ_3 [°]	-45		

4. 水トリーのモデル化—水トリー先端電界の評価

線路ごとに最も長く進展していたボウタイトリーの寸法を読み取ってモデル化し、水トリー先端電界(E_{max})の解析を行った。解析ソフト、ボウタイトリーモデルの形状、各種物性値は交流損失電流の解析の場合と同じとした。印加電圧はケーブル撤去後に実施された前駆遮断試験にて実測された前駆遮断電圧と同等の値を設定した。線路①では130kV 50Hz、線路②では155kV 50Hz、線路③では155kV 50Hzの交流電圧とした。解析から得られた E_{max} (表2)は、XLPEの絶縁破壊電界とされる値(220kV/mm~300kV/mm³⁾)よりも比較的小さい。そのため、絶縁層内に無数に存在する微小ボウタイトリーは、絶縁上の弱点部にはなりにくいと考えられる。

表2 水トリー先端電界 E_{max} の解析結果

	線路①	線路②	線路③
印加電圧 [kV _{rms}]	130	155	155
水トリー先端電界 E_{max} [kV/mm]	140	112	170

5. まとめ

60kV級の経年撤去CVケーブルの絶縁層には微小なボウタイトリーが無数に存在することを明らかにした。また、ボウタイトリーをモデル化して交流損失電流解析および電界解析を行った結果、以下のことが判明した。まず、損失面での劣化を決定するのは交流損失電流であり、その判定指標(I_3 , θ_3)はケーブル中のトリーの総体積の影響を受けると想定され、ケーブル全体の交流損失電流の形成要因は主にボウタイトリーと考えられる。一方、絶縁面での劣化を決定するのは水トリー先端の最大電界(E_{max})であり、これは水トリー長さや先端曲率で決まるため、1本でも E_{max} が大きなものがあれば絶縁耐力の低下要因となるが、ボウタイトリーの寄与度は小さいと考えられる。今後、絶縁面の劣化指標と損失面の劣化指標を区別して評価することが推奨される。

文献

- 1) 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)
- 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

修士学位論文要約（令和 5 年 3 月）

Fe-Si 薄膜における磁化ダイナミクスの Si 組成依存性に関する研究

蔣 擘

指導教員：遠藤 恭

Study on effect of Si composition on magnetization dynamics of various thick Fe-Si polycrystalline films

Ye Jiang

Supervisor: Yasushi ENDO

This master thesis describes study on effect of Si composition on magnetization dynamics of various thick Fe-Si polycrystalline films. For every film thickness, the in-plane effective damping constant ($\alpha_{//}$) decreased and then increased as the Si composition was increased. $\alpha_{//}$ decreased slightly and then increased markedly as the saturation magnetostriction (λ_s) was increased, suggesting that $\alpha_{//}$ was correlated with λ_s was observed for Fe-Si films. This tendency is similar to that of Ni-Fe films. On the other hand, the out-of-plane effective damping constant (α_{\perp}) kept almost constant except some Si compositions for every film thickness. The α_{\perp} values almost became lower than those of $\alpha_{//}$, regardless of Si composition or thickness, which might be derived from only the intrinsic damping. On the basis of these results, it is suggested that particular attention should be paid to considerable changes of magnetoelastic properties and directionality when adjusting the in-plane effective damping constant of magnetically soft films.

1. はじめに

磁性ランダムアクセスメモリ (Magnetic Random Access Memory; MRAM) や磁性論理演算子などの省エネ型スピントロニックデバイスに関する研究開発が盛んに行われている。なかでも、MRAM に関しては、低消費電力 (省エネ化) を実現するためには、データ書き換え時の臨界電流を低減させることが必須となっている。この臨界電流は MRAM を構成する磁性薄膜のダンピング定数に比例することから、ダンピング定数を低下させることが省エネ化につながる。^{1),2)} そのためには、ダンピング定数の機構を理解し、制御することが重要である。

ダンピング定数は磁性薄膜における磁化の高周波磁界応答 (磁化ダイナミクス) の減衰の程度を表す重要なパラメータの一つである。³⁾ その大きさによってスピン格子緩和が著しく変化し、同時に磁気異方性や磁歪などの他の磁気パラメータも変化する。したがって、ダンピング定数の機構の理解とその制御には、ダンピング定数と他の磁気パラメータとの関連性を理解することが鍵となる。

これまでに、我々の研究グループでは、他の磁気パラメータとして磁歪に着目して、Ni-Fe 多結晶薄膜におけるダンピング定数と飽和磁歪との間に相関性があることを見出した。^{4),5)} また、第三元素の添加によって、ダンピング定数や飽和磁歪を制御できることも報告した。^{6),7)} その一方で、Ni-Fe 薄膜において報

告されているような、ダンピング定数と他の磁気パラメータとの関連性に関する研究報告は少なく、ダンピング定数の機構に関する議論も不明瞭である。

本研究では、Fe 系二元合金として Fe-Si に着目し、Si 組成と膜厚の異なる Fe-Si 多結晶膜を作製し、それらの構造と静的・動的磁気特性を検討した。得られた結果からの面内有効ダンピング定数 ($\alpha_{//}$) と飽和磁歪 (λ_s) の相関性の有無について議論した。また、Fe-Si 薄膜における磁化ダイナミクスの理解するために、面直方向有効ダンピング定数 (α_{\perp}) についても詳細に検討した。

2. 膜厚の異なる Fe-Si 薄膜における構造および磁気特性の Si 組成依存性

図 1 は Fe_{100-x}Si_x 多結晶薄膜における面内有効ダンピング定数の Si 組成依存性の一例である。 $\alpha_{//}$ は Si 組成の増加とともに減少し、Si 組成 15.7 at.% で極小となり、さらに Si 組成を増加させると増加した。また、 $\alpha_{//}$ と λ_s との関連性の有無について理解するために、 λ_s を関数として $\alpha_{//}$ とプロットした。その結果の一例を図 2 に示す。 $\alpha_{//}$ は λ_s の増加にともない減少し、その後増加した。 λ_s が 2.4×10^{-5} 付近で $\alpha_{//}$ は最小となった。この Fe-Si 薄膜における $\alpha_{//}$ と λ_s の関連性は Ni-Fe 膜の場合と類似している。これらの結果は他の膜厚においても同様にみられた。したがって、Fe-Si 薄膜では膜厚に

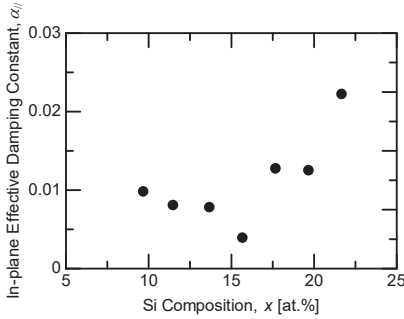


図1 Fe_{100-x}Si_x 薄膜における面内有効ダンピング定数(α_{||})のSi組成依存性との一例(75 nm厚)

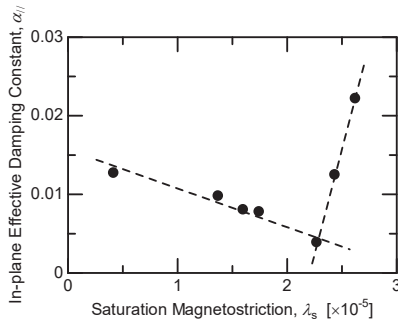


図2 Fe_{100-x}Si_x 薄膜における面内有効ダンピング定数(α_{||})と飽和磁歪定数(λ_s)との相関性の一例(75 nm厚)

関係なく α_{||} と λ_s との間に関連性があることを意味している。また、この関連性は、α_{||}を制御するためには、λ_sの取り扱いに十分注意する必要があることを示唆している。

3. Fe-Si 薄膜の磁化ダイナミクス

Fe-Si 薄膜の磁化ダイナミクスを理解するために、膜厚の異なる Fe-Si 薄膜における面直有効ダンピング定数(α_⊥)のSi組成依存性について検討し

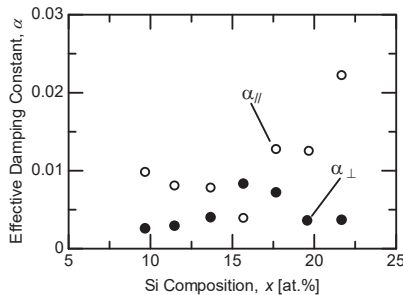


図3 Fe_{100-x}Si_x 薄膜における面直有効ダンピング定数(α_⊥)のSi組成依存性の一例(75 nm厚, 図中の●は面直有効ダンピング定数, ○は面内有効ダンピング定数の結果を表している。)

た。膜厚によって α_⊥ の Si 組成に対する変化は異なった。すなわち、10 および 30 nm 厚の場合には、α_⊥ は Si 組成の増加にともない減少し、その後増加した。一方で、75 nm 厚の場合には、α_⊥ は一部の Si 組成を除いてほぼ一定となった(図2)。また、α_⊥ 値に関しては、膜厚と Si 組成に関係なく α_{||} 値と比較するとおおむね低くなった。これらの値の違いは、α_⊥ が材料固有ダンピングのみに由来するものであり、α_{||} が材料固有ダンピングと外部要因によるダンピングが重なったことによるものと考えられる。

以上の結果は、デバイス応用する上で磁性薄膜における磁化ダイナミクス(ダンピング)の方位性を慎重に考慮する必要があることを意味している。

4. まとめ

本研究では、Fe-Si 薄膜における構造および静的・動的磁気特性について詳細に検討した。α_{||} と λ_s が関係していることがわかった。この結果は、Ni-Fe 多結晶薄膜においてゼロ磁歪近傍で観測された α_{||} と λ_s の関連性と類似している。この関連性は、α_{||} を制御するためには、λ_s の取り扱いに十分注意する必要があることを示唆している。また、α_⊥ 値は α_{||} 値と比べて低くなった。これらの違いは、磁性薄膜における磁化ダイナミクス(ダンピング)の方位性を慎重に考慮する必要があることを意味している。

文献

- 1) C. Chappert, A. Fert, and F. N. Van Dau, Nat. Mater., **6**, 813-823 (2007).
- 2) J.A. Katine, Eric E. Fullerton, j. Magn. Magn. Mater., **320**, 1217 (2008).
- 3) T. L. Gilbert, IEEE Trans. Magn., **40**, 3443-3449 (2004).
- 4) Y. Endo, Y. Mitsuzuka, Y. Shimada, and M. Yamaguchi, J. Appl. Phys., **109**, 07D336 (2011)
- 5) Y. Endo, O. Mori, Y. Shimada, S. Yabukami, S. Sato, and R. Utsumi, Appl. Phys. Lett., **112**, 252403 (2018).
- 6) Y. Endo, Y. Mitsuzuka, K. Okawa, Y. Shimada, and M. Yamaguchi, IEEE Trans. Magn., **47**, 3324-3327 (2011),
- 7) Y. Endo, Y. Mitsuzuka, Y. Shimada, and M. Yamaguchi, IEEE Trans. Magn., **48**, 3390-3393 (2012).

修士学位論文要約（令和 5 年 3 月）

複数の TEV センサを活用した箱型筐体電力設備における 部分放電信号の到来方向研究に関する研究

白石 幸範

指導教員：斎藤 浩海， 研究指導教員：八島 政史

Study on Estimating the Arrival Direction of Partial Discharge Signals in Box Housing Power Facilities Utilizing Multiple TEV Sensors

Yukinori SHIRAIISHI

Supervisor : Hiroumi SAITOH, Research Advisor : Masafumi YASHIMA

Many number of Japan's electric power distribution facilities are aging. Thus, there are elevated expectations for a deterioration diagnosis method using simple sensors. In this study, we are investigating a method to diagnose degradation by capturing the partial discharge (PD) signal with multiple TEV sensors. Specifically, we attempted to estimate the arrival direction of the PD source by using the following three points of interest : (1) detection time difference, (2) wave height value, and (3) frequency component ratio. As a result, we were able to confirm the attenuation due to the distance between the TEV sensor and the PD source at three focus points, which we found to be helpful in estimating the arrival direction.

1. はじめに

近年のわが国では、高度経済成長期に導入された多くの電力流通設備が高経年化しつつあり、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。本研究では、電力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) 診断の実用化を目指している。これまでに複数の TEV センサには PD 源との距離による検出時間差が出る事が判明している¹⁾。そこで、検出時間差に加えて、波高値と周波数成分比の 3 つの着眼点を用いて PD 信号の到来方向推定を試みた。

2. 開放空間における PD 信号の伝搬特性

TEV センサは空間を伝搬する電磁波成分と設備筐体に誘起される面電流成分を検出している。TEV センサの検出特性を解明する諸々の実験を行う前に、まずは筐体に貼り付けず、空中に浮かせた状態で使用することのできる磁界プローブで電磁波成分のみを検出し、伝搬特性の解明を試みた。使用した磁界プローブは 1 辺が 5cm の正方形のループアンテナであり、周波数帯域は 1MHz~1.5GHz である。その後、鉄板に貼り付けた TEV センサを用いて PD 信号の検出を行った。PD 源から放出される電磁波を磁界プローブと TEV センサで検出するための実験系を構築した (図 1)。測定は図 1 の 50Ω ショント抵抗による電流、さらに磁界プローブと TEV センサをオシロスコープに接続して行った。TEV センサと PD 源との距離 L は 25cm, 50cm, 75cm, 100cm の 4 通りで測定を行った。PD 源として、図 1 に示す針-平板電極を用いた。

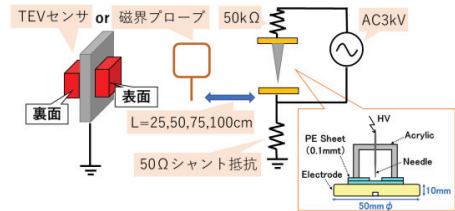


図 1 開放空間で PD 信号を検出するための実験系

まず、磁界プローブによる実験結果について述べる。検出時間差について実験値と電磁波を光速として算出した理論値を比較し、その結果を図 2 (左上) に示す。ここで、検出時間差はショント抵抗と磁界プローブの検出時間差を表している。50cm での結果を外れ値 (想定からの逸脱値) と見ると、PD 源からの距離が長くなるほど検出時間差も大きくなるという結果が得られた。

図 2 (右上) に検出された波高値の結果を示す。理論上、電磁波の強さは距離に反比例して波高値は小さくなると考えられる²⁾。25cm での結果を外れ値とみると、50cm~100cm では距離が長くなるほど波高値が減衰するという傾向が得られた。

図 2 (下) に周波数成分比について分析した結果を示す。主に 140MHz, 90MHz, 30MHz にピーク周波数が見られた。140MHz の成分に着目すると、PD 源からの距離が長くなるほど、減衰する傾向が確認できた。

次に、TEV センサによる実験結果について述べる。検出時間差について、その結果を図 3 (左上) に示す。磁界プローブと同様に PD 源からの距離が長くなるほど、検出時間差も大きくなるという結果が得られた。

図3(右上)に検出された波高値の結果を示す。鉄板を用いたため、面電流を検出しており、その面電流は鉄板と接地線間で共振現象を起こすため、電磁波のみの場合よりも検出信号は大きくなる³⁾。したがって、波高値の距離減衰が見られなかったと考えられる。

図3(下)に周波数成分比について分析した結果を示す。主に140MHz, 90MHz, 30MHzにピーク周波数が見られた。鉄板を使用した場合、12MHz付近の比較的low周波の強い成分を検出した。これは接地線による電流成分が鉄板との共振を起こしている影響によるものだと考えられる。また、low周波成分は140MHzの高周波成分と比較して減衰しにくいことも分かった。

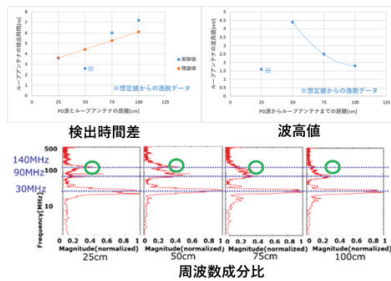


図2 磁界プローブによるPD信号検出特性

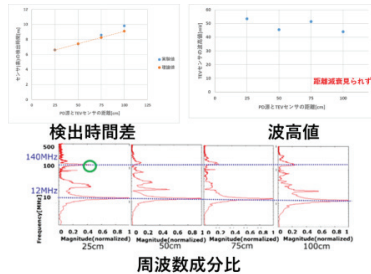


図3 TEVセンサによるPD信号検出特性

3. 箱型筐体モデルにおけるPD信号の伝搬特性

実設備の形状に近い箱型筐体モデルにTEVセンサを配置し、PD源の内外判定を試みた。箱型筐体モデルを図4(左)に示す。図4に示すように4台のTEVセンサを配置した。PD源を筐体外部に配置したとき、側面1からの距離L=50cm,100cm,150cmの計3パターンに変化させた。PD源を筐体内部に配置したとき、図4(右)の計4パターンに変化させた。

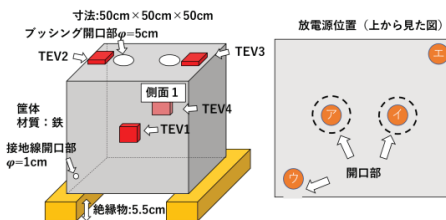


図4 箱型筐体モデルとPD源の配置

PD源を筐体外部に配置したとき、検出時間差はL=50cmのとき、精度良く観測することができた。L=100cm, 150cm, のときは、時間差が理論値通りとはならなかった。これは、距離によるPD信号の減衰によってノイズとの識別が困難となり、PD信号の立上り点を正確に特定できなかったことが原因と考えられる。波高値と高周波成分の距離減衰は開放空間での実験と同様に確認することができた。

PD源を筐体内部に配置したとき、波高値に関しては接地線開口部付近の出力が大きくなるという特徴を確認でき、PD源を外部に配置したときとの違いが明らかとなった。したがって、TEVセンサを開口部付近や接地条件を考慮して配置することで、PD源が筐体の内外にあるか外部にあるかの内外判定に活用できると考えられる。

検出時間差と高周波成分の減衰に関しては、明確には確認することができなかった。PD源を外部に配置したときよりも、PD源が発する電磁波や筐体表面に誘起される面電流の伝搬が筐体内部で何度も反射を繰り返すため、検出信号が複雑となることや、0.1ns~1nsのオーダーでの検出時間差の識別が求められるため、PD信号の立上り点を精度良く検出できなかったことがその要因と考えられる。

4. まとめ

PD源の到来方向推定において、3つの着眼点の内、検出時間差に着目することが最も優れており、理論上はPD源の位置まで推定ができると考えられる。しかし、周囲環境からのノイズなども存在することから、検出時間の測定には誤差が介在することが分かった。そのため、検出時間の誤差を補完する役割として、波高値と高周波成分の距離減衰も考慮に入れて総合的に判断することで、到来方向推定の精度を高めることができるものと考えられる。

文献

- 1) 上田尚哉, 新貝健将, 八島政史, 倉石隆志: 「TEVセンサの部分放電検出特性についての基礎検討〜FDTD法による解析と実測データの比較検討〜」, 第49回電気電子材料シンポジウム, A-5, pp.44-49 (2018).
- 2) 左貝潤一 著: 「電磁波工学エッセンシャルズー基礎からアンテナ・伝送線路まで」, pp.145-146, 共立出版 (2020)
- 3) 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low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5年3月）

電力システムの周波数安定化を対象とした負荷制御における 通信遅延による制御性能劣化の低減方策

堰合 賢吾

指導教員：斎藤 浩海

Method for Suppressing Control Performance Degradation due to Communication Delay in Load Control for Frequency Stabilization of Power System

Kengo Sekiai

Supervisor: Hiroumi Saitoh

Currently, the introduction of renewable energy sources is being promoted on the background of environmental problems. As the amount of renewable energy sources introduced increases, their output fluctuations may adversely affect the power quality of power systems. Therefore, load control, which contributes to frequency stability by varying the power consumption of demand-side load equipment, is attracting attention. One of the problems in controlling demand-side load equipment is communication uncertainty, which may cause large delay times and communication losses depending on the communication environment. Therefore, the purpose of this study is to clarify the effect of communication quality on the control performance of load control and to seek measures to reduce the control performance degradation of load control even under poor communication quality conditions.

1. はじめに

風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーの導入量が増加すると、その出力変動により電力システムの電力品質に悪影響を及ぼす恐れがある。そこで、需要側の負荷機器の消費電力を変化させることで、周波数安定性に貢献する負荷制御が注目されている^(1,2)。負荷制御を行うときの問題点の1つとして、通信の不確実性があり、通信環境により大きな遅延時間や通信損失が発生してしまう可能性がある。意図せずに負荷制御の制御ループに遅延が入ると、負荷機器の消費電力変更量が振動的になり問題となる可能性がある。そこで、本研究では通信品質が負荷制御の制御性能に与える影響を明らかにし、通信品質が悪い状況下における、負荷制御の制御性能劣化を低減する方策を提案し、その効果を示している。

2. 電力システムにおける周波数制御

図1に本論文で想定する負荷制御システムを含む電力システムの周波数制御系の概念図を示す。電力システムでは、周波数をもとにしたガバナフリーとLFCによって発電機の出力を調整することで、電力の需要と供給のバランスをとっている。そして、本研究で想定する負荷制御では、負荷のうち可制御な負荷の消費電力を変更することで、周波数変動を抑制する機能を持たせるものとしている。負荷制御による周波数変動の抑制効果を得るために負荷機器一台では小容量であるため、多数台の負荷機器をアグリゲータと呼ばれる事業者が

遠隔・統合制御することが想定されている。負荷制御では、広域に分散して存在する膨大な数の需要側システムを遠隔・統合して制御するため、コストと汎用的な通信を用いることの観点から、インターネット通信や無線通信といった通信ネットワークを用いる必要がある。このような低品質な通信ネットワークでは、パケットロスによる通信パケットの損失や通信遅延が長くなるなど、通信品質による負荷制御の性能低下が問題になる可能性がある。

3. 通信品質が負荷制御の制御性能に及ぼす影響

電力システムの周波数制御系モデルを用いて通信損失が負荷制御の制御性能に与える影響を調べた。図2に通信システムを含む負荷機器モデルを示す。アグリゲータと需要側制御器間の通信システムにおいて通信損失が発生するものとしており、需要側制御器ではアグリゲータから受信した信号をもとに、負

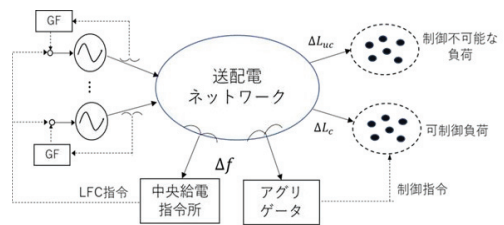


図1 負荷制御を含む電力システム概念図

荷機器の消費電力を変更するものとしている。そして、需要側制御器では、通信損失が発生した際には通信が再び成功するまで過去のアグリゲータからの指令値を保持し、それを制御に使用するものとした。

通信成功確率 p を0.5から1まで0.1ずつ変化させ、50回ずつシミュレーションを行った時の周波数偏差のRMS値(二乗平均平方根)を表1に示す。周波数偏差 Δf のRMS値は、通信成功確率 p が低下するほど大きくなり、通信損失によって負荷制御による周波数変動抑制効果が低減していることが分かる。一方で、通信成功確率 $p = 0.5$ と非常に低い状態でも、負荷制御を行っていないときよりも周波数偏差 Δf のRMS値が低下しており、負荷制御の周波数変動抑制効果があることが分かった。

4. 通信品質による負荷制御性能劣化の低減方策

3章で示した通信品質による負荷制御の性能劣化を低減する方策を図3に示す。需要側制御器において、システムの周波数を測定できるものと想定し、測定した周波数とアグリゲータから受信した制御信号をもとにアグリゲータモデルを推定する⁽³⁾。制御信号が通信損失により届かなかった際に、アグリゲータの推定モデルと需要側制御器において測定した周波数を元に受信に失敗した指令値を推定し、その推定値を用いて負荷機器の消費電力を変更するものとした。

提案手法の有効性を評価するために、3章で用いた周波数制御モデルを用いてシミュレーションを行った時の周波数偏差を図4に示す。周波数をもとに指令値を推定する提案手法により、多くの時間帯で周波数偏差が小さくなっていることがわかる。また、提案手法、従来手法、通信損失が発生しない場合における制御性能の比較結果を表2に示す。周波数偏差 Δf のRMS値は、従来手法よりも提案手法の方が低下しており、通信損失によって劣化した負荷制御による周波数変動抑制効果が向上していることがわかる。また、負荷制御による制御量 ΔLc のRMS値も提案手法の方が小さく、効率的に周波数変動抑制を行えることが分かる。

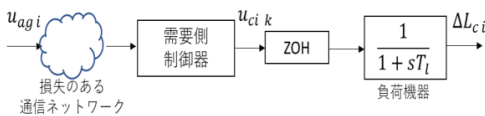


図2 通信システムを含む負荷機器モデル

表1 通信損失と制御性能の関係

p	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	LCなし
Δf_{RMS} [Hz]	0.0511	0.0499	0.0488	0.0481	0.0474	0.0470	0.0657

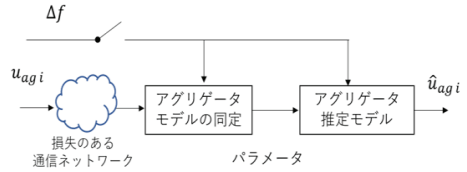


図3 提案手法の制御ブロック

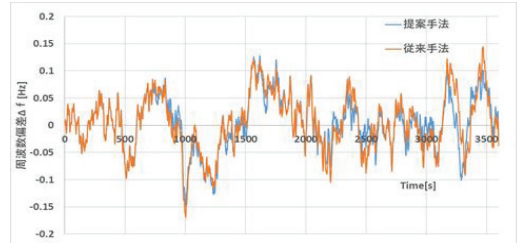


図4 周波数偏差

表2 提案手法の有効性評価

	提案手法	従来手法	損失無し
Δf_{RMS} [Hz]	0.0535	0.0576	0.0514
ΔLc_{RMS} [MW]	27.29	29.00	27.21

5. 結論

負荷制御に着目し、その際に通信品質が負荷制御の性能に与える影響をシミュレーションにより検討した。その結果、通信損失の発生する確率が高くなるほど、制御性能が劣化することを明らかにした。そして、通信損失による制御性能の劣化を低減する負荷制御方策を示した。通信損失が発生する状況下でも、需要側制御器において受信できなかった指令値をある程度推定することができ、推定した指令値を用いることで通信損失による制御性能の劣化を低減することができた。

文献

- 1) 菊池 広典, 浅野 浩志, 坂東 茂:「再生可能エネルギー電源大量連系時の業務用空調機電力制御による負荷周波数制御」, 電気学会論文誌B(電力・エネルギー部門誌), 135 巻 4 号 p. 233-240(2015).
- 2) A. Sato and H. Saitoh, "Application of Dynamic Quantizer to Load Control for Suppression of Power System Frequency Fluctuation", 10th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Asia, 2021
- 3) 低炭素社会戦略センター:「電気自動車を活用した負荷周波数制御の通信遅延補償のための制御方式の提案」(令和3年7月)

修士学位論文要約（令和 5 年 3 月）

電力系統周波数安定化のための VSG による有効な慣性力供給方法

高橋 大雅

指導教員：斎藤 浩海

Effective Inertia Power Supply Method by VSG for Power System Frequency Stabilization

Hiromasa TAKAHASHI

Supervisor: Hiroumi SAITOH

Assuming that the amount of renewable energy power sources will further increase in the future, VSG will be used to improve frequency stability. Many VSG control logics have been presented in previous studies, all of which aim to improve the stability of the power system. It has also been pointed out that VSG control may destabilize the output of inverters. However, there is little literature that quantitatively clarifies the grid conditions under which VSG is needed and how much VSG is required. Therefore, the author analyzed the effect of VSGs on the frequency stabilization when they are introduced into a power system, and aimed to clarify through numerical simulations how much VSGs should be introduced to maintain frequency stability when disturbances occur in multiple power system states. In addition, since the grid voltage must be properly protected for the VSG to effectively supply inertia power when it is introduced into the grid, the author attempted to propose a control scheme to improve both voltage and frequency stability by coordinating with the renewable energy source on the VSG power supply side.

1. はじめに

今後、再エネ主力電源化に伴いインバータ連系形電源が増加していくことで電力系統内の火力機等の停止が進むことが考えられ、その結果系統の慣性不足が懸念されている。その解決策の一つとしてインバータ電源に仮想的な慣性をもたせる仮想同期発電機 VSG が注目されている。先行研究では VSG が実際に必要となる系統状態やどの程度の VSG が必要なのかを定量的に明らかにしている文献が少ないため、筆者は VSG が電力系統に導入された際の周波数安定化効果について分析を行い、複数の電力系統状態において擾乱発生時にどれだけの量の VSG を導入すれば周波数安定性を保つことができるのかを数値計算シミュレーションによって明らかにすることを目的とした。また、VSG が系統に導入された際に有効に慣性力を供給するためには系統の電圧が適正範囲内に維持されている必要があることから、インバータ電源の供給力である再生可能エネルギー電源との協調によって電圧安定性と周波数安定性向上の両立をはかるための制御を検討した。

2. 電力系統の周波数安定性を保つために必要な VSG 導入量の算定¹⁾²⁾

同期発電機 SG と VSG、周波数制御能力を持たない再エネ(以下 RE)の3種に大別される電源で構成される電力系統モデルを用いて、電源構成が異なる複数の系統の周波数安定性を保つために必要となる最

低限の VSG の必要導入量を算定した。電源構成の表現として、系統運用時の非同期電源の導入率を表す指標 System Non-Synchronous Penetration, SNSP を用いた。また、周波数安定性が保たれていることの定義を、擾乱に対して系統周波数が事故時運転継続要件 (FRT 要件) を違反しないこととした。図 1 に数値計算シミュレーションに用いた系統の周波数制御モデルを示す。系統の電圧は常に安定に保たれているという仮定の下、電力ネットワークは考慮しないものとし、検討した。また、VSG を含むインバータ電源のモデルには周波数変動による解列特性を設定し、FRT 要件対応電源(VSG, RE の 50%)は FRT 要件の違反時に一斉解列されるようにした。FRT 非対応電源(RE の 50%)は 0.1Hz の周波数変動により解列が開始され、解列割合が周波数変動に比例して増加し 1.5Hz の周波数変動ですべての FRT 非対応電源が解列するよう設定した。

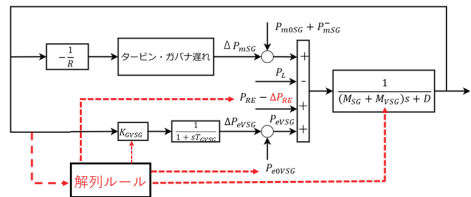


図 1 系統の周波数制御モデル

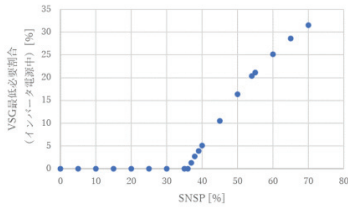


図2 周波数安定化に必要な VSG 導入割合と SNSP の関係

シミュレーションでは総需要を 10000MW で固定し、系統擾乱を 1000MW の同期電源の脱落とした。系統の周波数安定性を保つために必要なインバータ電源における VSG の割合と SNSP の関係を図 2 に示す。SNSP が 37%を超えると周波数安定性を保つために VSG の導入が必要となることが分かった。また、SNSP が 45%を超えると両者の関係がわずかに変化し、傾きが緩やかになっている。その理由は SNSP が 45%程度までは、FRT 要件違反の原因が最大周波数偏差 Nadir によるのに対して、それ以上では周波数変化率 RoCoF の要件逸脱によるものとなり、支配的な制約が変化したためであった。つまり、FRT 要件の違反が RoCoF によるものとなると系統慣性の問題となるので SNSP が 45%を超えるような電源構成の場合には、VSG を含めた系統慣性の増加策が必要になる。

3. VSG と大規模風力発電設備との協調による電力系統安定化手法

実際の系統ではインバータ電源の接続点の電圧が運転可能範囲を逸脱した場合、VSG の機能を果たせないことが考えられる。また、VSG 機能が系統電圧にどのような影響を与えるのかを明らかにする必要がある。図 3 に本研究で用いた電力系統モデルを示す。VSG の構成に必要な電力貯蔵装置として大規模風力電源 WF2 と結ぶ直流送電線の交直変換器に大型蓄電池 BES が接続されている構成を想定した。この構成の VSG では無効電力を供給・吸収し、母線電圧を維持できるものと仮定した。なお、一般に発電用 PCS の進相運転率が 0.8 以上としなければならないことから、本研究における VSG も進相運転率制約を守るようにモデル化した。

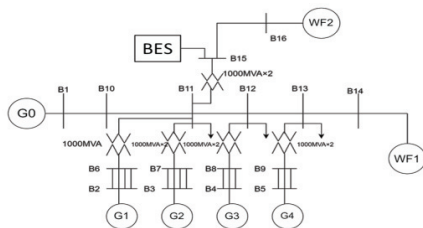
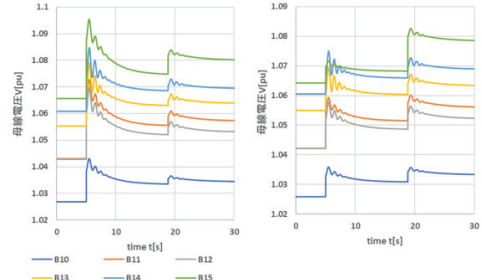


図3 仮想電力系統モデル



(a)WF2 の出力:0pu (b) WF2 の出力:0.3pu

図4 各母線電圧の時間波形

シミュレーションではじょう乱として G1 の一部の発電機が解列することを想定し、G1 の初期出力 500MW 分の需給インバランスが生じるものとした。その結果、解列した発電機に相当する慣性が減少することとなる。図 4 に WF2 の異なる出力状態での母線電圧の時間波形を示す。WF2 が出力しない状況(a)では、擾乱発生後一時的に各母線電圧に 0.025~0.03pu 程度の急激な変動が生じている。また、VSG 接続母線 B15 についても電圧を維持できずに急激な変動をしている。一方、WF2 の出力が 0.3pu のときの(b)では、0.015pu 程度の電圧変動で抑えられている。VSG の接続母線で電圧も変動を抑えているといえる。VSG が吸収可能な無効電力は BES が接続する交直変換器から出力される有効電力の大きさに依存するため、WF2 の出力が 0 の場合、擾乱発生直後に VSG は無効電力を十分に吸収できず、電圧上昇を抑えられていない。しかし WF2 が有効電力を出力することで VSG は無効電力を吸収できるようになる。したがって、VSG が系統電圧を制御しつつ、必要な慣性力を供給できるようにするためには、WF2 の運転状態と協調を図ることが重要であることが分かった。

4. まとめ

系統の周波数安定性を保つために必要となる VSG の導入量を電源構成を表す指標 SNSP に関して算定し、慣性不足によって周波数安定性が保たれなくなる SNSP の限界を明らかにした。また VSG が慣性力を有効に供給するためには系統の電圧が適正範囲内にある必要があり、電圧適正化を図りながら VSG を構成する風力発電設備の出力と協調して無効電力制御を行う必要性も示した。

文献

- 1) 電気学会:「電力需給・周波数シミュレーションの標準解析モデル」, 電気学会技術報告, Vol.1386(2016)
- 2) 電力広域的運営推進機関:「太陽光、風力発電設備の周波数変動に伴う解列の整定値などの見直し」,2019年

修士学位論文要約（令和5年3月）

磁気ノズル中を膨張する非マクスウェル電子の熱力学特性

佃 耕介

指導教員：安藤 晃， 研究指導教員：高橋 和貴

Thermodynamic property of non-maxwellian electrons expanding in a magnetic nozzle

Kosuke TSUKUDA

Supervisor: Akira ANDO, Research Advisor: Kazunori TAKAHASHI

The expansion of plasma in a magnetic nozzle includes important physics for the development of a magnetic nozzle (MN) radiofrequency plasma (rf) thruster, which is a candidate of a high-power space propulsion system. The purpose of this study is to investigate the thermodynamic expansion process of non-Maxwellian electrons in the magnetic nozzle, including the tail and beam components, and to discuss the electron energy probability function providing a good conversion efficiency from the electron energy to the thrust energy, leading improvement of the propulsive performance of MN rf thrusters. From the experiments, it is found that the tail component of the electrons undergoes adiabatic expansion, while the beam electrons show a significant cooling during the expansion. The investigation of the azimuthal and diamagnetic currents also demonstrates that the diamagnetic currents do work to the magnetic nozzle when the electrons adiabatically expand in the magnetic nozzle. It is demonstrated that the diamagnetic current is enhanced by a small amount of the tail component. Furthermore, it is found that the diamagnetic effect of the beam component is smaller than that of the tail component, not contributing to the thrust component to the magnetic nozzle.

1. はじめに

大電力宇宙推進として期待される磁気ノズル (MN) 高周波 (Radiofrequency: rf) プラズマ推進機を開発する上で、磁気ノズル中のプラズマの膨張が重要な要素となる。このような装置では、rf電力が電子と結合し、電子の熱エネルギーが種々のエネルギー変換過程を介して推力へと変換される。特に、磁気ノズル中では自発的に誘起される周方向電流と磁気ノズルの相互作用により推力が増加することが観測されており、電子エネルギーが推進エネルギーへと変換されている¹⁾。エネルギー授受を記述する基本法則として熱力学第一法則があり、磁気ノズルと相互作用する電子の熱力学的特性は推進性能を決定する重要な指標である。この熱力学特性は $pV^\gamma = const.$ の式で示されるポリトロプ関係を用いて記述することが出来る。ここで、 p 、 V 、 γ はそれぞれ圧力、体積、ポリトロプ指数であり、等温膨張では $\gamma=1$ 、断熱膨張では $\gamma=(N+2)/N$ (N は自由度) に対応する。

これまで、電子が磁気ノズルのみと相互作用する際の熱力学特性を評価するため、電子ビーム励起プラズマ源により、プラズマ中の電場を排除した実験が確立され、断熱膨張を示すことから電子が磁気ノズルへと仕事をし、その結果推力が発生していることを報告してきた²⁾³⁾。rfプラズマ源では、高出力化のために波動加熱やジュール加熱によって高エネルギー電子が励起されることがしばしば観測されており、磁気ノズル rf スラスタの推進性能には、磁気ノズルでの高エネルギー電子の相互作用が重要である。そこで、本研究では、高エネルギーテール成分とビーム成分を含む電子の熱力学的特性を調べ、電子エネルギーから推力エネルギーへの変換効率の良い電子エネルギー確率関数の形状を議論することを目的とする。

は、高出力化のために波動加熱やジュール加熱によって高エネルギー電子が励起されることがしばしば観測されており、磁気ノズル rf スラスタの推進性能には、磁気ノズルでの高エネルギー電子の相互作用が重要である。そこで、本研究では、高エネルギーテール成分とビーム成分を含む電子の熱力学的特性を調べ、電子エネルギーから推力エネルギーへの変換効率の良い電子エネルギー確率関数の形状を議論することを目的とする。

2. 実験装置

本研究で使用した装置の概略図を図1に示す。テール成分やビーム成分の電子の熱力学的特性を調べるために、プラズマから電場を除去できる装置を用いて実験を行った。アノードの有無により、プラズマ中のビーム成分を制御することができる。いずれの場合も、プラズマ電位はほぼゼロに保たれる。

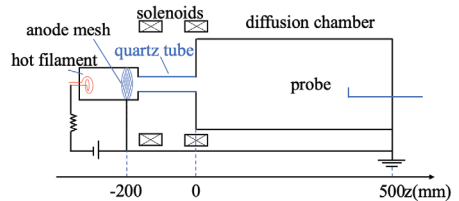


図1 実験装置の概略図

3. 磁気ノズル中の高エネルギー励起電子の熱力学特性

ビーム成分を含んだ電子の熱力学特性を図2に示す。テール成分を含んだ電子の熱力学特性は先行研究により報告されており、断熱膨張($\gamma=5/3$)であることがわかっている(図2中○)²⁾。一方でビーム成分を含んだ電子流体は $\gamma \sim 2$ となり電子の冷却が顕著であることが観測された。断熱膨張($\gamma=5/3$)の際に磁気ノズルへ最大の仕事をを行うため、 $\gamma > 5/3$ では熱力学第一法則より熱損失が生じていると考えられた。この熱損失の要因としてビームプラズマ不安定性及び電子と中性粒子の衝突の効果によるエネルギー移動に起因すると考えられた。この結果によりビーム成分の存在により電子が磁気ノズルへ仕事をする際にエネルギー損失が生じる可能性が示唆された。

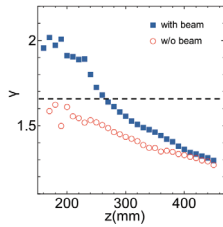


図2 テール成分を含む電子(赤○)、ビーム成分を含む電子の γ (青■)

3. 磁気ノズルに仕事を行う電子エネルギー成分

磁気ノズルに仕事を行う電子のエネルギー成分について調査するため、プラズマ中の電場を排除した状態での周方向電流及び反磁性電流について調査を行った。

テール成分を含んだ電子の周方向電流及び反磁性電流の計測結果を図3に示す。結果として、周方向電流とほぼ同等の大きさの反磁性電流を得ることができた。その結果から、電子が断熱膨張をする時、反磁性電流と磁気ノズルの相互作用により磁場に仕事を行うことが実証された。また、実験により得られた EEPF の積分範囲を変更し反磁性電流を算出することにより、少量のテール成分が反磁性電流へ大きな寄与を及ぼすことがわかった。

また、ビーム成分による反磁性効果を調査するため、ビーム成分を含んだ電子による周方向電流計測を行い、その結果を図4に示す。これらの実験では、電子圧力は同程度に保たれているにも関わらず、テール成分を含む電子と比較してビーム成分を含む電子の反磁性効果は小さくなることがわかった。その要因として、ビーム成分の異方性により、磁気ノズルへの仕事に対して寄与をもたらしないと考えられる。つまりビーム成分を含

んだ電子は磁気ノズルによる推力成分に寄与しないと考えられる。

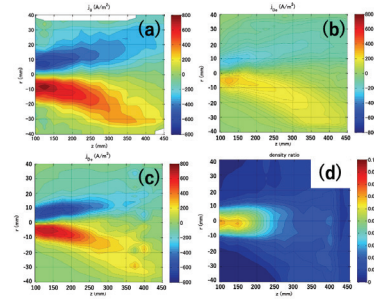


図3 (a)テール成分を含む電子の周方向電流, (b)バルク電子のみを考慮した反磁性電流, (c)テール成分を含む全電子を考慮した反磁性電流, (d)全体におけるテール成分の密度の割合

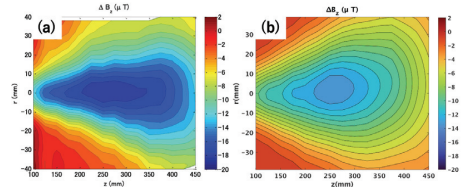


図4 (a)テール成分を含む電子の変動磁場(b)ビーム成分を含む電子の変動磁場

5. まとめ

磁気ノズル rf スラスタにおける高エネルギー電子の寄与を理解し、推進性能向上につながる物理的知見を得るために、ビーム成分、テール成分を含む電子流体の熱力学特性及び電子の各エネルギー成分による周方向電流、反磁性電流への寄与を調査した。その結果、テール成分を含む電子では断熱膨張し、その際反磁性電流により磁気ノズルに仕事を行うことを実証した。また、少量のテール成分により反磁性電流が増大されることが明らかとなった。一方でビーム成分を含む電子では電子温度の冷却が顕著となり、ビーム成分によりエネルギー損失が生じる可能性が考えられた。また、テール成分と比較してビーム成分による反磁性効果は小さくなり、ビーム成分は磁気ノズルの推力成分に寄与しないことが明らかとなった。

文献

- 1) K. Takahashi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 235001 (2011).
- 2) K. Takahashi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **120**, 045001 (2018).
- 3) K. Takahashi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **125**, 165001 (2020).

修士学位論文要約（令和5年3月）

配電用ポリマーがいしの表面撥水性と気象条件を考慮した 漏れ電流発生量の評価手法に関する研究

辻 知耀

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 Generated Considering Surface Hydrophobicity and Weather Conditions of Polymeric Insulator for Power Distribution

Kazuaki TSUJI

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¹⁾。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、Dynamic Drop Test において、電解液の滴下中断による表面撥水性の回復特性に着眼した評価を行った。また、課電曝露試験の結果を基に、がいしの漏れ電流発生量に影響を及ぼす気象条件の分析とポリマーがいしの表面撥水性の評価を関係付けた検討を行った。これらを基に、気象条件、表面撥水性を変数とするがいしの漏れ電流発生量の予測モデルを構築し、漏れ電流発生量の予測手法としての有効性の検証を行うとともに、各種気象条件が漏れ電流発生に及ぼす影響を評価した。

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、ポリマー製および磁器製の耐張型がいしとピン型がいしの計4種類のがいしを使用している(表1)。

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

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

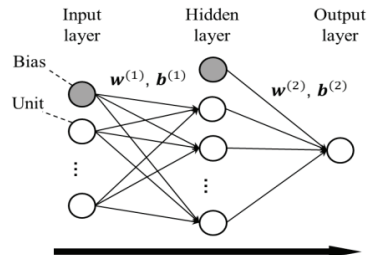


図1 順伝播型 Neural Network モデル⁴⁾

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、図1に示す順伝播型3層Neural Network⁴⁾モデルを使用した。

時刻 t の入力値(ベクトル)を x_t 、中間層出力値(ベクトル)を h_t 、出力値を y_t とすると、順伝播計算は以下のように表される。ただし、 w 、 b はパラメータ行列とベクトル、 f は活性化関数である。中間層の活性化関数には ReLU、出力層の活性化関数には恒等関数を使用した。

$$h_t = f^{(1)}(w^{(1)} \cdot x_t + b^{(1)}) \quad (1)$$

$$y_t = f^{(2)}(w^{(2)} \cdot h_t + b^{(2)}) \quad (2)$$

2017年11月1日～9日の五所川原地区における試験データを用いて学習を行った。モデル作成に使用した入出力データの一覧を表2に示す。

予測精度を評価するための指標として、以下に示す R^2 (決定係数)を用いた。ただし、 y_t は真値、 \hat{y}_t は予測値、 \bar{y}_t は真値の平均値である。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_t - \hat{y}_t)^2}{\sum (y_t - \bar{y}_t)^2} \quad (3)$$

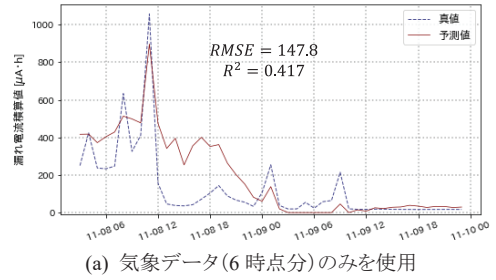
表2 モデル作成に使用した入出力データ

入力値 No.	項目	時点	単位
1	北方風速 (北向き正)	現在 (0時間前)	m/s
2		1時間前	
3		2時間前	
4		3時間前	
5		4時間前	
6		5時間前	
7~12	東方風速 (東向き正)	"	m/s
13~18	気温	"	°C
19~24	湿度	"	%
25~30	気圧	"	hPa
31~36	累積降雨量	"	mm
37~42	表面撥水性	"	
出力値	漏れ電流積算値	現在 (0時間前)	μA・h

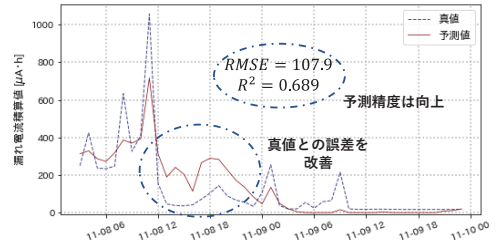
4. 五所川原地区におけるポリマーがいの漏れ電流発生量予測

五所川原地区の2017年11月1日～10日までの1時間毎の降雨量、風速、湿度の気象データ、気象データを基に予測したピン型ポリマーがいの表面撥水性値を入力データとし、2017年11月8日～9日の漏れ電流発生量の予測を行った。

図2(a), (b)より、Neural Networkモデルを用いた漏れ電流発生量の予測結果は、実際の漏れ電流発生量の増加/減少傾向と概ね一致していることが確認できた。表面撥水性の予測値の評価項目を含めた予測モデルの予測精度、予測誤差はRMSEが小さく R^2 も大きかったことから、予測精度が向上したと考えられる(図2(b))。表面撥水性の項目を含んだ予測モデルは、



(a) 気象データ(6時点分)のみを使用



(b) 気象データ(6時点分)に加えて表面撥水性を考慮

図2 漏れ電流発生量の予測結果の例

漏れ電流発生量が比較的小さい時間帯の予測精度は真値とのずれも小さくなっていたが、漏れ電流発生量が比較的大きい時間帯の予測精度は表面撥水性の項目を含んでいない予測モデル(図2(a))よりも低くなっていた。この点は今後の改善項目である。

5. まとめ

気象条件だけでなく、予測したポリマーがいの表面撥水性項目を追加し作成した予測モデルは、気象条件だけをを入力した予測モデルよりも予測精度は向上していた。このことより、気象条件という数値的な評価だけでなく、物理的要素である表面撥水性のようなポリマーがいの表面状態を定量的に組み込むことで漏れ電流発生量予測モデルの精度が向上すると考えられる。

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および磁器がいの漏れ電流特性比較」, 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5年3月）

局所異方性測定による歪センサの動作解析

豊田 恵伍

指導教員：石山 和志， 研究指導教員：後藤 太一

Analysis of Strain Sensor Operation by Local Anisotropy Measurement Keigo TOYODA

Supervisor: Kazushi ISHIYAMA, Research Advisor: Taichi GOTO

We have been studying strain sensors based on the inverse magnetostriction effect. In our previous research, we have evaluated the sensitivity characteristics of the entire sensor by measuring the change in the direction of magnetic anisotropy when strain is applied to the strain sensor as an impedance change using a network analyzer. When the directional change in magnetic anisotropy occurs simultaneously across the entire sensor when strain is applied to the strain sensor, the impedance change becomes steeper and the sensitivity improves. Therefore, in this study, the change in local magnetic anisotropy when strain is applied to the sensor was obtained from the local BH loop obtained using the Kerr effect, and the uniformity of the local magnetic anisotropy was evaluated. As a result, it was confirmed that the magnetic anisotropy varied from place to place when stress was applied. Since quantitative evaluation of local magnetic anisotropy and strain was possible through the local BH loop measurement using the Kerr effect microscope, it is expected that this measurement can be used to further increase the sensitivity of the sensor.

1. はじめに

磁性膜と導体膜の積層構造からなる逆磁歪効果を用いた歪センサを高感度化するための手法として、異方性の均一化が挙げられる¹⁾。そこで、カー効果を利用して局所BHループを取得することにより、磁性膜の局所の異方性を測定して均一性を評価した。その際、センサに歪を与えることで逆磁歪効果による局所的な異方性の変化を測定し、センサの動作状態を詳細に見積もるとともに、感度特性への影響について検討した結果を報告する。

2. 素子構造と動作原理

本研究において作製したセンサ素子の構造は図1の通りで、厚さ150 μm のカバーガラス上に1ターンミアンダ形状に成膜したMoの導体層の上下にFe₇₂Si₁₄B₁₄磁性膜を配置した3層積層構造となっている。

次にセンサの動作原理について説明する²⁾。幅方向に磁気異方性が誘導された初期状態から長手方向に引張歪を大きくしていくと、磁歪膜内部に生じる応力により磁気弾性エネルギーが変化し、磁気異方性が見かけ上キャンセルされたのち長手方向を向く。このように、歪を印加して磁気異方性が変化すると磁性膜の幅方向透磁率が変化し、高周波でのインピーダンスが変化するため、歪の変化をインピーダンスの変化として検出することが可能となる。

3. 歪-インピーダンス特性

印加歪に対するセンサのインピーダンス変化の

測定を行った。作製したセンサ基板の片側を治具で固定してカンチレバーとし、自由端側をマイクロメータで変位させることで歪を印加する。そのときのインピーダンス変化をネットワークアナライザによって測定した。

4. BH ループ測定

センサ基板の片側を治具上に固定したカンチレバーとして、自由端をマイクロメータヘッドで変位させる。この際に、カー効果を用いて磁界を困難軸の長手方向に印加した際の磁区コントラスト画像の平均輝度を局所的に測定した。横軸に印加磁界、縦軸に輝度をプロットすることで得られる局所BHループの、磁化が飽和に達する磁界強度を異方性磁界H_kとして場所ごとに求めた。

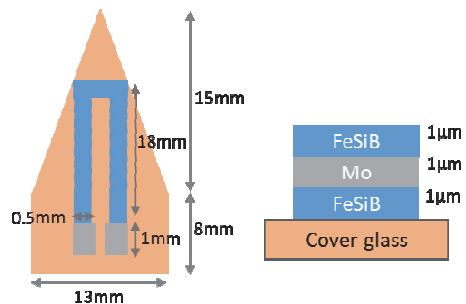


図1 センサ素子構造

5. 圧縮歪印加時の磁気特性変化

圧縮歪を印加した際のBHループの変化を図2に示す。薄膜幅方向に容易軸をもつセンサの片側を固定し、自由端側をマイクロメータで押し上げて圧縮歪を加えている。自由端変位が50 μm 、100 μm 、150 μm の際に、困難軸である薄膜長手方向に磁界を加えた際のBHループを測定した。印加する圧縮歪の増加とともにHkが増加することが確認できた。これは、元々薄膜幅方向に容易軸をもつセンサにさらに圧縮歪を印加することで、磁気弾性エネルギーの分だけHkが増えているためである。これにより、磁気弾性効果によって磁気異方性が誘導されていることが分かる。縦軸にHk、横軸にその測定場所をとったグラフを図3に示す。0 μm 、50 μm 、100 μm 、150 μm で圧縮歪を強くしていくごとにHkが増加しており、圧縮歪を印加することにより磁気異方性が誘導されていることは確認できた。しかし、全体的にHkのばらつきは大きくなった。全体的なHkのばらつきは、薄膜表面のわずかな傷や付着物がある部分に応力が加わってしまったためと考えられる。

4. Hk分布の感度への影響

圧縮歪印加時のHkの分布から理論的に比透磁率をランダウ-リフシツの磁化の運動方程式を用いて計算した³⁾。歪に対する比透磁率の変化をセンサの場所ごとに計算し、その平均をグラフ化したものを図4に示す。Hkのばらつきがないと仮定して比透磁率を計算すると図5のようになり、図4と図5を比較してHkの均一化によってセンサ感度の向上が期待できることが分かった。

5. まとめ

本研究では、局所異方性のばらつきの定量的評価と歪印加中のセンサの動作状態を明らかにすることを目的とし、カー効果を利用して局所BHループ測定による異方性の均一性の評価手法を確立した。また、センサに歪を加えながら場所ごとに細かく局所BHループを測定し、異方性の均一性を定量的に評価するとともに、異方性分布がセンサ感度に与える影響を理論的に示した。その結果として、歪センサの更なる感度向上の可能性が期待できることを示した。

文献

- 1) D. Sora: *T. Magn. Soc. Jpn.*, **4**, 41 (2020).
- 2) Y. Kubo, S. Hashi, H. Yokoi, K. Arai, K. Ishiyama: *IEEJ Trans. SM*, Vol. 138, No. 4(2018).
- 3) 竹澤昌晃, 「マイクロ磁気センサに関する研究」, 東北大学博士学位論文, (1999).

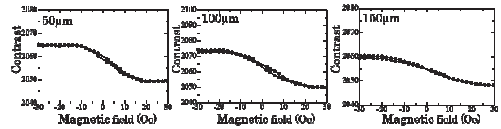


図2 歪印加時のBHループの変化

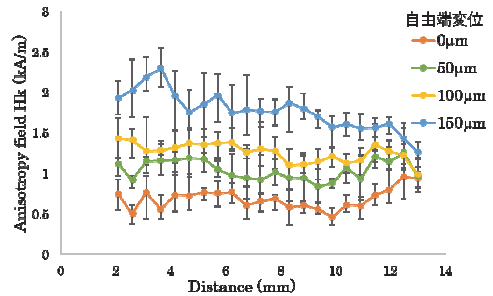


図3 場所ごとのHkのばらつき

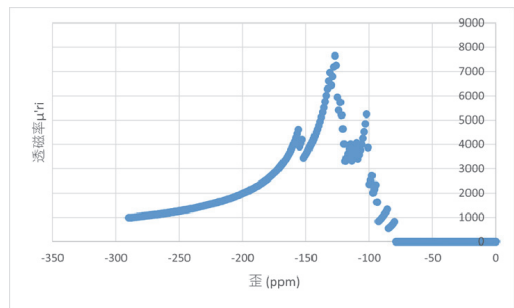


図4 Hk分布から求めた比透磁率変化

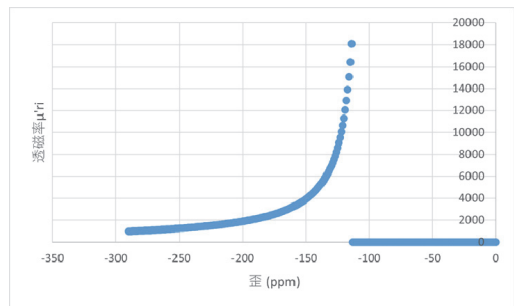


図5 Hkが均一である場合の比透磁率変化

修士学位論文要約（令和5年3月）

大口径大電力ヘリコンスラストに向けた高周波プラズマ源開発

ナーグル タナーテット

指導教員：安藤 晃， 研究指導教員：高橋 和貴

Development of Radiofrequency Plasma Source toward a Large-Diameter and High-Power Helicon Plasma Thruster

Thanatith NAKUL

Supervisor: Akira ANDO, Research Advisor: Kazunori TAKAHASHI

A large-diameter radio frequency (rf) plasma source is developed and two operational rf driving frequencies of 2 MHz and 13.56 MHz are employed under an expanding magnetic field. Plasma properties and rf power transfer efficiency are investigated, and a target thrust measurement is conducted. Efficient plasma production inside the source is obtained with the 2 MHz case. The radial density and ion saturation profiles having a center peak are observed both in the source and in the expanding magnetic field region for the 2 MHz case; it does not show the conical density structure, while the conical structure is observed for the 13.56 MHz case. This implies that central electron heating is dominant for the 2 MHz case while electrons are peripherally heated in the 13.56 MHz case. These features imply that a large T_s could be obtained in a 2 MHz source and a large T_B could be achieved in a 13.56 MHz source as demonstrated by the thrust measurement. Therefore, it can be proposed that a 2 MHz source is suitable for an ICP plasma thruster where T_s is the main contribution while a 13.56 MHz would suit a magnetic nozzle.

1. Introduction

Since the erosion of electrodes and the performance degradation of the neutralizer over time in conventional electric propulsion (EP) devices limit the lifetime of the system, the development of a helicon plasma thruster, which is the electrodeless system and could be operated at a high electric power level, is now under investigation¹⁾. The previous models and experiments have demonstrated that the thruster performance of the helicon plasma thruster can be improved by enlarging the source diameter. However, enlarging the source diameter makes it difficult for the rf electromagnetic field to penetrate through the center of the source, resulting in the hollow peak profiles in the cross-section plane when operated with the commonly used 13.56 MHz rf driving frequency²⁾³⁾. Accordingly, in this study, a 14-cm-diameter rf plasma source operated at 2 MHz toward the development of the large diameter magnetic nozzle (MN) rf plasma thruster is chosen for central electron heating, and experiments directly compared with a 13.56 MHz source is conducted to investigate the effect of skin depth on the thrust.

2. Experimental device

Figure 1(a) shows the schematic diagram of the experimental setup. The plasma source consists of a

14-cm-outer-diameter Pyrex glass tube wound by a water-cooled seven-turn and double-turn rf loop antenna, for the 2 MHz and 13.56 MHz cases, respectively. A solenoid provides the expanding magnetic fields, where the calculated magnetic field strength on the z -axis is plotted in Figure 1(b) when a dc current of $I_B = 5$ A is supplied.

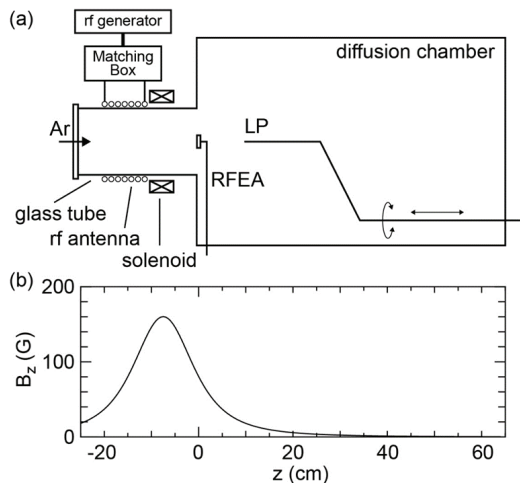


Fig. 1 (a) Schematic diagram of the experimental setup. (b) The calculated magnetic field strength on the z axis for the solenoid current of $I_B = 5$ A⁴⁾.

3. Comparison between a 2 MHz and 13.56 MHz source

Figures 2(a) and 2(b) show the radial profiles of ion saturation current (I_{is}) at $z = -10$ and 10 cm, respectively. Since plasma density is proportional to I_{is} , Figure 2(a) implies that the electron heating and/or the efficient plasma production inside the source can be obtained in the 2 MHz source. Figure 2(c) demonstrates that there is a relatively high-temperature region around $|r| \sim 3$ cm for the 13.56 MHz case. The presence of the high-temperature region at the 13.56 MHz case implies that electrons are heated in the skin layer for high-frequency cases, while the major heating region for the 2 MHz case would be the central region of the source. However, as shown in Figure 2(b), I_{is} for 13.56 MHz is higher in the diffusion region where the relationship is the inverse of that inside the source. Furthermore, the peaks of the peripheral high ionization region at $|r| \sim 10$ cm are observed indicating that peripheral high-energy electrons are transported and stimulate the ionization along the magnetic field lines.

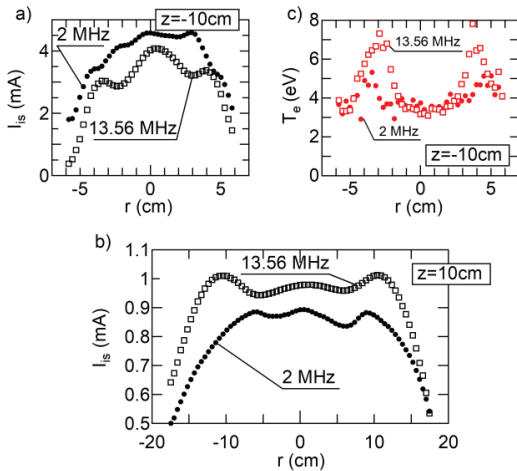


Fig. 2 (a) and (b) show radial I_{is} profiles of a 2 MHz case (dot) and a 13.56 MHz (rectangle) for $z = -10$ and 10 cm respectively, and Fig. 2(c) displays electron temperature for $P_{Ar} = 100$ mPa, $P_{rf} = 2$ kW and $I_B = 5$ A.

4. Thrust measurement

In this study, the thrust is measured by the pendulum target method⁵⁾ and it is confirmed that the presence of the target does not change the plasma production. The thrust as a function of I_B , for both 2 MHz and 13.56 MHz cases, is plotted in Figure 3.

Figure 3 shows that when I_B increases thrust for the 13.56 MHz case also increases while for the 2 MHz case remains roughly flat implying that the Lorentz force due to the radial magnetic field and the azimuthal electron current (T_B) is dominant component for the 13.56 MHz case while for the 2 MHz case is the force from the electron pressure (T_s).

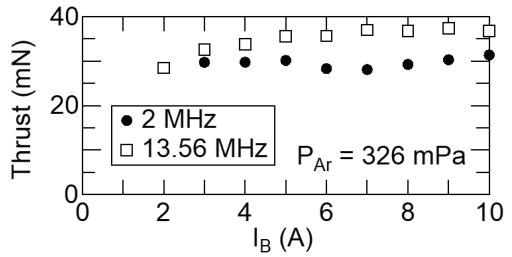


Fig. 3 Thrust, for the 2 MHz case (dot) and 13.56 MHz case (rectangle), as a function of I_B for $P_{Ar} = 326$ mPa and $P_{rf} = 2$ kW.

5. Conclusion

To work with the development of high-power electric propulsion devices a large diameter rf frequency source is developed and two operational rf driving frequencies are adjusted in the Lab. The efficient plasma production inside a 14-cm-diameter is obtained in the 2 MHz rf driving frequency case. Based on radial profiles, central and peripheral electron heating is dominant for the 2 MHz and 13.56 MHz case respectively. These features imply that a large T_s could be obtained in a 2 MHz source and a large T_B could be achieved in a 13.56 MHz source. Therefore, it could be proposed that a 2 MHz source is suitable for an ICP plasma thruster where T_s is the main contribution while a 13.56 MHz would suit a magnetic nozzle.

References

- 1) K. Takahashi, Rev. Mod. Plasma Phys., **3** (2019) 3.
- 2) C. Charles, Appl. Phys. Lett., **96** (2010) 051502.
- 3) K. Takahashi, Sci. Rep., **11** (2021) 2768.
- 4) T. Nakul and K. Takahashi, AIP Adv., **12** (2022) 095118.
- 5) K. Takahashi, A. Komuro, and A. Ando, Rev. Sci. Instrum., **86** (2015) 023505.

修士学位論文要約（令和 5 年 3 月）

風力発電機を対象にした N-1 電源制限時の
電力系統における過渡安定度向上手法

錦織 佑太

指導教員：斎藤 浩海

A Method for Improving Transient Stability of Power System
under N-1 Generation Control

Yuta Nishikiori

Supervisor: Hiroumi Saitoh

In recent years, the introduction of renewable energy sources has been expanding in Japan due to the demand for a low-carbon society. Currently, one of the challenges for the mass introduction of wind power generators into the existing power system is the lack of available capacity in the grid. One way to increase the available capacity is to increase the size of the grid through transmission line transfers or line upgrades, but this is time-consuming and costly. Therefore, it is important to make effective use of the existing power system.

The Organization for Cross-regional Coordination of Transmission Operators, JAPAN (OCCTO) is studying and implementing operational rules to solve the shortage of available capacity in the power grid. One such rule is N-1 generation control⁽¹⁾. The N-1 generation control is to reduce quickly the outputs of renewable energy sources such as wind farms in order to avoid line overloading when a fault occurs on a grid. The control will affect transient stability of power systems in Japan because the power systems have radial configuration of networks for transmitting large amounts of power over long distances. Therefore, the authors focus on the effects of the N-1 generation control on the transient stability of the power system.

1. はじめに

現在日本では系統の空き容量不足を解決するための運用ルールが検討・実施されている。その一つに N-1 電源制限(以下「N-1 電制」と記す)がある。本研究では、この N-1 電制に過渡安定度の観点から注目している。具体的には電力系統で N-1 電制が行われた場合、風力発電機群の解列のし方や系統状態の変化が過渡安定度に与える影響を分析し N-1 電制時の過渡安定度の維持・向上を図る方法を明らかにすることを目的としている。本稿では、N-1 電制の下、風力発電機群の解列が過渡安定度に与える影響を分析し、過渡安定度の向上手法について基本的な検討を行った結果を報告する。

2. 電力系統モデル

図 1 に示す東北系統の簡易モデルにてシミュレーションを行った。発電機 G0 は東京系統、発電機 G1 は新潟県に位置する火力発電機群、G2 は福島県と宮城県の太平洋沿岸に位置する電源群、G3 は東北北部に位置する火力発電機群をそれぞれ 1 つの発電機として模擬している。また風力発電機群は青森県と秋田県に多数連系されている現状を踏まえて、母線 12 に配置している。

この系統において、同期発電機は LGT=5 の Park モデルとし、同期発電機の出力は G1 が 2500[MW]、G2

が 1500[MW]、G3 が 1500[MW]としている。また、風力発電機のモデルは PMSG 型の可変速機単機を対象としており、風力発電機の出力は $1000 + \Delta P_{wf}$ [MW]としている。(ここで ΔP_{wf} は追加連系量を表す)

事故モデルは母線 B8、B9 間の B8 至近端で起きたものとし、事故除去後に 1 回線運用を行ったものとした。なお、再開路は行わないものとした。

B8、B9 間の送電線は送電可能容量が熱容量制約により 1500[MW]であると仮定し、図 1 の系統では空き容量がなく、追加連系量分の容量不足が発生しているものとしている。そのため、母線 B12 の追加連系量分の風力発電機が N-1 電制の対象電源として、連系されているものとしている。また、事故除去時刻から電制を開始する時刻までの時間を電制遅延時間と定義する。

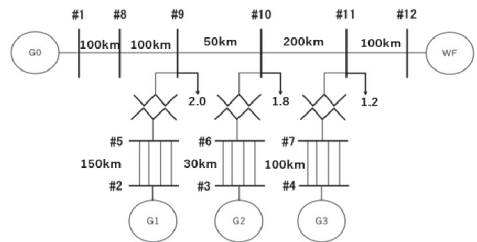


図 1 くし型 4 機系統モデル

3. N-1 電源制限が過渡安定性に与える影響

本節では、N-1 電制のもと追加連系量が変化したときに過渡安定性へ与える影響について検討した結果を述べる。図 2 に追加連系量を変化させたときの CCT の変化を示す。図中には追加連系量分の電制を行わなかったケースと N-1 電制を行ったケースを示している。なお本シミュレーションでは電制遅延時間を 0.3[s]と仮定した。

図 2 から N-1 電制を行うことで CCT を長くすることができ、過渡安定度が向上することがわかる。ただし追加連系量が大きくなると CCT が短くなるが、N-1 電制なしと比較すると追加連系量が大きいほど CCT の差が広がっていくことがわかる。ただし実システムの保護システムの動作時間は最速で 0.06[s]であることを考慮すると、CCT が 0.06[s]未満となる追加連系量は実現できないといえる。要するに、N-1 電制なしのケースでは 500[MW]、N-1 電制ありのケースでは 800[MW]の風力発電機の追加連系が可能であり、N-1 電制を行うことで 300[MW]の連系量を増加させることが可能になることがわかる。なお、800[MW]より大きい風力発電を追加連系させるためには、後述するような過渡安定度向上手法を考える必要がある。

4. 風力発電機の無効電力制御による過渡安定度向上手法

本節では PMSG 型風力機の無効電力出力を増加させ、システム全体の電圧を高くすることで過渡安定度の向上を図る方法を述べる。その方法は事故除去時刻に風力機への無効電力指令値を 100[Mvar]大きくした。図 3 に風力機の無効電力出力を図 4 に同期発電機の位相角を図 5 に追加連系量と CCT の関係を示す。なお電制遅延時間を 0.3[s]に設定し、図 3、図 4 の波形は追加連系量を 1000[MW]としたときの結果である。

図 3 から事故除去時刻に無効電力指令値を大きくしているために無効電力出力が大きくなっていき最終的に 100[Mvar]に収束する様子が確認できる。

図 4 から、提案手法により同期発電機の動揺が抑えられ過渡安定性が向上していることがわかる。特に、G3 の動揺が抑えられている。本システムモデルでは G3 が脱調しやすいので、この動揺波形はシステムの安定性が向上したことを示していると考えられる。

図 5 から提案手法のほうがすべての追加連系量で N-1 電制なしのケースや N-1 電制のみのケースよりも CCT が長くなっている。特に追加連系量が大きくなるほど CCT がより長くなっている。また前節で述べた通り、N-1 電制なしのケースでは 500[MW]、N-1 電制のみでは 800[MW]の追加連系が可能であったが、提案手法では 1600[MW]の風力発電機を追加連系できることがわかる。このことから提案手法は N-1 電制のみのときよりも 800[MW]、N-1 電制なしのケースより

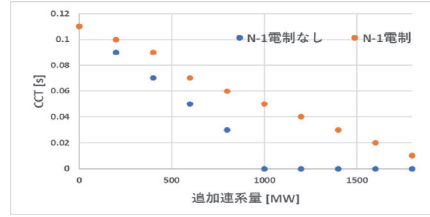


図 2 追加連系量と CCT の関係

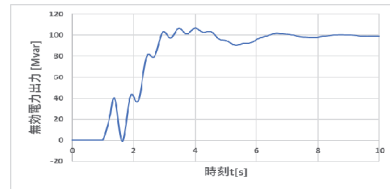


図 3 無効電力指令値の時間波形

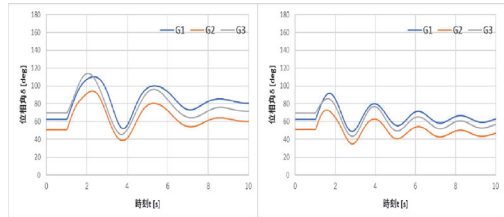


図 4 同期発電機の動揺波形(左:従来、右:提案)

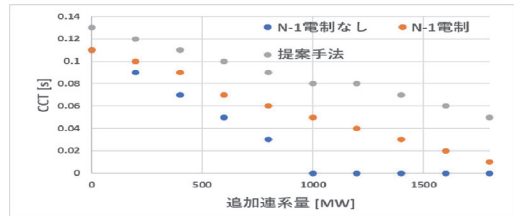


図 5 追加連系量と CCT の関係

も 1100[MW]、追加連系量を増加させることが可能である。

5. 結論

本論文では、N-1 電制により電力システムの過渡安定性に与える影響と風力発電機の無効電力制御による過渡安定度向上手法に関して時間領域シミュレーションによって検討し、過渡安定度を向上させる N-1 電制手法の確立を試みた。

N-1 電制のもと風力発電機が大量連系されるほど過渡安定度が低下することがわかった。また、風力発電機の無効電力制御により N-1 電制だけ行う場合より CCT が 4 倍長くなることがわかった。

文献

- 1) 電力広域的運営推進機関「流通設備の整備計画の策定(送配電等業務指針第55条)における N-1 電制の先行適用の考え方について」,2020 年 10 月 1 日変更版

修士学位論文要約（令和5年3月）

頭部傾斜型前庭感覚提示システム利用時における感覚特性に関する研究

福島 知明

指導教員：杉田 典大

A study on the sensory characteristics related to the use of head-tilted vestibular sensation prompting system

Tomoaki FUKUSHIMA

Supervisor: Norihiro SUGITA

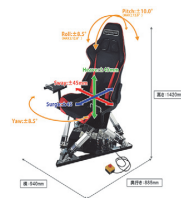
Virtual reality (VR) systems can sometimes cause VR sickness, similar to motion sickness, due to the mismatch between visual, vestibular, and proprioceptive inputs. To counteract this, motion-based (MB) systems, which simulate the movement of the real world by tilting the user's chair, are used. However, these can be expensive and not practical for home use. As an alternative, the authors have created a head-mounted display that induces vestibular sensation by tilting the user's head, allowing for the simulation of the inertial force experienced in VR images. Experiments using VR images with centripetal force showed that the system effectively reduces VR sickness and the patterns of onset time and beneficial effects are equivalent to MB systems. Future research will explore the factors affecting the system's effectiveness and the relationship between user characteristics and system effectiveness.

1. はじめに

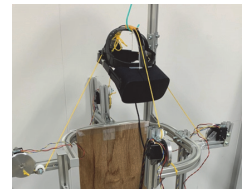
近年、バーチャルリアリティ (VR) 技術は急速に発展している。しかし、VR 利用時には「VR 酔い」と呼ばれる乗り物酔いに近い症状が発生することがある^[1]。これは VR 映像内で知覚されている慣性や回転などの物理現象が前庭感覚では知覚されない、いわゆる感覚不一致に起因するとされている。本研究では、この感覚不一致を減らして VR 酔いを抑制するために開発した装置について、その効果を検証した。

2. VR 酔い軽減のための前庭感覚再現

一般的に、VR 酔いの原因となる感覚不一致を抑制する手段としては、身体全体を揺らして前庭感覚を与える図 1(a)に示すようなモーションベース (MB) の利用がある。これに対して我々の研究グループでは、図 1(b)に示すような装置を用いて、前庭感覚の知覚器官を含む頭部のみを揺動させることで VR 空間における加速度等の物理現象を再現する方法を提案した^[2]。先行研究では、提案手法の使用によって、臨場感が向上すると共に VR 酔いが軽減される可能性が示されたが、検証した動きは前後方向における加減速のみであった。そこで本研究では、カーブなどを走行する際に生じる遠心力についても再現をする実験を行い、前後方向と同様に VR 酔いの軽減が可能かどうかを検証した。また、先行研究では、MB との比較を行ってこなかったため、本研究では、提案手法と MB それぞれを用いた際の酔い軽減効果についても比較を行った。



(a) モーションベース



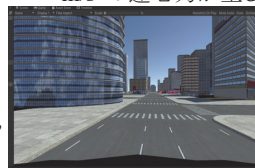
(b) 提案システム

図 1 前庭感覚を再現する装置

3. 実験

3.1. 実験 1: 遠心力模擬による VR 酔い抑制効果

提案手法を用いた遠心力模擬による VR 酔い抑制効果を検証するために、図 2 に示すような右折左折を繰り返すコースを走行する VR 映像を作成し、「映像視聴のみ」と「映像視聴 + 提案手法」の 2 つの条件で、15 分間ずつ体験する実験を実施した。空間内を進む速度は 23 km/h であり、右左折時には 2.04 m/s² の遠心力が生じる。



(a) 走行中の映像



(b) コース全体像

図 2 実験で用いた VR 映像

被験者は 18 名 (男性 16 名、女性 2 名、平均年齢 22.2 歳) である。走行中は、口頭で 1 分毎に酔いの

程度を4段階で回答してもらった。さらに、生じるVR酔いの特性を詳しく調べるため、走行の前後で被験者に simulator sickness questionnaire (SSQ)^[3]を課した。

実験の結果、SSQの全スコア(悪心、眼精疲労、失見当識、総合)において、提案装置を利用した時の方が映像のみの時よりも値が低くなった。これは、提案手法利用時に、頭痛、吐き気、めまい、ふらつきなどが改善したためである。一方、提案手法を利用した場合でも、疲労感や目の疲れは改善出来ないほか、冷や汗が発生しやすくなることが分かった。続いて、酔いの症状が現れるまでの時間については、映像のみでは平均9.0分であったのに対して提案手法では平均12.2分であり、この差は有意であった。このことから、提案手法にはVR酔いの発生を遅らせる効果があると考えられた。

3.2. 実験2:提案手法とMBの比較

続いて、提案手法とMBのVR酔い抑制効果の比較を行った。合計16人の被験者(男性14人、女性2人、平均年齢22.1歳)に対して、初めに前述の映像を視聴させ、その後「映像視聴+提案手法」と「映像視聴+MB」の条件をそれぞれ提示した。評価指標には実験1と同様にSSQと1分毎の酔い評価を用いた。

実験の結果、SSQの全スコアにおいて、提案手法はMBよりもスコアが高くなったものの、スコア間に大きな差は見られなかった。これは提案手法を用いる事でMBよりも気分の悪さや吐き気の発生を抑制できるものの、冷や汗や疲労感を与える効果がMBよりも大きくなったからだと考えられる。一方、酔いの症状が発生するまでの時間は提案手法では平均11.9分、MBでは平均10.9分であり、提案手法の方が酔いの発生を遅らせていたが、有意な差ではなかった。実験後に被験者に行ったインタビューからは、提案手法と異なりMBでは身体全体の揺動によって車酔い似た不快が生じる可能性があることが分かった。

3.3. 実験3:コンテンツを変えた場合の影響

これまでの実験では、街中を走行する映像を用いて提案手法によるVR酔い抑制効果を検証してきた。しかし、街中の道路や建物のようなコンテンツが存在することで、視聴者が回転や加速の感覚を得やすくなり、このことが酔いの誘発に関連している可能性が考えられる。また、前の実験では移動の速さが1通りであり、これが提案手法の効果をちょうど高める速さだった可能性も考えられた。

そこで、まずは、実験1で用いた自動車の走行経路を変えず、走行する空間を図3に示すような黒色空間に白色球形のランダムドットを配置した世界に変更し、移動をオプティカルフローで表現することでコンテンツの効果を減らした。本実験では、実験1にも

参加した被験者4人(男性3人、女性1人、平均年齢23.3歳)に対して、実験1と同じプロトコルで検証を行った。実験の結果、オプティカルフローで視覚情報を提示した場合には、道路などのコンテンツが存在する場合と比べてSSQの全スコアが悪化した。この結果から、視界に前庭感覚の手がかりとなる情報が多く存在するかどうかはVR酔い抑制効果に影響を与える可能性が示唆された。

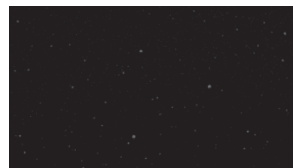


図3 実験で用いたオプティカルフロー映像

続いて、自動車の走行速度を変更した場合の影響を検証するために、走行速度を1.3倍の30 km/hにし、実験1にも参加した4人の被験者(男性4人、平均年齢23歳)に対して、実験1と同じプロトコルで実験を行った。実験の結果、いずれの速度においても提案手法の利用によってSSQのスコアは抑制されるものの、速度の増加に伴ってスコアが悪化する結果となった。このことから、速度の違いによって提案手法の効果に差が生じる可能性が示唆された。

実験3では被験者が4人と少数であり、未だ信頼性が高い結果とはいえないが、今後も被験者を追加し、コンテンツの違いが提案手法の酔い抑制効果に与える影響を調べていく必要がある。

4. まとめ

本研究では、頭部のみを傾斜させる簡易的な前庭感覚提示装置を用いて遠心力の再現を行った際のVR酔い軽減効果について検証を行うと共に、提案手法とMBのVR酔い抑制効果の比較を行った。今後は、異なる軸での回転や傾斜などを体験した場合の効果や、実験3で確認されたコンテンツの違いが与える効果について追加検証を行う。

文献

- [1] 館暉ほか：バーチャルリアリティ学，日本バーチャルリアリティ学会，pp46-51，2011.
- [2] 山口倫尚ほか：前庭感覚提示可能なヘッドマウンテッドディスプレイの開発に関する研究，第53回日本生体医工学学会東北支部大会講演論文集，2019.
- [3] R. S. Kennedy *et al.*: Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness, *Int. J. Aviat. Psychol.*, vol. 3, no. 3, pp. 203-220, 1993.

修士学位論文要約（令和5年3月）

永久磁石リラクタンスジェネレータの制御法に関する研究

包 思遠

指導教員：中村 健二

A Study of Permanent Magnet Reluctance Generator Control Strategy

Siyuan BAO

Supervisor: Kenji NAKAMURA

In today's society, more and more attention is paid to distributed power supply. Especially in wind and hydro power generation, there is an increasing demand for distributed power sources. There are three main requirements for distributed power supply: high efficiency, low price and easy maintenance. A novel generator PMRG (Permanent Magnet Reluctance Generator) which is very suitable for distributed power supply is presented in the preliminary study. The structure of PMRG is very similar to that of SRG. Both stator and rotor are made of iron core, and permanent magnet is loaded into the stator of SRG for excitation. The stator pole is wrapped with a coil. When the external force pulls the rotor to rotate, the magnetic flux in the stator coil constantly changes and induces the electromotive force. At this time, if the stator coil is connected to the loop, the electric energy can be emitted. PMRG has the advantages of simple structure, solid structure, no need for excitation power supply, and can be used normally in high temperature environment. The pilot researchers built a test machine that uses a diode rectifying loop as an output loop and has an efficiency of up to 92 percent. But on the other hand, diode rectifier circuit is not controllable, the output power and power factor of PMRG can not be control. In this study, vector control is used to control PMRG. The finite element analysis and Simulink simulation model were used to simulate the PMRG. In addition, an experimental system is built to compare the output power of PMRG in diode rectifier loop and that of PMRG in PWM converter. And it proved our hypothesis. In order to solve the problem that PMRG is not sinusoidal, a solution of FFT filter is given. The filtering problem of PMRG has not been completely solved, and the algorithm and code of FFT filter will be further optimized.

1.はじめに

近年、地球温暖化ならびに省エネルギー対策のため、風力発電、小水力発電などの分散型電源への期待が高まっており、これらの分散型電源に使用される中容量から小容量の発電機の需要が拡大傾向にある。先行研究においてはスイッチトリラクタンスマータの固定子ヨークに永久磁石を配置し、磁気回路の磁気抵抗変化によって、巻線鎖交磁束を周期的に変化させることで発電し、永久磁石リラクタンسジェネレータ (PMRG) を提案した¹⁾。さらに、回転子極先端の一部をカットした同一形状の2台のPMRGを、電気角で180度位相をずらして積み重ねる、いわゆる段積み構成とすることで、トルクリプルを大幅に低減できることを明らかにした²⁾。

一方で、出力回路は単純なダイオード整流器のみしか検討しておらず、今後は適切な変換器とその制御法に関する検討が必要不可欠である。そこで本研究では、PWMコンバータを出力回路に用いた場合の発電特性について検討を行ったので報告する。

2.有限要素法での解析モデル

発電機の解析手法としては、有限要素法 (Finite Element Method, FEM) を用いた電磁界解析が一般的である。この手法は、発電機の細部の構造を考慮したモデル構築が可能のため、解析精度の高さが特長として挙げられる。このため、発電機の詳細な設計

においては、非常に有用な手法である。それにモデル内にFEMコイルやFEMコンダクタが存在する場合、これらに外部回路を接続して、有限要素法による磁界解析と回路解析を連成することが可能です。図1に、本研究での検討に用いたアウトローター型PMRGの諸元を示す。固定子12極、回転子16極の3相機である。永久磁石はフェライト磁石 (FB9B) である。図2は有限要素法 (FEM) の解析で用いた、PMRGの3次元モデルである (要素数147875)。FEMによる解析では、PMRGをダイオード整流器とPWMコンバータに制御され、1000rpmで回転させた時の出力電圧や電流、トルクなどを算定し、発電特性を求めた。図3(a)は、従来のダイオード整流回路を用いた場合の発電特性を示す。同図(b)はPWMコンバータを用いて、電流ベクトル制御をした場合の発電特性である。これらの図を見ると、PWMコンバータで制御されたPMRGの方が出力および効率とも高いことがわかる。

3.PMRGのベクトル制御

本研究のPWMコンバータの制御方式はベクトル制御と考えられる。図4に示す角度 φ はPMRGの電流位相角である。ベクトル制御で、電流ベクトルのノルムと電流位相角を調整し、PMRGの出力を制御する。

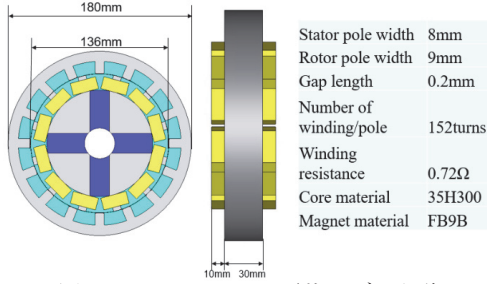


図 1. 12/16 PMRG の形状モデルと諸元

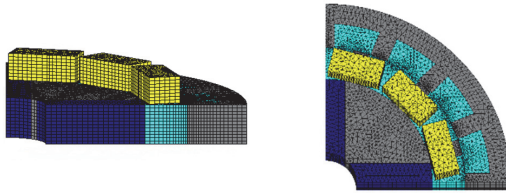
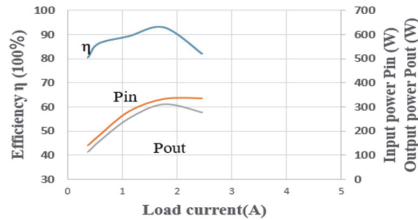
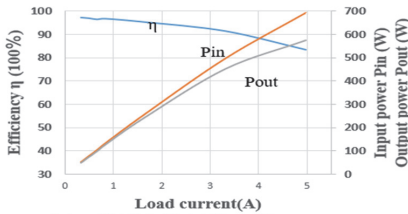


図 2. 12/16 PMRG の FEM モデル



(a) ダイオード整流器



(b) PWM コンバータ

図 3. PMRG 発電特性の比較

4. PMRG 発電システムの実験検討

図 5 に実験でダイオード整流器で制御された PMRG の発電特性を示す。回転速度 1000rpm となった時に、最大出力は 82W である。実験で PWM コンバータで制御された PMRG は回転速度 1000rpm となった時の最大出力は 106W である。しかし、図 6 に示すように、PMRG の出力波形が高調波を含んでいるので、電流位相角を変更しても、出力を変えることができない。この問題を解決するために、PMRG のベクトル制御プログラムで FFT フィルタを作り、出力結果は図 7 のようになった。出力はまだ正弦波ではないので、引き続き FFT フィルタを改善したいと思う。

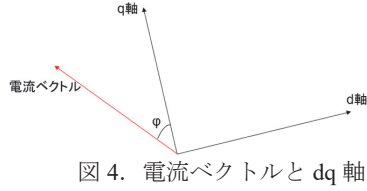


図 4. 電流ベクトルと dq 軸

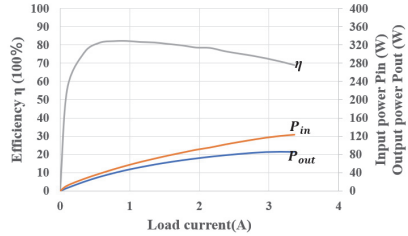


図 5. ダイオード整流器で発電特性

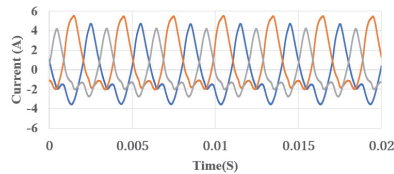


図 6. PMRG の三相電流

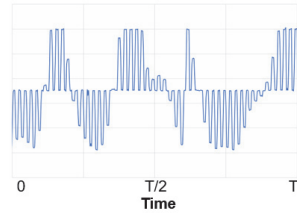


図 7. FFT フィルタの変換結果

まとめ

本研究では、PMRG の高出力化と高効率化を目的とし、制御手法を検討した。まず、有限要素法解析により PWM コンバータでベクトル制御を実現した PMRG の方が効率と出力がともに高いことが明らかになった。それから、実証実験を行い、ベクトル制御での PMRG の高効率化を実現した。今後の予定については、PMRG の出力を自由に制御するため、FFT フィルタへの研究を目指す予定である。

参考文献

- 1) 一ノ倉理, 志田淳, 中村健二, 渡辺忠昭:「固定子に永久磁石を配置したリラクタンسジェネレータの基礎特性」, 日本応用磁気学会誌, Vol. 29, No.5, pp.571-576 (2005)
- 2) K. Nakamura, J. Yoshida, and O. Ichinokura, "Stat or-Permanent-Magnet Reluctance Generator using Ferrite Magnet for Small-Scale Renewable Energy Generation", *EPE Journal*, Vol.20, No4, pp.31-36 (2010).

修士学位論文要約（令和 5 年 3 月）

高純度 Fe 薄帯における構造と磁気特性の熱処理効果に関する研究

馬 小童

指導教員：遠藤 恭

Study on the Effect of Annealing Temperature on
Structure and Magnetic Properties of High-purity Fe Ribbons

Xiaotong MA

Supervisor: Yasushi ENDO

This master thesis reports study on the effect of annealing temperature on structure and magnetic properties of high-purity Fe ribbons with various thicknesses toward the creation of next generated soft magnetic materials in power electronic devices. At lower annealing temperatures (T_a) between 873–1173 K, the crystal orientation of high-purity Fe ribbons maintained as the rolling texture to some extent. soft magnetic properties were improved as T_a was increased, which might be attributed to the residual stress relaxation. On the other hand, at higher T_a between 1273–1573 K, the crystal orientation changed to random as the T_a increased, which might be due to the secondary recrystallization. Besides, the soft magnetic properties of these annealed Fe ribbons improved independent of T_a , which indicate that the changes in both crystal orientation and grain size affect their soft magnetic properties. Therefore, these results demonstrate that the high-purity Fe ribbons after annealing are one of the candidates for soft magnetic materials in next-generated power electronic devices.

1. はじめに

カーボンニュートラル社会の実現に向け、次世代パワーエレクトロニクスの研究開発が盛んに行われている。その回路動作の一部を担うトランスやインダクタなどの受動素子は小型化・高周波化・低損失化を求められている¹⁾。したがって、これらの受動素子を構成する軟磁性材料としては高飽和磁束密度、高透磁率および低損失を有することが必須であり、新たな材料探索が行われている。

これまで、軟磁性アモルファス合金・ナノ結晶薄帯は高飽和磁束密度、高透磁率、低損失といった特徴を有することから、新たな材料として注目を集めている。しかしながら、100 kHz を超える高い周波数帯において高周波損失が増大することから、次世代パワエレ用受動素子への展開が困難である²⁾。本研究では、高飽和磁束密度と優れた圧延性を有する高純度 Fe 薄帯に着目し、厚さの異なる高純度 Fe 薄帯に熱処理を施すことによる構造および磁気特性の変化を検討し、熱処理温度の影響について議論する。

2. 配向制御した高純度 Fe 薄帯における構造および磁気特性の熱処理温度依存性

本節では、873–1173 K で熱処理を施し、配向制御した高純度 Fe 薄帯における構造と磁気特性について検討した。熱処理後の Fe 薄帯の構造は薄帯厚さによって異なった。すなわち、20 μm 厚以下では、熱処理有無によらず面内の優先配向は(100)および(111)となり、結晶粒径は数百 μm 程度であった(図 1)。一方、30 μm 厚以上では、面内優先配向は熱処理温度の増加にともない(100)および(111)から(111)へと変化し、さらにランダムとなった。また、結晶粒径は熱処理温度の増加にともない増大した³⁾。

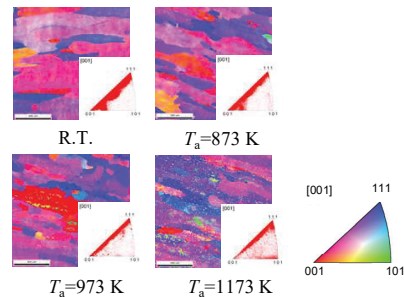


図 1 高純度 Fe 薄帯における面内方位マップおよび逆極点図の熱処理温度依存性の一例 (10 μm 厚)

磁気特性に関しては、図2に示すように、 μ' は低周波領域では一定に保ち、周波数の増加にともない減少した。一方で、 μ'' は周波数の増加にともない増加し、その後減少した。また、 μ' 値は熱処理温度の増加とともに増加し、 μ'' のピーク位置は低周波数帯へ移動した。この結果は、熱処理を施すことによって内部応力の緩和と結晶粒の粗大化によるものと考えられる。

以上より、873~1173 Kの熱処理を施したFe薄帯では、20 μm 以下の薄帯厚さの場合、結晶配向は保たれ、30 μm 以上の薄帯厚さでは、配向性は熱処理温度の増加にともない変化しなかった。また、いずれの厚さのFe薄帯においても軟磁気特性は熱処理温度の増加にともない向上し、厚さの減少により優れた周波数特性を得た。

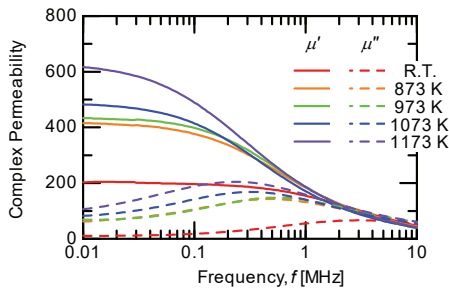


図2 熱処理温度の異なる高純度Fe薄帯における複素透磁率 (μ' および μ'')の周波数特性 (10 μm 厚)

3. 再結晶化した高純度Fe薄帯における構造および磁気特性の熱処理温度依存性

本節では、1273~1573 Kの温度で熱処理を施し、再結晶化した高純度Fe薄帯における構造と磁気特性について検討した。構造に関しては、いずれの厚さにおいても優先配向は熱処理温度に依存せずランダムとなった。また、結晶粒径の熱処理

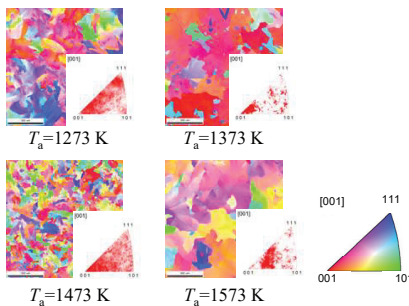


図3 再結晶した高純度Fe薄帯における面内方位マップおよび逆極点図の熱処理温度依存性の一例 (10 μm 厚)

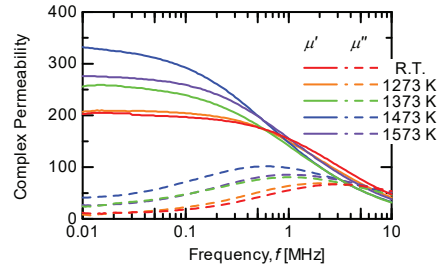


図4 再結晶した高純度Fe薄帯における μ' および μ'' の周波数特性 (10 μm 厚)

による変化は厚さによって異なった。すなわち、20 μm 厚以下では、結晶粒径は熱処理温度の増加にともない減少し、1473 K以上の熱処理温度で増加した(図3)。一方で、30 μm 厚以上では、結晶粒径は熱処理温度の増加にともない単調に増大した。

磁気特性に関しては、 μ' は熱処理温度にほぼ依存せず、熱処理前と比べ増加した。 μ'' は再結晶後もほぼ増加せず、ピーク位置はやや低周波へシフトした(図4)。一方で、透磁率値は1173 K以下で熱処理した場合と比べて低くなった。この結果は再結晶後の配向性および結晶粒径の変化によるものと考えられる。

以上より、再結晶した高純度Fe薄帯では、熱処理温度にほぼ依存せず軟磁気特性が向上したことがわかった。

4. まとめ

本研究では、高純度Fe薄帯における構造と磁気特性の熱処理温度効果について詳細に検討した。その結果、873~1173 K温度で熱処理を施した場合、軟磁気特性は熱処理温度の増加にともない向上した。一方で、1273~1573 K温度で熱処理した場合、軟磁気特性は熱処理温度にほぼ依存せず、熱処理前と比べある程度向上した。

以上から、1173 Kの温度が高純度Fe薄帯の軟磁気特性を向上させる最適な熱処理温度であり、熱処理を施した高純度Fe薄帯は小型化・高周波化を必要とした次世代受動素子のコア材としての応用が期待できる。

文献

- 1) B. K. Bose *et al*, IEEE Ind. Elec. Mag., **4**, pp.6-17(2010)
- 2) F. Fiorillo *et al*, John Wiley & Sons, Inc, pp.1-42 (2016)
- 3) X. Ma *et al*, Abstracts of the Japan Inst. Metals and Materials, **No.171**, S7.15(2022)
- 4) K. G. Nilanga *et al*, IEEE Trans. Magn., **44** (2008)

修士学位論文要約（令和5年3月）

超 100 GHz CMOS 増幅器用回路素子モデリングに関する研究

青木 拓海

指導教員：末松 憲治

Study on Circuit Modeling for over 100 GHz band CMOS Amplifiers

Takumi AOKI

Supervisor: Noriharu SUEMATSU

It is very important to accurately model the transmission lines used in matching circuits when designing circuits using CMOS processes. If a transmission line model is not provided by the foundry, EM(electromagnetic) simulation model is often used. The problem is that EM simulation is time consuming due to the tuning of the length of transmission line in matching circuits. Using scalable transmission line models efficiently obtains transmission line characteristics of arbitrary length. However, there are no examples of verifying the scalable model in over 100 GHz band, where the frequency dispersion characteristics are large. In this paper, the validity of the scalable transmission line model is verified by applying it to a 130 GHz band CMOS amplifier fabricated in 65 nm bulk CMOS process. The scalable model for over 100 GHz band are investigated and existing scalable models are surveyed. Then useful models were selected from the surveyed scalable models and transmission line TEGs were used to create the model.

1. はじめに

Beyond 5G / 6G で検討されている 100 GHz を超えた周波数帯では、CMOS FET の利得が低く、整合回路の損失を減らすことが重要である。我々の研究室では、ラジアルスタブを整合回路の AC グランドとして用いた 130 GHz 帯 CMOS 増幅器を提案した¹⁾。提案した増幅器は従来と比べ利得が向上したが、設計結果と試作結果において利得のずれが生じてしまった。今後、超 100 GHz の増幅器を開発していくにあたって、設計とのずれが生じると再設計や試作を繰り返していくことになり時間と費用が余計にかかってしまう。そのため、設計結果と試作結果が一致するように設計手法を見直す必要があると考えられる。試作時の設計では伝送線路とラジアルスタブを電磁界シミュレーション上でモデリングしていた。本研究ではより高精度なモデリングを行うために測定結果をベースにしたスケーラブルモデルを用いたモデリングを行う。

2. スケーラブル伝送線路モデルの検討

スケーラブルモデルとは、分布定数の考えをもとに伝送線路をモデリングしたものである。スケーラブルモデルは単位長さあたりの RLGC 値を抽出し、その RLGC 値で表現した単位長さあたりの等価回路を梯子状に並べるのではなく、抽出した値と線路長をかけた値を等価回路の各素子値として用いた回路である。

伝送線路の単位長さあたりの RLGC 値は表皮効果などによる分散特性を有する。そのため、分散特性を考慮したスケーラブルモデルの調査と検討を行った。調査の結果、分散特性を表現するためには回路素子を多くすることが重要であることがわかった。しかし、回路素子を増やすことはパラメータ抽出が複雑になってしまう問題がある。図 1 に本

研究で選択したスケーラブルモデルの回路図を示す。本稿では単位長さあたりの値を区別するために、添え字に u をつけているパラメータを単位長さあたりの値としている。本研究で選択したスケーラブルモデルは回路素子を任意の数に増やすことができ、そのパラメータ抽出方法が連立一次方程式を解くだけで行えるという特徴を有している。

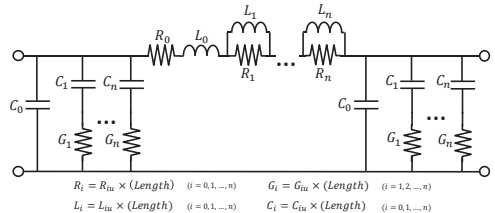


図 1 本研究で選択したスケーラブルモデルの回路図

3. スケーラブル伝送線路モデルを作成した回路素子モデリング

選択したスケーラブルモデルを用いて伝送線路のモデリングを行う。高精度なモデルを作成するために伝送線路 TEG を試作し、測定した結果を用いた。伝送線路 TEG は 60, 120, 160, 180, 210, 260, 310 μm といった様々な長さのものを試作した。試作した伝送線路 TEG を測定した結果、TEG ごとの S_{21} の振幅特性にばらつきがあることがわかった。位相特性については線路長に比例している結果となっていたため、おそらくストリップ導体の抵抗値などの違いによるものだと考えられる。スケーラブルモデルを作成するときにはこの点を考慮しなければならない。そのため、モデリングに使用するデータの選択を行った。データ選択方法は最小二乗法によってばらつきが少ないデータ候補を絞り、

その中から周波数特性として妥当なデータを選んだ。通常伝送線路は周波数が増加すると $|S_{21}|$ が減少していくので、その特性に準じている 60, 310 μm を選択した。

選択した伝送線路のデータからスケーラブルモデル作成のための単位長さあたりの RLGC 値を抽出する。ディエンベディングには伝送線路のみで行える Thru-only 法を使用した。ディエンベディングした伝送線路から単位長さあたりの RLGC 値を抽出した。図2に抽出した RLGC 値の結果を示す。インダクタンスとキャパシタンスは周波数特性をほとんど持たず、定数であることがわかる。しかし、抵抗やコンダクタンスに関しては分散特性を有するため、周波数の増加とともに増加していく特性となる。

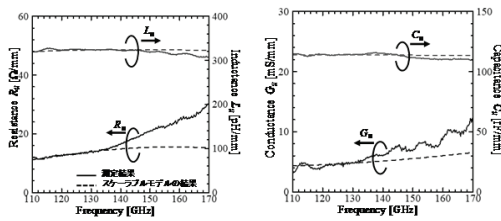


図2 抽出した単位長さあたりの RLGC 値

測定した伝送線路から抽出した単位長さあたりの RLGC 値を用いてスケーラブルモデルを作成する。抵抗やコンダクタンスについては周波数特性を持っているため、周波数の選び方が重要である。そのため、抵抗とコンダクタンスの特性に基づいてフィッティング周波数を決定した。通常、伝送線路の抵抗やコンダクタンスの特性は周波数に対して線形の特性ではないため、2点でのフィッティングでは不十分である。以上のことから、3点でのフィッティング周波数 (112, 125, 132 GHz) でスケーラブルモデルを作成した。

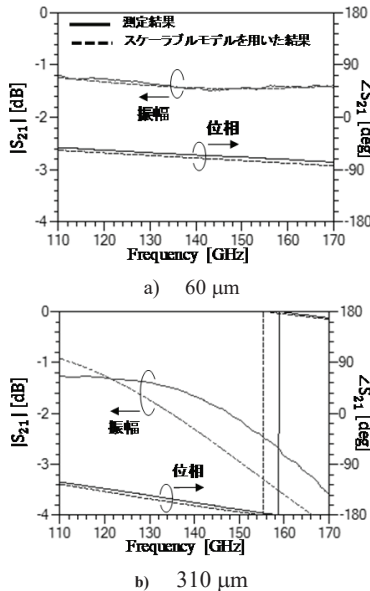


図3 伝送線路 TEG を用いた検証結果

作成したスケーラブルモデルの検証のために伝送線路 TEG の測定結果を用いて評価を行った。評価方法としては、ディエンベディング時に使用した Pad とスケーラブルモデルの伝送線路を接続し、測定結果との比較をした。図3に伝送線路 TEG とスケーラブルモデルの比較結果を示す。結果から TEG ごとの振幅のばらつきが原因となって振幅特性が測定結果とずれている結果となったが、位相特性はおおむね一致しており十分モデリングできていると考える。

4. スケーラブル伝送線路モデルを使用した 130 GHz 帯 CMOS 増幅器の設計検証

作成したスケーラブルモデルを増幅器に適用し、従来設計手法と比較をすることでその有効性を検証していく。測定した増幅器は文献に示されている回路で、スケーラブル伝送線路モデルは整合回路の伝送線路と、Pad と増幅器の間の引き出し線に適用した。ラジアルスタブは従来設計手法と同じく電磁界シミュレーションの結果を用い、FET や抵抗、キャパシタはファウンドリから提供されているライブラリのものを使用した。図4に増幅器の結果を示す。電磁界シミュレーションを用いた従来手法の結果とスケーラブルモデルを用いた結果では、利得においてスケーラブルモデルを用いた結果の方が測定結果に近づいており、有効性を確認した。

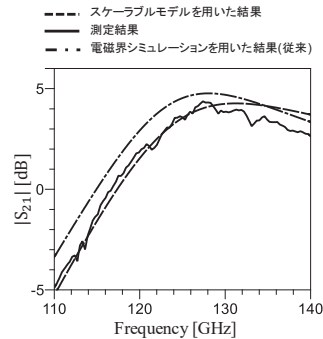


図4 スケーラブルモデルを用いた増幅器の結果

5. まとめ

本研究では、超 100 GHz 帯のスケーラブルモデルを作成し、130 GHz 帯 CMOS 増幅器に適用することで有効性の検証を行った。作成したスケーラブルモデルは長さの異なる伝送線路の特性も再現できており、伝送線路の選び方の妥当性も示した。伝送線路部分をスケーラブルモデルに置き換えシミュレーションを行い、シミュレーション結果と測定結果が従来手法と比べて利得が一致するようになった。以上のことから、超 100 GHz においてもスケーラブルモデルは有効性であることを示した。

文献

- 1) T. Machii, et al., "Gain improvement of a 130 GHz CMOS amplifier by using radial stub as AC ground," 2020 IEEE APMC, Hong Kong, Hong Kong, 2020, pp. 770-772.

修士学位論文要約（令和5年3月）

ミリ波オンチップアンテナの放射パターン測定系に関する研究

石森 晃

指導教員：末松 憲治

A Study on Radiation Pattern Measurement System for Millimeter-Wave On-Chip Antenna

Teru ISHIMORI

Supervisor: Noriharu SUEMATSU

A V/H planes radiation pattern measurement system for millimeter-wave on-chip antenna was developed. In this system, an RF probe, a probe positioner, a wafer chuck, and the frequency extender of VNA are placed on the same stage. By rotating the stage, this system enables to measure the radiation pattern of both H-plane and E-plane without handling of the rigid cable. To reduce the reflection from the surroundings of the stage, the wafer chuck has been made from acrylic material and the size of RF probe positioner has been reduced. Using this system, the measured radiation pattern and antenna gain of the 100 GHz-band on-chip patch antenna shows a good agreement with the simulation results. From these results, we confirmed that the developed millimeter-wave on-chip antenna measurement system is capable to measure radiation pattern.

1. 序論

次世代の移動体通信システムとして beyond 5G/6G が検討されている。このシステムでは 5G の 10 倍の高速大容量通信を実現するために、100 GHz を超える周波数帯の利用が検討されている。超 100 GHz 帯無線通信に用いられる送受信機では、信号処理を行う RF 回路と送受信を行うアンテナ素子が同じ IC チップ上に設計することで送受信機としての性能改善が検討されている。従来研究では、100 GHz 帯での CMOS オンチップパッチアンテナが試作、報告されている[1]。しかし、その放射パターンは測定されていない。これは、従来のオンチップアンテナ測定系は測定時にリジッドケーブルの取り回しの変化に伴ってケーブルの RF 特性も変化し、結果として測定値にも影響が出るという問題があるためである。

本論文では、100 GHz 帯のオンチップアンテナを評価するために、RF プローブと RF 信号源である周波数エクステンダ間を固定したまま、オンチップアンテナの V/H 面放射パターンの測定系を作成する。

2. ミリ波オンチップアンテナ測定系の構造検討

従来の超 100 GHz 帯オンチップアンテナ測定系は、信号を送信する AUT 側を固定し、受信する標準アンテナ側が 1 軸で動作するため、V/H 面どちらかの 1 次元測定のみが可能である。そのため、

100 GHz 帯オンチップアンテナ測定系で 2 次元測定をする方法を検討する。

従来のマイクロ波帯アンテナ放射パターン測定系で 2 次元測定を行うには、①「標準アンテナを 2 軸回転」させる方法と②「AUT と標準アンテナをそれぞれ 1 軸回転」させる方法がある。①の構造を超 100 GHz 帯で適用する場合、標準アンテナ側が二つの回転軸を持つため、設計とかかる負荷の推定が難しく、電気的な安定性が保てない可能性があるため、不採用とした。②の構造を超 100 GHz 帯で適用する場合、周波数エクステンダと RF プローブを同一ステージ上に配置し、そのステージを回転させることで、電気的な安定性を保ちながら 2 次元測定が可能と考えられるため、こちらの構造を採用する。

3. ミリ波オンチップアンテナ測定系の試作

アーム長(アンテナ間距離)は遠方界条件と使用する測定器のパラメータによる最大距離条件を計算し、アンテナ同士の物理的な干渉を回避し、かつ最大距離から 10 dB のマージンを確保できる 200 mm に設計する。

2 章の構造とアーム長を用いて試作した測定系を図 1 に示す。この系では、RF プローブ、プローブポジションナ、ウェハチャック、送信用周波数エクステンダが同一ステージ上に配置され、そのステージを回転させることで RF 信号を伝送するリ

ジッドケーブルの取り回しに変化することなく V/H 両面の放射パターンが測定できる。標準アンテナ側はアンテナとダウンコンバート用のハーモニクミキサを先端に固定したアームを回転させることでエレベーション方向の測定が可能となっている。

測定時には測定系周囲環境からの反射による影響を低減するために、標準アンテナを保持するアームとウェハチャックにアクリル樹脂素材を使用し、露出金属面には電波吸収体の設置を行っている。

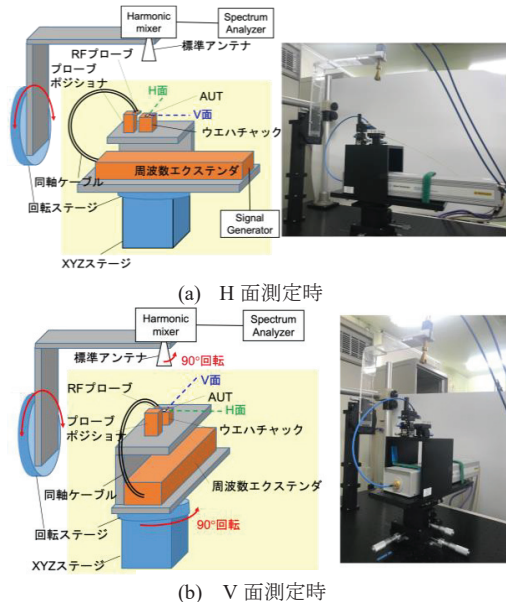


図 1 試作したオンチップアンテナ放射パターン測定系

4. 100 GHz 帯オンチップアンテナの評価

試作した測定系の測定可能範囲は RF プロブのシャドウイングによって図2のように制限される。ZX 面は測定時の V 面と一致しており、測定可能範囲は $-40^{\circ} \sim +90^{\circ}$ 、フレネルゾーンを考慮すると $-5^{\circ} \sim +90^{\circ}$ となる。100 GHz 帯オンチップアンテナのシミュレーションモデルも、RF プロブの金属面を模擬するように電磁界ポートを定義している。

オンチップアンテナのアンテナ利得は利得が既知の基準ホーンアンテナの受信電力との比較によって計算される。

放射パターンの測定結果を図3に示す。シミュレーション結果と測定結果は測定可能範囲において比較的良い一致を示した。また、アンテナ利得を表1に示した。シミュレーションで -3.5 dBi,

測定値で -4.7 dBi となっており、使用した測定器の利得誤差とアンテナ間距離の定義によっておこる誤差の範囲に収まる結果となっている。

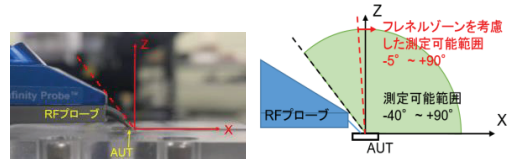


図 2 ウェハステージの拡大写真と ZX 面測定可能範囲

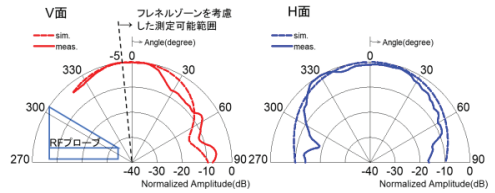


図 3 放射パターンのシミュレーションと測定結果

表 1 アンテナ利得のシミュレーションと測定結果

シミュレーション	測定値
-3.5 dBi	-4.7 dBi

5. 結論

本論文では、周波数エクステンダと RF プロブを同一ステージ上に配置し、そのステージを軸回転させることで、測定中に RF ケーブルの取り回しに変化することなくオンチップアンテナの V/H 両面の放射パターンが測定できる測定系の作成を行った。この系を用いて、100 GHz 帯オンチップパッチアンテナの放射パターン及びアンテナ利得を測定し、シミュレーションと測定値の比較的近い結果が得られた。これらの結果から、作成した測定系がオンチップアンテナの放射パターン測定が可能であることを確認した。

文献

[1] J. Temga et al., "100GHz-Band On-Chip 1x2 Phased Array Antenna Fed By Hybrid Coupler On 45nm CMOS SOI," IEEE RFIT 2022, pp. 164-166.

修士学位論文要約（令和5年3月）

下り回線における複数スモールセル基地局間の 干渉を考慮した周波数割当に関する研究

伊藤 栄輔

指導教員：西山 大樹

A Study on Frequency Allocation Considering Downlink Interference among Multiple Small Cell Base Stations

Eisuke ITO

Supervisor: Hiroki NISHIYAMA

The use of high-frequency bands is being considered to meet the ever-increasing communication requirement. Based on the characteristics of radio waves, base stations are classified into macro cell base stations (MBS) and small cell base stations (SBS) according to cell size. In addition, temporary base stations are deployed in areas with communication difficulties to accommodate user equipment (UE) in emergencies such as disasters or large-scale events. Since the frequency used by temporary base stations is the same as that of SBS, inter-cell interference occurs. In this study, we proposed a method to selectively allocate the frequencies used by temporary base stations according to the situation. Simulation results show that the minimum throughput of UEs can be improved by selective frequency allocation considering the number of UEs and path-loss between base stations.

1. はじめに

近年モノのインターネット（IoT：Internet of Things）などの発展により、通信可能なデバイスが増えている。今後拡大し続ける通信需要に応えるため、Beyond 5G や 6G といった次世代無線通信での目標の1つとして通信容量の向上があげられる¹⁾²⁾。実現のための解決策として高周波数帯の利用がある。各エリアは4Gなどのプラチナバンド帯などを使用するマクロセル、高周波数帯を使用するスモールセルの2種類のセルによって構成される。また、災害時や大規模イベントなどの有事においては、車載型の臨時基地局をユーザ(UE:User Equipment)が密集するエリアに配備される。このとき、臨時基地局が使用する周波数は既存基地局であるスモールセル基地局(SBS:Small cell Base Station)と同一であるためセル間干渉が発生する。また、セル間干渉だけでなく、UE台数および基地局間の距離減衰を考慮しながら選択的に割当を行う必要がある。そこで、本研究ではセル間干渉を考慮した選択的周波数割当を提案する。

2. システムモデル

図1のように、2つのMBS(Macro cell Base Station)の境界エリアにUEが密集し通信が逼迫するエリアが存在するシナリオを想定する。また、臨時基地局と周波数共用するSBSをそれぞれSBS AとSBS Bとする。SBS AおよびSBS Bが使用する周波数帯域を α 、

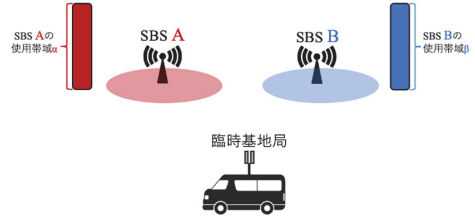


図1 本研究におけるシステムモデル

β とおく。各 SBS と臨時基地局が使用する周波数帯は MBS が決定する。このとき、 k 番目の基地局における m 番目の UE の SINR $\Gamma_{k,m}$ およびスループット $R_{k,m}$ は、

$$\Gamma_{k,m} = \frac{L_{k,m}P}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^K L_{j,m}P(\alpha_j \alpha_k + \beta_j \beta_k) + N_0} \quad (1)$$

$$R_{k,m} = \frac{\alpha_k B_{AL}^\alpha + \beta_k B_{AL}^\beta}{M_k} \log_2(1 + \Gamma_{k,m}) \quad (2)$$

と表すことができる。ここで、 $L_{k,m}$ は k 番目の基地局から m 番目の UE への距離減衰である。また、 P は各 SBS または臨時基地局の送信電力であり、 N_0 は雑音電力である。 α_k は k 番目の基地局が帯域 α を使用している場合に1、使用しない場合に0をとる2値変数であり、 β_k についても同様である。本研究では、全 UE のスループットのうち最小となるものを最大化することを考える。

3. 干渉を考慮した周波数割当手法の提案

前章で定義した $R_{k,m}$ は、時間スケールの観点からMBS上で取得することができない。そこで、基地局直下に仮想UEを想定し、仮想UE上での擬似スループットを元に周波数割当を実行することを考える。このとき仮想UEのSINR $\bar{\Gamma}_k$ および擬似スループット \bar{R}_k は、

$$\bar{\Gamma}_k = \frac{L_{k,k}P}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^K L_{j,k}P(\bar{\alpha}_j\bar{\alpha}_k + \bar{\beta}_j\bar{\beta}_k) + N_0} \quad (3)$$

$$\bar{R}_k = \frac{\bar{\alpha}_k B_{AL}^\alpha + \bar{\beta}_k B_{AL}^\beta}{M_k} \log_2(1 + \bar{\Gamma}_k) \quad (4)$$

と表される。ここで、 $L_{k,k}$ は k 番目の基地局から仮想UEへの距離減衰である。本研究では、臨時基地局が α または β を使用したときの擬似スループットを式4から導出する。総当たり計算を行うことで、最小擬似スループットを最大化するような α, β の組み合わせを決定することができる。本提案では、選択的に周波数割当をすることで、エリア内UEの最小スループットの最大化を行う。

4. シミュレーションによる性能評価

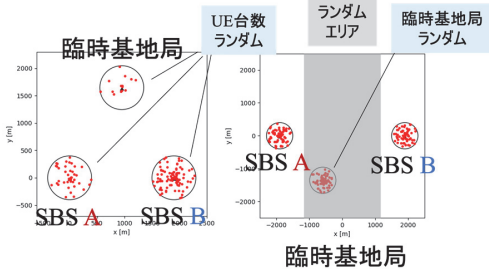
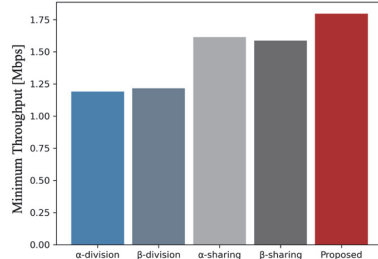


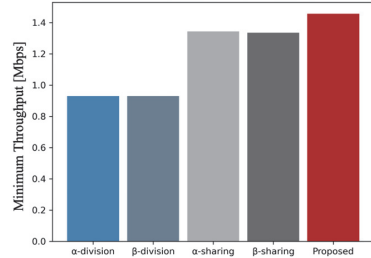
図2 シミュレーション配置例

本章では前章で提案した周波数割当手法についてシミュレーションを通じて性能評価を行う。図2にシミュレーション配置例を示す。シミュレーションでは、1)基地局のUE台数を考慮することの有効性 2)基地局間の距離減衰を考慮することの有効性をそれぞれを示すために、UE台数あるいは基地局配置のいずれかを操作する2種類のシミュレーションを実施した。1)を確認するため基地局を等間隔で配置し、UE台数をランダムとした。また、2)を確認するために臨時基地局のみを移動させ基地局間の距離減衰をランダムに変化させた。なお、2)ではUE台数は全基地局で70台とした。

4つの比較手法を用いて性能評価を実施した。それぞれ α, β を分割(division)して使用する手法、 α, β を共用(sharing)する形で使用する手法である。評価指標は式2で示したスループットのうち最小のものを使用した。



(a) UE台数がランダムの場合の平均最小スループット



(b) 基地局間の距離減衰がランダムの場合の平均最小スループット

図3 シミュレーション結果

1000回のシミュレーションの平均最小スループットを図3に示す。使用周波数 f は3.7GHz、送信電力 P は18dBm、雑音電力密度は-174dBm/Hz、セル半径は400mとした。シミュレーションの結果より、1)および2)のケースで選択的に周波数割当を行う提案手法が最も高い性能であることが確認できる。

5. まとめ

本研究では、有事において臨時基地局が使用する周波数を近隣のSBSと共用するシナリオを考えた。その際に生じるセル間干渉に対して、擬似スループットを元に周波数割当を行う手法を提案した。シミュレーションを通じて、提案手法は比較手法に対して有効であることが確認できた。

謝辞

本研究はJSPS科研費JP20K11785の助成を受けて行われたものである。

文献

- 1) M. Z. Chowdhury, et al., "6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 957-975, Jul. 2020.
- 2) P. Popovski, K. F. Trillingsgaard, O. Simeone and G. Durisi, "5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A Communication-Theoretic View," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 55765-55779, Sep. 2018.

修士学位論文要約（令和5年3月）

共通鍵暗号モジュールに対する深層学習を用いた 高精度サイドチャネル解析に関する研究

蝦名 克海

指導教員：本間 尚文， 研究指導教員：上野 嶺

Deep Learning based Accurate Side-channel Analysis on Common Key Cryptographic Modules

Katsumi EBINA

Supervisor: Naofumi HOMMA, Research Advisor: Rei UENO

This paper presents a side-channel analysis (SCA) for AES-CMAC which is used in the Controller Area Network (CAN) protocol for in-vehicle networks. The AES-CMAC is difficult to apply conventional SCAs focusing on a single round of Sboxes as in the AES-CTR, because the AES input values are unknown to the attacker due to its structure. In contrast, the proposed method focuses on the Sboxes of the first three rounds of AES continuously, and obtains the secret key by sequentially estimating the intermediate values using first-order SCA. Our method can be applied to all versions of the SecOC standard (SecOC_00610/00620/00630) for securing CAN protocols. In this paper, we apply a deep-learning-based SCA to implementing the proposed attack, in addition to conventional correlation power analysis. We demonstrate the effectiveness of the proposed attack through an experiment using AES-CMAC software implemented on the PASTA (automotive security evaluation platform), which is compliant with the SecOC (Secure Onboard Communication) standard defined in AUTOSAR (AUTomotive Open System ARchitecture). The result shows the proposed attack successfully reveal the secret key of AES-CMAC with about 50 side-channel traces in the inference phase.

1. はじめに

近年、最も強力なプロファイリングサイドチャネル攻撃である深層学習に基づくサイドチャネル解析 DL-SCA が注目されている。プロファイリングサイドチャネル攻撃は、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ている。プロファイリングフェーズにおいて、事前に消費電力波形の特徴をモデルに学習することで、攻撃フェーズの鍵回復攻撃に必要な波形数を大幅に削減できる利点がある。IoT の普及に伴い、同種の機器が多くなればなるほど、事前にプロファイリングされたモデルを用いた攻撃の危険性が高まる。自動車の場合においても、カーシェアリングやレンタカーなど、高価な自動車を購入する必要のない利用形態の多様化により、比較的安価に暗号モジュールにアクセスすることが可能になっている。一方、SecOC^[1]に対する先行研究で用いられているサイドチャネル攻撃は、既存のサイドチャネル攻撃である相関電力解析 (CPA: Correlation Power Analysis) を使用しており、事前に学習を行わないノンプロファイリングサイドチャネル攻撃である。実際の自動車への攻撃では、内部 ECU へのアクセスが比較的困難のため、攻撃に要する電力波形が大幅に削減されると検知が難しく脅威が高まる。そのため、SecOC に対

してまだ未評価であるプロファイリングサイドチャネル解析の安全性評価の必要性がある。そこで、本研究では共通鍵暗号である SecOC を車載 ECU に実装し、その安全性評価を目的として、プロファイリングサイドチャネル攻撃である DL-SCA の有効性を検討する。学習モデルには時間ずれに対してロバストなもの (CNN) を用いることで、時間ずれの影響を解消する効果がある。具体的には、AUTOSAR SecOC で規定された CAN 向けの AES-CMAC^[2] に適応可能な DL-SCA を検討することともに、自動車向けセキュリティプラットフォーム PASTA (Portable Automotive Security Testbed with Adaptability) を実験対象とし、高精度サイドチャネル解析の有効性を検討する。

2. AUTOSAR SecOC

CAN の通信を定める SecOC では、FV と MAC をパラメータとする 3 種類の規格があり、これらは再試行攻撃を防ぐためのカウンタの役割とメッセージ認証の役割を担っている。CAN では、ペイロードがあり、リソースが限られているため、FV と MAC は適宜切り捨ててメッセージに追加される。FV は再送攻撃対策のために使用されるが、通常の CMAC では対応する初期化ベクトルを使用しない (初期化ベクトルの代わりに FV を使用し、常に 0 を設定する) のが標準的である。CAN で

は、SecOC 仕様の CAN プロトコルに、メッセージ長などのパラメータを固定した AES-CMAC が使用されている。

3. SecOC へのプロファイリングサイドチャネル解析の適用

まず、攻撃対象とする AES-CMAC の AES の第 1 ラウンド SubBytes の入力は $D \oplus K \oplus \kappa$ となる。ここで、 D は 64 ビットの被認証データ、 K は 128 ビット秘密鍵、 κ は CMAC 鍵を表す。第 1 ラウンドでは、入力する 64 ビットデータ D のみ観測できるため AES の秘密鍵 K は CPA により求められない。そのため、 $K \oplus \kappa$ のうち、上位 8 バイト SubBytes に対する CPA により推定する。次に、推定した上位 8 バイトに対して ShiftRows と Mixcolumns 処理を適用し、第 2 ラウンドへ入力する 16 バイトを推定する。第 2 ラウンドでは、ラウンド鍵と未知かつ平文に依存しない固定値が XOR された値を SubBytes に対する CPA により推定する。次に、この推定した値に第 2 ラウンドの ShiftRows, Mixcolumns 処理を行い第 3 ラウンドへの入力を全て推定する。最後に、第 3 ラウンドのラウンド鍵全てを第 3 ラウンドの SubBytes に対する CPA により推定し、逆鍵スケジューリングにより秘密鍵を逆算する。SecOC へ DL-SCA を適用する際には、図 1 のように各ラウンドに分割した漏洩電力波形をそれぞれ用意した CNN に入力し、鍵候補を推定する。

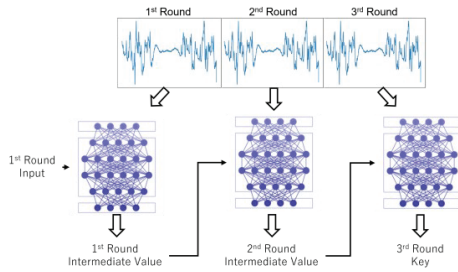


図 1 DL-SCA における攻撃フェーズの流れ

4. 評価実験

本実験では、自動車向けセキュリティプラットフォーム PASTA で使用されている ECU(RX63N)に SecOC_00620 を実装し、既存のノンプロファイリング手法と DL-SCA を用いたプロファイリング手法を実施した。同 ECU で動作している AES ソフトウェアの第 1 ～ 3 ラウンドを対象としてランダムかつ既知な平文を入力し、第 1 ～ 3 ラウンドの AES 処理を行っている時にチップ上に配置した電磁波プローブを用いて放射電磁波波形を 41 万波形取得した。プロファイリングに用いるモデルは、Zaid らが AES への DL-SCA のために提案したモデルのうち、ASCA データセット向けの 1 層の畳み込み層からなる CNN を用いた^[3]。デ

ータセットは、訓練用に 3 万波形、検証用・攻撃用に 5 千波形を用いて $LR=2e-3$, $Batch\ Size=64$, $Epoch=50$ とした。実験結果を図 2 に示す。先行研究のノンプロファイリング手法を用いた実験では、第 1 ラウンドに対しては約 3 万波形で中間値の取得が確認出来たが、第 2・3 ラウンドでは約 38 万波形以上で中間値・ラウンド鍵の取得が確認できた。この結果より、ノンプロファイリング手法では後段ラウンドで多くの波形を必要とし、秘密鍵特定に約 38 万波形以上必要なことが分かる。これは、通常の単一ラウンド CPA では数千波形程度で秘密鍵特定が可能のため、非常に多いと言える。これらの結果より、後段ラウンドの波形にジッタが含まれていることを確認し、既存のサイドチャネル解析では非常に多くの波形が必要であることを示した。DL-SCA を用いたプロファイリング手法を用いた実験では、訓練に 3 万波形を用いて、約 100 波形の推論により鍵特定が出来ることを示した。この結果より、攻撃成功に必要な波形数は、先行研究での約 38 万波形より約 92% の削減が出来ることを示した。

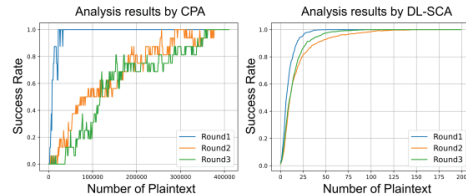


図 2 実験結果

5. まとめ

SecOC への DL-SCA 適用手法を PASTA を利用した実験により評価した。中間値を逐次的に推定していき、その結果を次のラウンドで使用していくことで第 3 ラウンドでラウンド鍵の取得が可能であることを示した。また、先行研究のノンプロファイリングサイドチャネル解析と比較しても非常に少ない攻撃波形数で鍵回復が可能であることを示した。第 1 から第 3 ラウンドの波形をまとめて取得するため、ジッタの影響で位置ずれが生じるが、DL-SCA において位置ずれにロバストな CNN を用いることで解消できることを考察した。

文献

- 1) AUTOSAR, <https://www.autosar.org>.
- 2) Tetsu Iwata, Junhyuk Song, Jicheol Lee, and Radha Poovendran, “The AES-CMAC Algorithm.” RFC 4493, June 2006.
- 3) Gabriel Zaid, et al., Methodology for efficient cnn architectures in profiling attacks, TCHES, Vol. 2020, No. 1, p. 1–36, Nov.2019.

修士学位論文要約（令和5年3月）

ストカスティック演算に基づく大規模組合せ最適化問題の 高速求解に関する研究

勝木 康太

指導教員：羽生 貴弘， 研究指導教員：鬼沢 直哉

Research on high-speed solution for large-scale combinatorial optimization problems based on stochastic operations

Kota KATSUKI

Supervisor: Takahiro HANYU, Research Advisor: Naoya ONIZAWA

I design and evaluate stochastic-computing simulated annealing (SC-SA) for solving a large-scale combinatorial optimization problem. SC-SA is designed using stochastic computing, where the computation is realized using random bitstream, resulting in fast converging to the global minimum energy of the problems. The designed SC-SA is compared with a typical SA and existing simulated-annealing (SA) processors on the maximum cut (MAX-CUT) problems, such as K2000 that is a complete 2000-node optimization problem. The simulation results show that SC-SA realizes hundreds of times faster than a typical SA. In addition, SC-SA achieves better MAX-CUT scores than other existing methods.

1. はじめに

組合せ最適化問題への近似解法の一つとして、Simulated Annealing 法(SA 法)が知られている。SA 法が属するアニーリング法の問題点として、解の探索に非常に多くの計算量が必要であり、実用化に向かっては改良が必要であることが挙げられている。本研究では、SA 法のアニーリング処理部に、確率情報を用いる演算方式であるストカスティック演算[1]を適用することでSA法の高速化を目指す。

2. アニーリングハードウェアに関する基礎的考察

本研究では組合せ最適化問題を解く手法である SA 法の高速化を目指す。対象問題として、MAXCUT 問題という問題を採用した。(図1) MAXCUT 問題は、あるグラフのノードを二つのグループに分ける場合に、エッジを切る数が最大となる分け方を求めるという問題である。グラフに関する典型的な最適化問題で画像処理や通信網・交通網などのネットワーク計画などに応用される。MAXCUT 問題を組合せ最適化問題の近似解法である SA 法を用いて解くが、本研究ではボルツマンマシン型の SA 法を基礎とした SA 法の改良を行う。SA 法による最適解の探索フローとしては、対象問題をイジングモデルと呼ばれる形式でエネルギー関数を生成し、次にアニーリング処理によって最適解の探索を行うが、アニーリング処理時の計算においてストカスティック演算と呼ばれる演算手法を用いることで SA 法の改良を行う。

3. ストカスティック演算に基づくアニーリング手法

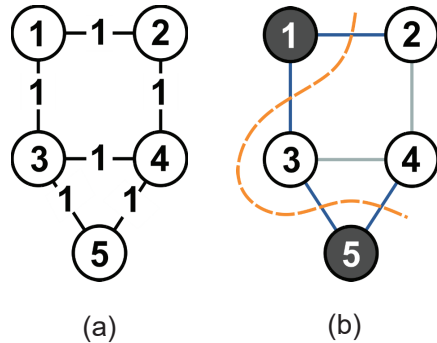


図 1(a)MAXCUT 問題の例題
(b) (a)の最適解例

本稿で用いた SA 法のアニーリング処理部のアーキテクチャを図2に示す。SA 法ではエネルギー関数であるハミルトニアン H を最小値に収束させることにより問題の解の探索を行う。(式(1)[2])各ノードの状態 $I_i(t)$ と出力 $\sigma_i(t)$ は式(2),(3)で与えられ、 h_i は各ノードのバイアス、 J_{ij} は各ノード間のバイアス、 rnd はノイズを表し、 h_i, J_{ij} は対象問題の目的関数の生成時に決定する。[3]この状態 $I_i(t)$ を、サイクル数 t によって増加する逆温度パラメータによって安定状態へと遷移させることで、最適解を示す出力 $\sigma_i(t)$ を得る。式(3)に、ストカスティック演算による \tanh 関数の近似(式(4)[4])を適用したものが式(5)である。

本研究では状態 $I_i(t)$ の計算について、従来の計算方法の場合とストカスティック演算を適用した場合(SC-SA)についてシミュレーションを行い、性能の比較を行う。

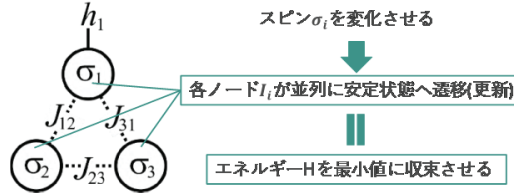


図2 SA法のアーキテクチャ

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

$$I_i(t+1) = h_i + \sum_{ij} J_{ij} \sigma_{ij} + n_{rnd} \cdot rnd \quad (2)$$

$$\sigma_i(t+1) = \text{sgn}(\tanh(I_i(t+1) \cdot I_0)) \quad (3)$$

$$\tanh(I_i(t+1) \cdot I_0) \approx \text{sgn}(\tanh(I_i(t+1))) \quad (4)$$

$$I \tanh_i(t+1) = \begin{cases} I_0 - 1, & I \tanh_i(t) + I_i(t+1) \geq I_0 \\ -I_0, & I \tanh_i(t) + I_i(t+1) < -I_0 \\ I \tanh_i(t) + I_i(t+1), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

4. 性能評価

対象問題として MAXCUT 問題のデータセット K2000 を使用して性能評価を行った。

それぞれの手法でサイクル数毎に 100 回シミュレーションを行い、平均カット値を計測した。図3は K2000 を解いた際の平均カット値と探索サイクル数の関係を示している。K2000 の先行研究での最良値は 33337 であり、最良値の 90% である 30000 に到達したときの探索サイクル数を比較すると、提案した SC-SA は従来手法と比べて 1/1000 のサイクル数でスコア 30000 に収束した。

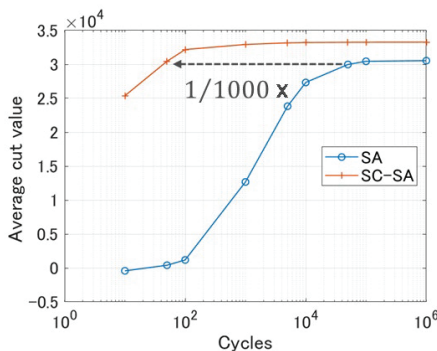


図3 平均カット値と探索サイクル数の関係

また、近年発表されたアニーリングプロセッサと比較して、K2000を解いた際の平均カット値と最大カット値を表1に示した。提案した SC-SA 法の結果は、10万サイクルでの平均カット値と最大カット値であり、既

存のアニーリングプロセッサと比較して、提案した SC-SA 法は最も大きい平均カット値を達成した。

また既存のアニーリングプロセッサは最適解(33,337)を得ることができなかったが、提案した方法のみは最適解を得ることができた。

表1 既存のアニーリングプロセッサとの比較

	SC-SA	CIM[5]	SB[6]	STATICA [7]	Best known maximum value[8]
Avg.	33,262	32,459	32,768	33,073	
Max	33,337	33,191	N/A	N/A	33,337

5. まとめ

従来の数式ベースによる SA 法と比較を行った。グラフ同型性判別問題を対象としてシミュレーションを行った結果、提案手法であるストカスティック演算近似ベースの方がより高速に判別でき、より大規模な問題でも判別可能であった。巡回セールスマン問題を対象としてストカスティック演算近似ベースでの最適解の出力を確認した。今後の展望として、他の組み合わせ最適化問題についても、ストカスティック演算ベースを適用して適用しなかった場合との性能評価、比較を行うこと、実際にハードウェア化した際の性能評価、他のアニーリング法のアニーリング処理への応用を目指していきたい。

文献

- [1] S. C. Smithon, et. al, Workshop on Signal Processing Systems, pp. 309–314, Dec. 2016.
- [2] A. Lucas, “Ising formulations of many NP problems,” *Frontiers in Phys.*, vol. 2, p. 5, 2014.
- [3] K. M. Zick, et. al, *Scientific Reports*, 5(11168),1/11, 2015.
- [4] A. Ardakani, et al., *IEEE TVLSI Syst.*, 25(10), 2688/2699, 2017.
- [5] T. Inagaki, et. al, “A coherent ising machine for 2000-node optimization problems,” *Science*, vol. 354, no. 6312, pp. 603–606, 2016.
- [6] H. Goto, et. al, “Combinatorial optimization by simulating adiabatic bifurcations in nonlinear hamiltonian systems,” *Science Advances*, vol. 5, no. 4, p. eaav2372, 2019.
- [7] K. Yamamoto, et. al, “STATICA: a 512-spin 0.25m-weight annealing processor with an all spin-updates-at-once architecture for combinatorial optimization with complete spin-spin interactions,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 56, no. 1, pp. 165–178, 2021.
- [8] T. Kanaoet. et. Al, Simulated bifurcation assisted by thermal fluctuation,” *Comm. Physics*, vol. 5, no. 1, jun 2022.

修士学位論文要約（令和5年3月）

大容量分散ストレージシステムのデータアクセス性能に関する研究

川田 悠貴

指導教員：田中 陽一郎， 研究指導教員：田中 陽一郎

Study on data access performance of high-capacity distributed storage

Yuki KAWADA

Supervisor: Yoichiro TANAKA , Research Advisor: Yoichiro TANAKA

We studied the improvement of data access performance of large capacity storage using CephFS. The study showed that parallelization of HDDs and distributed placement of data can achieve the same performance as SSDs when HDDs are used as the main device for large size data. Placing and allocating metadata and DB/WAL on SSDs increased write performance by up to 6x and reduced read time by about 4.5% in reading real data. Using the SSD hierarchy or cache improve the performance up to twice as high as HDD for smaller data. Using SSD hierarchy when data is dispersed within a file and using cache when data is concentrated locally improved the access performance with capacity efficiently. It should be noted that the computation execution time significantly reduced by selecting an optimal data path among the network including an SSD hierarchy, cache, and client-side storage.

1. はじめに

情報化社会の中、世界中で扱われる情報量は増大し続けている。ストレージシステムの主力デバイスである HDD の容量は増大しているが、データアクセス性能が十分には向上していない。データを管理する大規模なストレージシステムのデータアクセス性能の向上が課題である。ストレージシステムの性能特性の分析と、システムの中の最適な場所で最適なデバイスを用いることが重要である。本研究では大容量ストレージの需要が高まってきたライフサイエンス分野での利用を想定し、リアルタイムデータ記録/利用におけるデータアクセス性能の向上を目的とした。

2. HDD の並列化によるデータアクセス性能の向上

大容量ストレージの主力デバイスである HDD は、物理的構造のため 1 台あたりのデータアクセス性能があまり向上していない。本研究では HDD 並列化およびデータ分散配置によりデータアクセス性能の向上を行った。同一 HDD6 台を用いた RAID0/RAID1/RAID5 のデータアクセス性能測定結果をもとに、連続およびランダムデータ読み込みで最高性能を示した RAID0 のデータ配置をストレージシステムに採用した。

3. データとストレージデバイスの特性による配置・割当

本研究では、分散オブジェクトストレージ Ceph を用いたストレージシステムを構築し、これをファイルシステムとして用いる CephFS を使用した。Ceph の特徴

は柔軟なアクセス方式、優れた拡張性、高信頼性であり、次世代の SDS として注目されている。

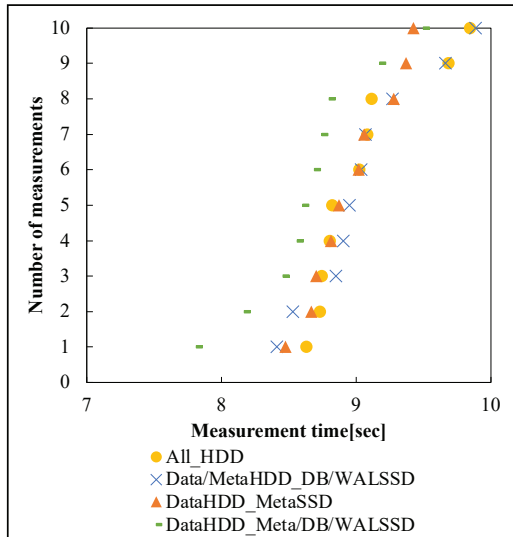


図1 メタデータ、DB/WAL の配置デバイスによる実データの読み込み時間

データ読み込み中にファイルシステム使用に必要なメタデータや、副次的に処理が必要となる内部データ(DB/WAL: 内部メタデータ/内部ジャーナル、Write Ahead Log)の読み込みが行われ、HDD の物理的待ち時間が性能のボトルネックとなっている可能性が考えられる。メタデータおよび内部データを、小

さいサイズ/ランダムな領域へのデータアクセス性能に優れたストレージへ配置割当することにより、性能向上を図った。DB/WAL を SSD に割当することで書き込みベンチマーク性能が最大 6 倍となった。ベンチマークおよび実際のデータを用いた読み込み時間の測定より、メタデータまたは DB/WAL のどちらかのための SSD への配置割当では効果がほとんど見られない条件が多かったが、この両方を SSD に配置割当することで読み込み時間が約 4.5%短縮する例を示した。

4. SSD 階層とキャッシュの利用

大容量ストレージを扱う場合、アクセス利用頻度の高いデータを HDD から SSD 階層/キャッシュに移動/昇格することで、データアクセス性能の向上およびストレージ容量の効率的利用、コスト削減を図った。ベンチマークの結果、小さいデータを扱う場合、SSD の性能が HDD に比べ 2 倍以上優れていた。大きいデータを扱う場合、HDD を用いても SSD と同等(2 倍以内)の性能を得た。ベンチマークおよび実際のデータを用いた読み込み時間の測定の結果、利用するデータがファイルの中で分散している場合は SSD 階層、局所的に集中している場合はキャッシュを利用することで容量効率よくデータアクセス性能を向上することが確認された。

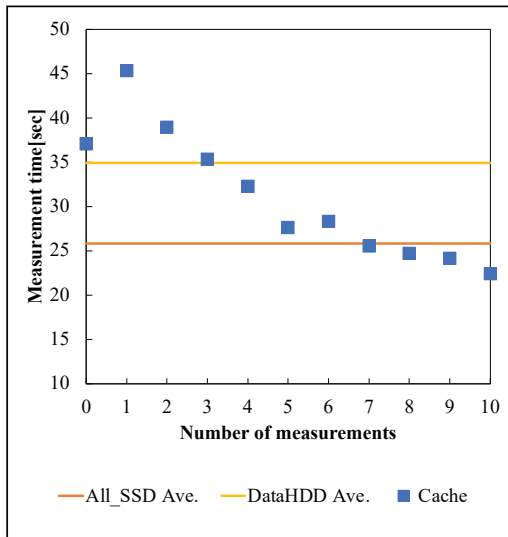


図2 SSD 階層およびキャッシュを用いた場合の実データの読み込み時間

5. クライアント側ストレージを含むストレージシステムの設計

サイズの大きいデータの利用では、ストレージのデータアクセス性能のほか、アプリケーション

のデータへのアクセス方法や利用までの段取りによって、想定以上の時間を要する場合がある。大容量ストレージからクライアントまでのデータの利用経路の選択やデータの CPU/GPU 近傍への移動により実行時間の短縮を図った。クライアント上で起動したアプリケーションを利用した実データの読み込み時間の測定より、大容量ストレージからデータを直接読み込む場合に比べ、クライアント側のストレージにデータを一旦移動(コピー)してから読み込みを行うことで読み込み時間を約 80%短縮できることを検証した。ランダム領域のデータを読み込む場合のシミュレーションより、読み込むランダムデータ量の割合がデータサイズの約 5%を超える場合、大容量ストレージの HDD からの読み込みに比べ、クライアント側の SSD にデータを移動(コピー)してから読み込みを行うことで所要時間を最大約 87%短縮することを確認した。

5. まとめ

本研究では、CephFS を用いた大容量ストレージのデータアクセス性能向上について研究を行った。HDD を主要デバイスとして用いる場合、HDD の並列化およびデータの分散配置によって、サイズの大きいデータを扱う時の性能が SSD と同等(2 倍以内)となることを示した。メタデータおよび DB/WAL を SSD に配置・割当することで書き込み性能を最大 6 倍、実データを読み込む際の読み込み時間を約 4.5%短縮した。SSD 階層またはキャッシュを用いる場合、小さいデータを扱う時の性能は HDD の最大 2 倍以上であり、利用するデータがファイルの中で分散している場合は SSD 階層を、局所的に集中している場合はキャッシュを用いることで容量効率よくデータアクセス性能を向上することができた。アクセス方法や段取りによってデータの利用に想定以上の時間を要する場合、大容量ストレージに加え SSD 階層、キャッシュ、クライアント側ストレージを設置しデータの利用経路の選択・移動を行うことにより実行時間を大幅に短縮することを示した。

文献

- 1) S. A. Weil, S. A. Brandt, E. L. Miller, D. D. Long, and C. Maltzahn, "Ceph: A scalable, High-performance distributed file system", Proceedings of the 7th symposium on Operating systems design and implementation, pp.307-320, Seattle, WA, USA, Nov.2006
- 2) CephDocumentation: <https://docs.ceph.com/en/latest/>

修士学位論文要約（令和5年3月）

シリコン光導波路を用いたスクイーズド光源に関する研究

木村 彰吾

指導教員：山田 博仁， 研究指導教員：松田 信幸

Study on Squeezed Light Source Using a Silicon Optical Waveguide Shogo KIMURA

Supervisor: Hirohito YAMADA, Research Advisor: Nobuyuki MATSUDA

Squeezed vacuum is an indispensable tool for photonic quantum information science and technologies. In this study, we generated single-mode squeezed vacuum (SMSV) via spontaneous four-wave mixing using a silicon-wire waveguide as a nonlinear medium. The SMSV was successfully generated using a dual-wavelength picosecond optical pulse extracted from a broadband optical pulse using a programmable optical filter. The output SMSV exhibited the self-intensity correlation function $g^{(2)}(0)$ greater than 10^3 , showing the high degree of non-classical property of the field. Optimization of stop band isolation, compensation for the group delay generated in the fiber patch codes were the key for the large S/N of SMSV. We obtained maximum photon flux with the squeezing parameter r of 0.52, showing the applicability of our source to quantum chemistry calculations using Gaussian Boson sampling (GBS).

1. はじめに

光を用いた量子計算ではガウシアンボソンサンプリング (GBS) と呼ばれる計算方式が近年盛んに研究されている¹⁾²⁾。GBS では周波数が縮退した偶数光子状態の重ね合わせ状態である 1 モード真空スクイーズド光 (SMSV) を入力光として用いる。SMSV は 3 次の非線形光学効果である四光波混合などから生成が可能である。大規模な GBS 装置を構築するためには光回路の高密度集積化が必須であり、そのためのプラットフォームとして小型光回路を実現可能なシリコン細線導波路は魅力的である。しかし、シリコン細線導波路を用いた SMSV の発生報告はほとんどない。そこで本研究では、シリコン光導波路の自発四光波混合を用いた SMSV の生成を目的として研究を行った。励起光源系の特性最適化により、高い発生効率と高い S/N を有する SMSV の発生に成功した。

2. 実験方法と励起光パルス最適化

初めに、SMSV を発生する自発四光波混合過程を誘起するための 2 波長パルス光源を構築した。相対位相揺らぎのない安定した 2 波長パルス光源を実現するため、ファイバーモード同期波長レーザーから得たフェムト秒光パルスのスペクトル幅を、非線形パルス圧縮器を用いて拡大したのち、プログラマブル波長フィルタを用いて必要な 2 波長成分を取り出した。2 波長パルスの中心波長は、SMSV 発生波長約 1548.9 nm を中心として±550 GHz だけ離調した。また帯域幅はそれぞれ約 200 GHz とした。SMSV 発生波長における十分な

(> 100 dB) 光源雑音除去を達成するよう、波長フィルタを設計した。

次いで SMSV 光の発生実験を行った。前述の励起光源も含めた実験セットアップを図 1 に示す。2 波長光パルスを、導波路コア幅 440 nm 及び高さ 220 nm のシリコン細線導波路に入力し、自発四光波混合を誘起した。SMSV 光を含む導波路からの出力光を、中心波長 1548.9 nm、帯域幅 100 GHz のバンドパスフィルタに通過させ、励起光パルスを除去しつつ SMSV 光成分を取り出した。フィルタ透過光を 50:50 のビームスプリッタで分岐したのち、2 台の単一光子検出器とタイムデジタルコンバータを用いた同時計数測定により出力光の 2 次の自己強度相関関数 $g^{(2)}$ を測定した。SMSV 状態の光波の $g^{(2)}(0) = 3 + 1/\langle n \rangle$ である。よって、 $g^{(2)}(0) > 3$ が得られれば SMSV 光の発生を確認できる。ここで $\langle n \rangle$ は出力光の平均光子数である。 $\langle n \rangle = \sinh^2 r$ であり、 r はスクイージングパラメータと呼ばれ、SMSV の輝度を表す。 r はポンプ光強度に比例する。

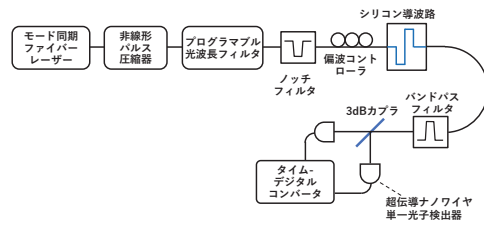


図 1 実験セットアップ

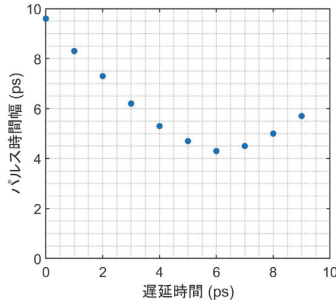


図2 プログラマブル光フィルタを用いて付与した2波長光パルス間の時間遅延に対するパルス自己相関波形の半値全幅

この実験系を用いてSMSV生成実験を行ったところ、十分な発生効率を得られず、また $g^{(2)}(0)$ の値も理論より低いものであった。この原因を調べた結果、2つの励起光パルスがシリコン導波路到達時に時間的に完全重なっていないことが分かった。図2に、オートコレータを用いて測定した2波長光パルスの自己相関波形の半値幅を示す。初期状態(遅延時間0)では、この半値全幅は9psであり、波長フィルタで設定したスペクトル幅(200GHz)から計算される理論値約4psと比較して大きく、時間領域で2波長パルス間に遅延が発生していることが考えられた。そこで、プログラマブル波長フィルタの位相制御機能を用いて短波長側のパルスの時間遅延を調整したところ、遅延時間6psにおいておよそ理論値と同程度の4psの自己相関幅が得られ、シリコン導波路入力時にタイミングが同期した2波長パルスが得られた。

3. 1モード真空スクイーズド光の生成

時間的に同期した2波長光パルスを用い、SMSV生成実験を再度実施した。図3(a)に入力光ピーク強度に対する発生光波の $g^{(2)}(0)$ を示す。最大で 10^3 を超える $g^{(2)}(0)$ が観測され、高い非古典性を示すSMSVの発生が示唆された。なお、入力光強度が弱い領域で見られる $g^{(2)}(0)$ の低下は、SMSV発生効率が低下し、検出器の暗計数が相対的に大きくなることによる。得られた $g^{(2)}(0)$ からスクイージングパラメータ r を算出し、入力光ピーク強度に対して図3(b)にプロットした。理論通り r が入力光ピーク強度に比例する結果が得られた。また、実験で得られる入力光強度の範囲で、最大で $r = 0.52$ が得られた。この値はGBSを用いた量子化学計算において多彩な分子のシミュレーションに適用可能な値である。

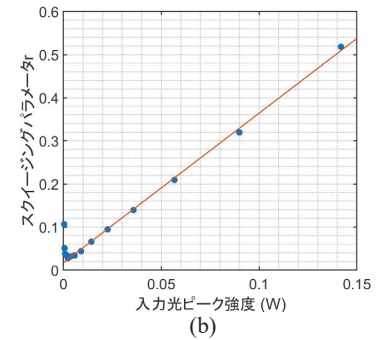
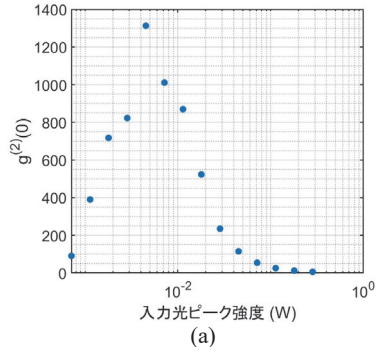


図3 (a) SMSVの自己強度相関関数および (b)スクイージングパラメータ r の入力光強度依存性

4. まとめ

本研究では、2波長光パルスを用い、シリコン光導波路から高い非古典性を示す明瞭なSMSVの生成に成功した。得られた光源の輝度はGBSを用いた量子化学計算に適用可能な値である。光ファイバー増幅器を用いて励起光強度を増強することで、SMSV光のさらなる輝度向上が期待される。

文献

- 1) C. S. Hamilton, R. Kruse, L. Sansoni, S. Barkhofen, C. Silberhorn, and I. Jex, Phys. Rev. Lett **119**, 170501 (2017).
- 2) H. Zhong, H. Wang, Y. Deng, M. Chen, L. Peng, Y. Luo, J. Qin, D. Wu, X. Ding, Y. Hu, P. Hu, X. Yang, W. Zhang, H. Li, Y. Li, X. Jiang, I. Gan, G. Yang, L. You, Z. Wang, L. Li, N. Liu, C. Lu, and J. Pan, Science **370**, 1460 (2020).

修士学位論文要約（令和5年3月）

遅延耐性ネットワークにおけるデータ到達確率向上のための
中継端末選択に関する研究

齊藤 陽

指導教員：西山 大樹

A Study on Relay Node Selection for Improving Data Arrival Probability
in Delay/Disruption-Tolerant Networking

Akira SAITO

Supervisor: Hiroki NISHIYAMA

Delay/Disruption-Tolerant Networking (DTN) is a technology that relays data through direct communication between devices to achieve data forwarding to distant devices, and is useful for information collection in disaster-affected areas where network infrastructure has been damaged. However, data arrival probability and the delay in data delivery to the destination depend on the movement characteristics of relay nodes. In this paper, we assume a two-hop relay between fixed devices and propose a technique for selecting relay nodes at the source to improve data arrival probability and reduce the delay time. This technique considers the duration of communication with the source and the estimated probability of delivering data to the destination. Simulation results show that this method improves the data arrival probability in a shorter time, i.e., reduces the delay, compared to other more straightforward methods.

1. はじめに

災害発生時、災害対策本部における被災者の安否情報収集など、情報通信に対する需要が高まる。しかし、基地局などの通信インフラが被災し、通信ができなくなる可能性がある。近年、このような災害時の通信手段として遅延耐性ネットワーク(DTN:Delay/Disruption-Tolerant Networking)¹⁾を利用することが検討されている²⁾。DTNは、デバイス同士の直接通信によってデータをリレーし、遠方のデバイスまでのデータ転送を実現する技術である。災害対策本部における安否情報の収集を考えた場合、在宅避難者は自力で本部へデータを届けることができないため、周辺にいる救急隊員にデータを中継してもらい必要がある。本研究では、この在宅避難者から救急隊員、救急隊員から本部という固定ノード間の2ホップリレーに着目し、データが本部に到達するまでの遅延時間の短縮とデータ到達確率の向上を目指す。以下、在宅避難者を発信者ノード、災害対策本部を宛先ノード、救急隊員を移動ノードと呼ぶ。発信者ノードは、通信可能な移動ノードの中から中継ノードを選択し、発信者ノードから宛先ノードまでは、1つの中継ノードを介した2ホップリレーでデータ転送を実現する。想定するシステムモデルを図1に示す。

2. 固定ノード間の2ホップリレーにおける課題

固定ノード間の2ホップリレーにおいて、発信者から宛先まで直接データが届くことはないため、宛先まで

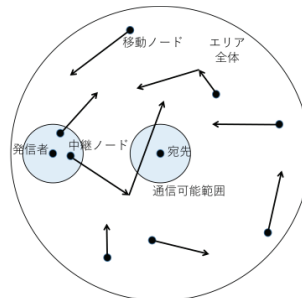


図1 想定システムモデル

のデータ転送が成功するかどうかは、発信者が選択した中継ノードが宛先ノードと通信するかどうかによって決まる。そのため、宛先ノードとの通信が期待できる移動ノードを中継ノードとして選択しないと、データ到達確率が低下し、遅延時間が増加してしまう。さらに、中継ノードは、発信者からデータを受信するのに十分な時間、発信者との通信リンクを確立できなければならない。そうでなければ、発信者と中継ノード間のデータ転送が失敗し、その中継ノードはデータ到達確率の向上に寄与しない。

3. 中継端末選択手法の提案

前節で挙げた2つの課題を解決するために本研究では、発信者ノードと移動ノード間の通信可能時間を考慮しつつ、宛先ノードと通信する確率の高い移動ノードを中継ノードとして選択する手法を提案す

る。

中継端末選択手法の提案をするにあたり、本研究における想定を述べる。発信者は、自身と宛先ノードの位置関係、宛先を中心とする円形のエリアの半径、自身の通信可能範囲内に存在する移動ノードの位置と速度ベクトルを把握できるものとする。また発信者と各ノードとの通信時間は一定であるものとし、移動ノードは Random Waypoint Model³⁾に従い、エリア内を停止することなく一定速度で移動し続ける。これはエリア内の目的地まで直線的に移動し、目的地に到達したら新たに目的地を設定するという挙動を繰り返す移動モデルである。

本手法では、まず発信者ノードにおいて、通信可能範囲内に存在する移動ノードの位置と速度ベクトルを用いて各ノードの通信可能時間を推定する。そして十分な通信時間を確保できるものを中継ノードの候補として選択する。最後に発信者が把握できる情報から中継適性値を計算し、それら中継ノード候補の中で最も大きい中継適性値をもつものを中継ノードとして選択する。ここで、中継適性値とは本研究で新たに導入する値である。発信者において移動ノードの将来の動きを把握することはできず、各移動ノードが宛先と通信する確率を正確に算出することはできないため、ある時間までに宛先と通信する確率の推定値としてこの中継適性値を導入する。

4. シミュレーションによる性能評価

提案手法の性能を評価するためにシミュレーションを行う。シミュレーションの諸元を表1に示す。比較する中継端末選択手法は、通信可能時間を考慮した上で、無作為に中継ノードを選択する time-random 手法、進行方向が最も宛先方向であるものを選択する time-direction 手法、速度が最も速いものを選択する time-speed 手法、本研究の提案である中継適性値が最も大きいものを選択する time-propose 手法とする。また、各移動ノードが宛先と通信するまでにかかる時間が既知であるものとして、その時間が最も早いものを選ぶ theoretical limit 手法を本シミュレーションにおける理論限界として同時に比較する。

移動ノード数を 200, 500 として、シミュレーションを 1000 回行ったときのデータ到達時間の CDF(Cumulative Distribution Function)を図2に示す。結果より、中継適性値を考慮した本提案手法のグラフが他の手法のグラフと比較して立ち上がりが早くなっており、理論限界である theoretical limit 手法のグラフに最も近づくことが分かった。このことから、本提案手法が短時間でのデータ到達確率の向上、すなわち遅延時間の短縮を実現していることが確認できた。また、移動ノード数が多いほど各手法のグラフの立ち上がりが早くなり、手法ごとの差が大きくなることを確認した。

表1 シミュレーション諸元

エリア半径	5000 m
最大通信可能距離	50 m
発信者と宛先の距離	2000 m
通信時間	20 s
シミュレーション時間	12000 s
発信者のデータ配布期間	2000 s
移動ノードの速さ	区間(1 m/s, 5 m/s)の一樣乱数

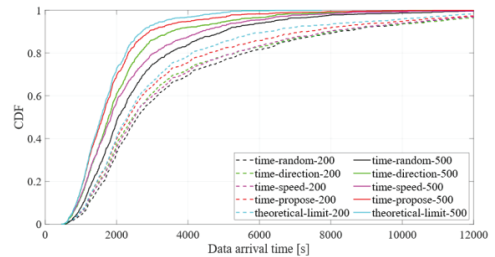


図2 データ到達時間の CDF

5. まとめ

本研究では、DTN を用いた安否情報の収集を想定し、固定ノード間の 2 ホップリレーについて検討した。その中で発信者における中継端末選択の重要性に着目し、通信可能時間と中継適性値を考慮した中継端末選択手法を提案した。そしてシミュレーションによる提案手法の性能評価を行い、他の手法と比較した結果、本手法の有効性を確認することができた。本研究は JSPS 科研費 JP20K11785 の助成を受けたものである。

文献

- 1) M. J. Khabbaz, C. M. Assi and W. F. Fawaz, “Disruption-Tolerant Networking: A Comprehensive Survey on Recent Developments and Persisting Challenges,” in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 14, no. 2, pp. 607-640, Second Quarter 2012.
- 2) H. Nishiyama, M. Ito and N. Kato, “Relay-by-smartphone: realizing multihop device-to-device communications,” in IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 4, pp. 56-65, Apr. 2014.
- 3) S. M. Mousavi, H. R. Rabiee, M. Moshref and A. Dabirmoghaddam, “MobiSim: A Framework for Simulation of Mobility Models in Mobile Ad-Hoc Networks,” Third IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, Oct. 2007, p. 82.

修士学位論文要約（令和5年3月）

光・無線融合フルコヒーレント伝送に関する研究

佐藤 大晟

指導教員：廣岡 俊彦

Study on Coherently-Linked Optical and Wireless Transmission

Taisei SATO

Supervisor: Toshihiko HIROOKA

An economical mobile fronthaul (MFH) that can efficiently deliver large-capacity data signals to multiple antennas is essential in the next generation high-speed radio access network (RAN) such as advanced 5G and 6G. For such an MFH, we have proposed a coherently-linked optical and wireless transmission system using an optical injection-locked carrier frequency conversion circuit (IL-CFC). The IL-CFC made it possible to realize heterodyne detection with a high SNR, and to increase the loss budget of the transmission system by 6 dB compared with that obtained by employing a conventional self-heterodyne method. With the IL-CFC and 42 dBi high gain horn antennas, a 64 Gbit/s 256 QAM signal was successfully transmitted over a 10 km single mode fiber (SMF) and 40 m wirelessly in the 61 GHz band. In addition, I applied the coherently-linked optical and wireless transmission system to the 28 GHz band that has been practically employed in 5G, and succeeded in 16 Gbit/s, 256 QAM optical (10 km SMF) and wireless (3 m) transmission using a practical compact microstrip array antenna.

1. はじめに

近年、5G 高度化および、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 Mobile Fronthaul(MFH)が不可欠となる。我々はそのような MFH として注入同期型キャリア周波数変換法を用いた光・無線融合フルコヒーレント伝送方式を提案している^[2,3]。本研究では 61 GHz 帯を用いて本方式と Self-heterodyne 方式との性能比較を行い、FEC 閾値(2.0×10^{-2})において注入同期方式が 6 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、高利得ホーンアンテナを用いて、64 Gbit/s、256 QAM 信号の Single Mode Fiber(SMF)10 km、無線 40 m フルコヒーレント伝送に成功した。また、5G において実用化が開始されている 28 GHz 帯へ本伝送方式を適用し、小型マイクロストリップ型アレイアンテナ^[4]を用いて、16 Gbit/s、256 QAM 信号の SMF10 km、無線 3 m フルコヒーレント伝送に成功した。

2. 61 GHz 帯光・無線融合フルコヒーレント伝送

図 1 に伝送系を示す。集約基地局側では 8 Gbaud、m-QAM (m=64, 128, 256) 信号 (48~64 Gbit/s) 及び光キャリアから 61 GHz 低周波数側へシフトした Pilot Tone(PT)信号を生成している。合波した信号を-

dBm のパワーで SMF10 km 伝送する。図 1(a)の注入同期方式は我々が提案している注入同期型キャリア周波数変換回路を用いて、光キャリアから IF 信号にキャリア周波数変換を行う。PT を用いて LO(LD)を注入同期することでデータ信号に位相同期した高出力かつ高 OSNR な LO を得ることができる。得られた LO とデータ信号をヘテロダイン検波することで、61 GHz-IF 信号に変換している。図 1(b)の Self-heterodyne 方式はデータと PT 信号をそのままヘテロダイン検波する。

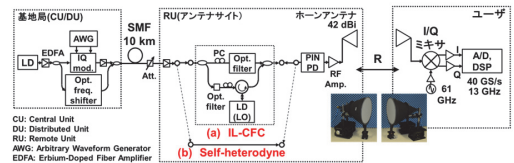


図 1 フルコヒーレント伝送系
(a)注入同期方式、(b)Self-heterodyne 方式

まず初めに SMF 出力端の可変光アッテネータ (Att)で意図的に損失を与えて(付加損失:L_{add})ロスバジェットの測定を行った。RU とユーザ間はアンテナを介さない Back-to-back である。図 2 に両方式の L_{add} に対する BER 特性を示す。FEC 閾値(2.0×10^{-2})において注入同期方式が 6 dB 高いロスバジェットを有していることがわかる。

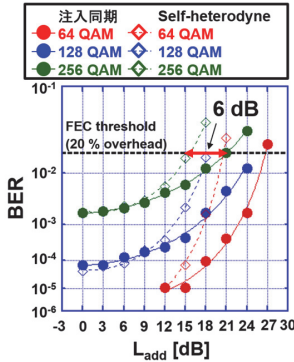


図 2 両方式の L_{add} に対する BER 特性

次に注入同期方式の光・無線融合フルコヒーレント伝送の評価を行った。RUとユーザ間には42 dBi 高利得ホーンアンテナを用い、無線伝送距離 R を変えて復調実験を行った。図 3(a)に無線伝送距離 R に対する BER 特性を示す。無線 40 m 伝送時において 64 Gbit/s、256QAM 信号を FEC 閾値 (3.8×10^{-2}) 以下の BER で伝送することに成功した。図 3(b)は無線 40 m 伝送後の 256 QAM 信号のコンスタレーションである。EVM は 3.8 %であった。

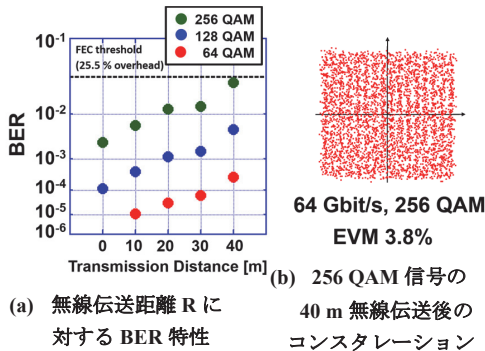


図 3 61 GHz 帯光・無線融合フルコヒーレント伝送結果

3. 28 GHz 帯光・無線融合フルコヒーレント伝送

図 1 と同じ伝送系で 28 GHz 帯での伝送実験を行った。基地局側では 2 Gbaud、m-QAM ($m=64, 128, 256$)信号(12~16 Gbit/s)及び、光キャリアから 28 GHz 低周波数側へシフトした PT 信号を生成している。RU とユーザ間はアンテナとして小型マイクロストリップ型アレイアンテナを用い、無線伝送距離 R を変えながら復調実験を行った。図 4 にアンテナの外観写真を示す。両端のダミーアレイを除く 8 つのサブアレイに信号を同相で給電して動作させた。サブアレイの縦の長さは 6.7 cm、8 つのサブアレイを並べた横の長さは 4 cm である。また、本アンテナの利得は 19.5 dBi である。

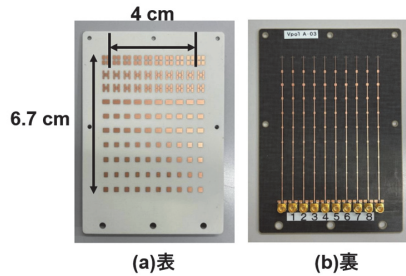


図 4 小型マイクロストリップ型アレイアンテナの外観写真^[4] (a)表面、(b)裏面

図 5(a)に無線伝送距離 R に対する BER 特性を示す。16 Gbit/s、256 QAM 信号の SMF10 km、無線 3 m フルコヒーレント伝送に成功した。図 5(b)は無線 3 m 伝送後の 256 QAM 信号のコンスタレーションである。EVM は 3.3 %であった。

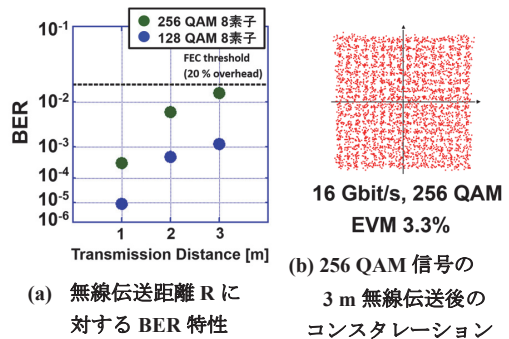


図 5 28 GHz 帯光・無線融合フルコヒーレント伝送結果

4. まとめ

61 GHz 帯フルコヒーレント伝送における注入同期方式と Self-heterodyne 方式の性能比較実験を行い、注入同期方式が 6 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、42 dBi 高利得ホーンアンテナを用い、64 Gbit/s、256 QAM 信号の SMF10 km、無線 40 m フルコヒーレント伝送に成功した。さらに、28 GHz 帯へ本伝送方式を適用し、小型マイクロストリップ型アレイアンテナを用いた 16 Gbit/s、256 QAM 信号の SMF10 km、無線 3 m フルコヒーレント伝送に成功した。

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)” November 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 5 年 3 月）

グラフェンチャネル FET のゲートスタックプロセス高度化と その高速・高感度 THz 波検出への応用に関する研究

田村 紘一

指導教員：尾辻 泰一

Study on Graphene FET Gate Stack Process Technology and its Application for Fast and Sensitive THz Detection

Koichi TAMURA

Supervisor: Taiichi OTSUJI

The author has elucidated that photothermoelectric rectification effect occurs in response to terahertz (THz) radiation incidence in asymmetric dual-grating-gate graphene-channel field effect transistors (ADGG-GFETs). Furthermore, we found that plasmonic detection also occurred, and the co-existing of these two mechanisms contributes to a fast response and highly sensitive THz-wave detection. The author also clarified the problems of the gate stack process in the GFET fabrication and developed a new device prototyping process flow to improve these problems and obtained a prospect for future advancement of the graphene device process technology.

1. はじめに

近年の情報化社会の発展や働き方の改革などに伴う通信量の増加が顕著であり、大容量無線通信の実現が期待されている。その実現には無線搬送周波数の向上が必定であり、その中心的役割を担うテラヘルツ (THz) 帯の電磁波が注目されている。本研究は、無線通信応用に関して重要課題である THz 波検出器の開発を、グラフェンという新材料に着目して高速・高感度化を行うことを主題に掲げた。素子の設計試作評価を通して提案する技術の優位性を実証するとともに、実験結果を説明しうる検出動作原理の解明を行った。さらに、試作したデバイスが抱える意図しない不純物ドーピング問題を改善し、ゲートスタックプロセスの高度化を目指して実験検証を行った。

2. 新材料グラフェンの導入

グラフェンは炭素原子が六員環構造をなす二次元材料であり、バンド構造がギャップレスかつ線形分散という特異な物性を有することから、グラフェン内の電子は相対論的 Dirac 粒子として振る舞い、極限的に秀逸な輸送特性を発揮する。その特徴を活用したグラフェンプラズモニック検出素子を実現させることで、これまで化合物半導体高電子移動度トランジスタ (High-Electron-Mobility Transistor; HEMT) において実現された優れた検出性能をも凌駕する超高速・超高感度・超低雑音検出素子の開発が期待されている¹⁾。

3. 非対称二重格子ゲート構造デバイスによる検出

著者が所属する研究室オリジナルの非対称二重格子ゲート (Asymmetric Dual Grating Gate; ADGG)

構造をグラフェンチャネル電界効果トランジスタ (Graphene channel Field Effect Transistor; GFET) に採用した ADGG-GFET の開発を進め、THz 波検出実験を通じた実証を行っている²⁾。ADGG-GFET はチャネル内の高密度な二次元電子ガスと、短ゲート (G1) と長ゲート (G2) が周期的に並べられた二重回折子ゲート電極によってテラヘルツ検出を可能にしている。グラフェンチャネルにおいて、G1 直下をキャリア誘起、G2 直下を空乏化となるよう電圧を設定する。入射した THz 波は G1 にてプラズモンに変換され光電流が生成する。この光電流が G2 直下の空乏領域である高抵抗領域に流れ込むことで光電圧へと変換され、高効率なプラズモニック検出を可能としている。また、THz 波の照射によりチャネル内のキャリアが温められホットキャリアとなり、これが拡散することで出力を得る光熱電効果³⁾ (Photo Thermoelectric Effect; PTE) も THz 波の検出原理として存在する。通常、金属の仕事関数差や pn 接合等の構造を用いることで PTE を実現させるが³⁾、本論文ではユニポーラ型の GFET において電圧を印加させるだけという非常にシンプルな構造での PTE による高速な THz 波検出を検証する。また、プラズモニック検出と PTE が同時に発現することにより検出感度の向上へ寄与することが期待される。

4. THz 波検出実験結果

ADGG-GFET を著者所属電気通信研究所附属クリールーム施設・設備にて作製し、テラヘルツ波検出実験を理化学研究所光量子工学研究センター所有の準 CW パルス・テラヘルツ光源である「is-TPG」⁴⁾

を用い、中心周波数を 0.95 THz に設定して行った。

試作した ADGG-GFET の電流電圧特性を測定し、グラフェン特有のアンバイポーラ特性を確認した。ディラック電圧が -15.5 V と大きく負にドープしており、グラフェンにプロセス由来の意図しないドープが発生していた。第一に ADGG-GFET がプラズモニック検出器として高い性能を示すことを確かめるべく、 $V_{g1} = 15$ V (キャリア誘起)、 $V_{g2} = -15.5$ V (空乏化)、 $V_{ds} = 1$ V に設定し試作デバイスを用いて THz 波検出実験を行った。ADGG-GFET において、一定の出力と入射 THz 波におおよそ追従する高速性を確認した⁵⁾。続いて、 V_{g2} を -15.5 V (空乏化) から 15 V (キャリア誘起) へと変化させて実験を行った (図1)。当初の予想ではプラズモニック検出の条件が崩れるため出力が減少すると考えていたが、 V_{g2} を 15 V (キャリア誘起) へ近づけていくほど出力は増大した。THz 波の入射によりホットキャリアが生成し、ソース・ドレインの勾配に従って拡散していると考え、PTE が起こっていると仮定してさらなる検証を行った。

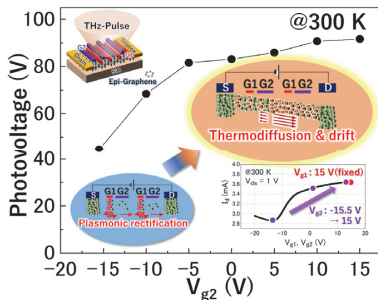


図1 THz 波光応答のゲートバイアス依存性。

G1, G2 ともにキャリアを誘起すべく、 $V_{g1} = V_{g2} = 0$ V とし、 V_{ds} を 0 V から 1.5 V へと変化させて検出実験を行った (図2)。その結果、ドレイン電圧を印加するほど出力が線形に増大し、最も注目すべき点として $V_{ds} = 0$ V にて出力が観測されなかったことが挙げられる。この結果は PTE が発現していることを支持しており、ユニポーラ型のデバイスにおいて PTE による高速な THz 波検出を実現した。さらに、プラズモニック検出の条件においても出力が観測されており、その

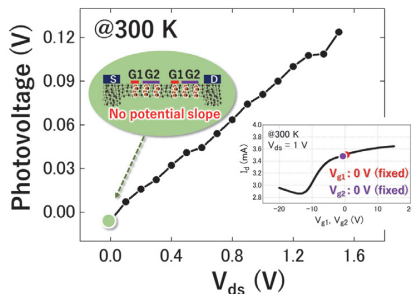


図2 THz 波光応答のドレインバイアス依存性。

速度は PTE が支配的である領域に比べて 10 ps 程速いため高速なプラズモニック検出が行われていると言えることから、両原理が同時に発現することで高速・高感度 THz 検出が実現することを示した⁵⁾。

5. GFET ゲートスタックプロセス高度化

高品質かつ大面積に成長させたエピタキシャルグラフェンを用いた試作デバイスに意図しないドープが発生していた原因を、SiC 基板の透明性を利用したラマン分光法を裏面から適用するという方法により解明した。プラズマ化学気相成長装置 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition; PE-CVD) による絶縁膜堆積がグラフェンの品質を悪化させていることが分かり、熱式の原子層堆積装置 (Atomic Layer Deposition; ALD) を用いるとグラフェンの品質が悪化しないことを確認した。ALD 装置を用いて試作したデバイスの電流電圧特性を図3に示す。なお、ゲート長は 500 nm のシングルゲートであり、チャンネル長は 20 μ m である。ディラック電圧が -3 V に観測され、従来の PE-CVD 装置により絶縁膜を堆積していたデバイスと比較すると、電子ドープの大幅な改善を示した。しかしながら、依然として微弱ながらも電子ドープが起こっており、これは試作プロセスにおける電子線露光等に起因したものと考えている。今後さらなる調査を進め、グラフェンの持つポテンシャルを最大限引き出すことのできる試作プロセスを完成させる。

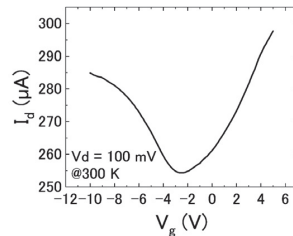


図3 ALD 装置を用いた GFET 電流電圧特性。

6. 結論

本研究の結論として、ADGG-GFET において PTE が発現していることを発見し、ユニポーラ型の高速 PTE 検出を実現した。さらに、プラズモニック検出の発現も確認され、これら二つの原理が同時に発現することにより THz 波検出の高感度化に寄与していることを発見した。また、グラフェンデバイスプロセスが抱える問題点を解明し、これを改善する新たなデバイス試作プロセスフローを考案し、今後のグラフェンデバイスプロセス高度化への見通しを得た。

文献

- 1) T. Otsuji, IEEE Trans. THz. Sci. Tech. 5, 1110 (2015).
- 2) J.A. Delgado-Notario et al., APL Photon. 11, 519 (2022).
- 3) X. Cai et al., Nature Nanotechnol. 9, 814 (2014).
- 4) S. Hayashi et al., Sci. Rep. 4, 5045 (2014).
- 5) K. Tamura et al., APL Photonics 7, 126101 (2022).

修士学位論文要約（令和 5 年 3 月）

確率的暗号化状態処理の実装に関する研究

田村 佑樹

指導教員：本間 尚文， 研究指導教員：上野 嶺

Implementation of Encrypted Data Processing based on Stochastic Computing
Yuki TAMURA

Supervisor: Naofumi HOMMA, Research Advisor: Rei UENO

Secure computation is a technology that enables computation while keeping data encrypted. It is attracting attention as a technology for both utilization and protection of sensitive data, such as data sharing between organizations and statistical analysis. This paper describes the design and evaluation of Homomorphic Encryption for Stochastic Computing (HESC) hardware. HESC is a cryptographic scheme that can compute stochastic operations, called stochastic computing, on encrypted data. Compared with the conventional homomorphic encryption schemes, HESC allows for a significant reduction in computational complexity at the expense of computational accuracy while HESC has been evaluated only on software. In this paper, we present a design of HESC hardware based on BFV and CKKS which are representative homomorphic encryption. We then apply the HESC hardware to computing various polynomial functions and oblivious inference using neural networks, and show the effectiveness of the hardware in comparison with the corresponding software on the present high-end CPU. HESC hardware achieves execution time reductions of several tens of percent for software implementations.

1. 緒言

秘密計算はデータの暗号化状態を保持したまま処理をする技術の総称である。組織間でのデータ共有、統計分析など、機密性の高いデータの活用と保護を両立する技術として注目されている。準同型暗号(HE:Homomorphic Encryption)は秘密計算を実現する代表的な技術の一つである。HE は暗号文を復号することなく計算できる公開鍵暗号であり、実現可能な計算の種類によって分類される。完全準同型暗号(FHE:Fully HE)は暗号化されたデータに対して加算と乗算の両方の計算を行うことができるが、平文と比較した場合の膨大な計算オーバーヘッドが課題である。文献[1]では、近似計算の一種であるストカスティック演算を HE に適用した暗号スキーム(HESC:HE for Stochastic Computing)が提案された。HESC では通常の HE と比べ、近似計算による誤差が発生するものの、実装効率や演算時間を大きく改善できる。しかし、既存文献では、HESC の性能評価をソフトウェア実装でのみ行っており、ハードウェア実装手法およびその性能評価については示されていない。本論文では HESC の演算を実行可能な専用ハードウェアの設計と性能評価について述べる。

2. HESC と格子暗号の実装に関する基礎的考察

HESC は HE と SC (Stochastic Computing) を組み合わせた暗号スキームである。SC とは 0 と 1 のランダムなビット列で表現された確率を数値として扱う。SC では加算と乗算を二進整数表現

や浮動小数点表現上の演算と比較して軽量に実現可能である。HESC に格子暗号に基づく HE を用いることで、演算を効率的に実現できる。格子暗号は格子問題に基づいた暗号であり、数論変換(NTT: Number Theoretic Transform, INTT: Inverse NTT)と呼ばれる剰余多項式環上の乗算の計算量を減らす演算を使用する。格子暗号ではこの数論変換が計算量の大部分を占めるため、ソフトウェア、ハードウェアの両方において効率的な実装が必要であり、アルゴリズムから実装まで研究が盛んに行われている。

3. HESC ハードウェアの設計

本ハードウェアに適用する格子暗号ベースの HESC は、代表的な準同型暗号 BFV, CKKS を用いて実現する。HESC のパラメータ、対象ハードウェアを考慮し、ソフトウェア/ハードウェアの分割、設計を行う必要がある。HESC の構成要素はストカスティック表現変換 (B2S/S2B)、符号化処理 (Encode/Decode)、暗復号 (Encrypt/Decrypt)、準同型評価 (Evaluation) である。対象 FPGA は Xilinx Zynq UltraScale XCKU040, Vertex UltraScale+ XCVU9P の 2 種類である。NTT/INTT の実行に必要なバタフライユニットのコア数は XCKU040, XCVU9P でそれぞれ 8, 32 並列、それ以外の演算コアはそれぞれ 16, 32 並列である。なお、実装したハードウェアをそれぞれ 8 NTT Units, 32 NTT Units と表記する。

表1：コアの消費リソース

Core Name	LUTs	FFs	DSPs
Mult	1050	2983	64
NTT/INTT	1262	1882	28

表2：スループット[op/s]

Device	NTT	INTT	Dyadic Mult
CPU[24]	7222	7568	36931
8 NTT Units (This work)	74157	74157	733333
32 NTT Units (This work)	294404	294404	1294118

表3：多項式秘匿演算の評価実験[ms]

	2	3	4	5	6	7	8	9	10
BFV SW	18.640	36.757	53.198	66.552	81.917	96.312	105.232	130.408	143.236
CKKS SW	6.819	14.551	16.829	26.932	29.929	32.417	34.817	53.627	56.858
HESC w/ BFV SW	1.572	1.936	2.350	2.926	3.040	3.677	4.314	4.739	5.463
HESC w/ CKKS SW	1.509	1.898	2.309	2.707	3.632	3.438	4.199	4.899	5.585
HESC w/ BFV HW (This work : 8 NTT Units)	0.645	0.800	0.968	1.195	1.206	1.453	1.689	1.935	2.207
HESC w/ CKKS HW (This work : 8 NTT Units)	0.863	1.092	1.320	1.482	1.991	1.849	2.407	2.819	3.174
HESC w/ BFV HW (This work : 32 NTT Units)	0.313	0.380	0.460	0.552	0.592	0.694	0.813	0.883	1.002
HESC w/ CKKS HW (This work : 32 NTT Units)	0.822	1.037	1.251	1.399	1.895	1.738	2.283	2.681	3.022

表4：アヤメ推論の評価実験[ms]

	B2S/S2B	Encode	Encrypt	FC1	ACT	FC2	Fusion	Decrypt	Decode	Separation	Total
BFV SW	-	0.278	6.244	115.041	14.454	112.328	-	1.428	0.158	-	249.931
CKKS SW	-	0.706	4.123	46.780	4.549	22.256	-	0.053	0.356	-	78.823
HESC w/ BFV SW	2.751	0.232	0.869	0.182	0.384	1.550	3.666	5.656	1.515	2.527	19.332
HESC w/ CKKS SW	10.696	0.703	0.742	0.186	0.384	1.582	-	3.918	26.497	-	44.709
HESC w/ BFV HW (This work : 8 NTT Units)	2.751	0.232	0.185	0.020	0.038	0.190	0.356	1.048	1.515	2.527	8.863
HESC w/ CKKS HW (This work : 8 NTT Units)	10.696	0.703	0.169	0.020	0.038	0.191	-	0.249	26.497	-	38.564
HESC w/ BFV HW (This work : 32 NTT Units)	2.751	0.021	0.072	0.011	0.021	0.104	0.213	0.462	0.143	2.527	6.326
HESC w/ CKKS HW (This work : 32 NTT Units)	10.696	0.703	0.063	0.011	0.021	0.104	-	0.159	26.497	-	38.254

4. 性能評価

ハードウェアの消費リソース、スループットの観点から評価を行う。表1について、Mult コア、バタフライユニット共に、DSP 数を最小化するような設計を行っている。また、表2に $n = 4096$ におけるスループットを示す。CPU と比較し、NTT では最大 41 倍、INTT では最大 39 倍、Dyadic Mult では最大 35 倍を達成した。

続いて多項式関数秘匿演算の評価実験について示す。表3は関数 $\sum_{i=0}^n x^i$ ($2 \leq i \leq 10$) を評価したときの実行時間の内訳である。HESC で用いるストカスティック数値の語長は 2048 であり、ソフトウェアの実行時間に関しては 100 回の平均値を結果として用いている。実行時間は、動作周波数を 8 NTT Units では 231 MHz、32 NTT Units では 242 MHz とし、各種演算にかかるレイテンシを算出して合算した値を用いた。HESC w/ BFV SW に対して最大 82%、HESC w/ CKKS SW に対して最大 46% の実行時間の削減が見込める。

表4に HESC ハードウェアをアヤメ分類問題に適用した場合の実行時間を示す。ボトルネックである Decrypt と Fusion をハードウェアで実行でき

るため、ハードウェア化による実行時間の優位性が確認できる。現状 HESC のソフトウェア実装において最速である HESC w/ BFV SW に対して最大 67% の実行時間の削減が見込める。

5. 結言

本論文では、HESC ハードウェアの設計と性能評価を行った。HESC の高速演算の観点から、NTT/INTT 等の演算コアの多並列パイプライン化によるスループットの向上を実現した。また、多項式関数の秘匿演算およびアヤメ分類問題の秘匿推論の評価を通して、実行時間の観点から HESC ハードウェアの有効性を確認した。今後の展望としては数変換を含めた HESC 全体のハードウェア化や、評価ボード上でのサイドチャネル攻撃耐性評価等が挙げられる。

文献

- 1) Koseki, Ryusuke and Ito, Akira and Ueno, Rei and Tibouchi, Mehdi and Homma, Naofumi, “Homomorphic encryption for stochastic computing,” in J Cryptogr Eng, 2022.

修士学位論文要約（令和5年3月）

光注入同期の偏波無依存化に関する研究

長屋 輝

指導教員：廣岡 俊彦

A Study on Polarization Independent Optical Injection Locking

Hikaru NAGAYA

Supervisor: Toshihiko HIROOKA

Optical injection locking has been attracting attention as a high-precision phase-locking method. However, in conventional optical injection locking, because of the polarization dependence, the polarization axis of the pilot tone (PT) injected into the laser diode (LD) as an optical phase reference signal must match the polarization axis of the LD waveguide. Since this requires, an automatic polarization control circuit, polarization independence of the injection locking circuit is desirable for simple and low-cost configuration. The aim of this study is to realize polarization-independent optical injection locking. By using an optical amplifier to realize locking even with an extremely weak PT and by limiting the maximum power of PT using gain saturation, I achieved optical injection locking independent of input polarization within ± 600 MHz of the detuning frequency between the PT and LO. I also evaluated the locking range characteristics of various LDs with different structures and found that the phase-shift-free DFB-LD is suitable for polarization-independent operation, where polarization-independent operation within ± 200 MHz is achieved.

1. はじめに

デジタルコヒーレント光伝送におけるデータ信号と局発光の高精度な位相同期技術として、光注入同期が注目されている。しかしながら、局発光として用いる半導体レーザ(LD: Laser Diode)には発振導波モードに起因した偏波依存性が存在する。そのため従来の注入同期回路では、LDへ注入する pilot tone (PT)信号の偏波軸をLDの発振モードの偏波軸(TE偏波)に一致させる偏波制御回路が不可欠となっている。本研究では、(1)PT信号(シード光)電力の制御回路の適用及び(2)高感度局発LDの適用によって光注入同期の偏波無依存化を実現し、簡便で実用性の高いデジタルコヒーレント伝送用光注入同期システムの確立を目的とした。

2. PT信号電力制御回路の適用による光注入同期の偏波無依存化

図1は本実験において局発LDとして用いた 1.5 μm 帯両端出力 $\lambda/4$ phase-shift DFB-LD のロッキングレンジ特性である。縦軸はDFB-LD出力光とPTの離調周波数、横軸はTE偏波のPT信号の強度である。赤の斜線部分は安定な注入同期を実現できる範囲、灰色の部分は同期が不安定となる領域を示している。離調が0 Hz 場合、TE偏波のPTの強度が僅か $-6 \sim -41$ dBm の範囲で安定な注入同期を実現することができる。

本研究では光ファイバ伝送されてきたPTの偏波消光比を 30 dB と想定し、任意の偏波状態のPT信

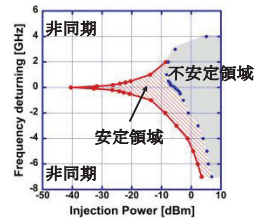


図1 ロッキングレンジ特性

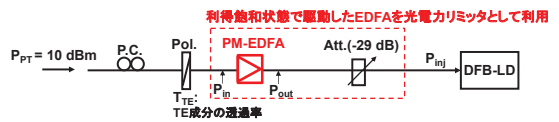


図2 光電力リミット回路

号から、一定の強度のTE偏波成分を抽出する光電力リミット回路を作製した。本回路を用いることにより、安定な注入同期を実現する強度を有するTE偏光PT信号を常に局発LDへ注入し、PTの偏波に依存しない注入同期動作を実現した。

図2はEDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifier: エルビウム添加光ファイバ増幅器)の利得飽和を利用した光電力リミット回路²⁾の構成である。偏波保持EDFA前段のポラライザによって任意の偏波状態のPT信号からTE偏波成分を抽出する。抽出したTE偏波成分を利得飽和の条件で動作させたEDFAで光増幅し、その後光アッテネータで適切な強度へ調整し、局発LDへ注入している。本回路では、ポララ

イザ前段において PT 信号を 10 dBm へ増幅している。また、EDFA の利得は 9~36 dB(入力強度範囲 -20~10 dBm)、飽和出力強度は 19 dBm であった。ポラライザに入力される PT 信号の偏波が完全に TM 偏波となった場合においても、本回路回路からは -13.5 dBm の TE 偏波 PT 信号を出力することができる。

本回路の効果を図 3 に示すコヒーレント変復調実験系を用いて評価した。送信部からは 2 Gbaud QPSK 信号と光キャリア周波数から 15 GHz 離調した PT 信号を出力している。受信部では PT 信号を光フィルタで抽出し、光電力リミッタ回路へ入力する。本回路から出力される TE 偏波 PT 信号を $\lambda/4$ phase-shift DFB-LD へ注入同期している。位相同期した LD 出力光を用いて QPSK データ信号をヘテロダイン検波し、A/D 及び DSP を用いて復調解析している。なお、この際、光電力リミッタ回路前段に設置した偏波コントローラ(PC: Polarization Controller)を用い、光ファイバ伝送路における偏波変動を模擬的に与えている。

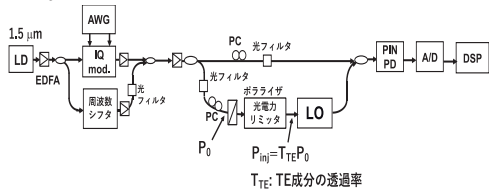


図 3 変復調実験系

図 4 は復調特性から評価した、PT 信号強度 ($P_{inj} = T_{TE} \times P_0$) に対するロッキングレンジ特性である。(a)、(b)はそれぞれ光電力リミッタ回路無、有における特性である。ここで、 P_{PT} はポラライザへの入力パワー、 T_{TE} はポラライザを通過する TE 成分の透過率である。電力リミッタを用いることによって、同期範囲が拡大され、ポラライザに入力される PT 信号の偏波が完全に TM 偏波となった場合においても離調周波数が 600 MHz 以内において安定な注入同期を実現できている。

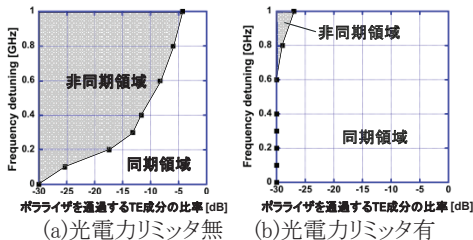


図 4 評価結果

3. 局発 LD の高感度化による光注入同期の偏波無依存化

アクティブな素子を用いないより簡便な構成の偏波無依存注入同期回路を実現するため、極めて微

弱な PT 信号にも同期が可能な、高感度局発 LD の適用を検討した。

一般に注入同期のロッキングレンジ(離調周波数幅)は局発 LD の共振器長と出力強度に反比例し、PT 信号強度に比例する関係がある¹⁾。また、外部から PT 信号を効率よく局発 LD へ結合し、これを増幅するためには、入射端の反射率が低く、利得の高い LD が好適である。さらに、注入同期の安定動作領域を拡大するためには、局発 LD を高い励起状態(大きなバイアス電流)で動作させることが望ましい。以上のような条件を満足する局発 LD として本研究では 1.5 μm 帯 Phase-shift-free DFB-LD を採用した。図 5 は本 LD のロッキングレンジ特性である。 $\lambda/4$ phase-shift DFB-LD と比較し、ロッキングレンジが広く、不安定動作領域も縮小していることがわかる。本 LD を局発光源として用い、図 3 の実験系にてロッキングレンジの偏波依存性を評価した。本評価では光電力リミッタ回路は使用せず、任意の偏波状態の PT 信号の強度を変化させ、これを直接 Phase-shift-free DFB-LD へ注入同期している。図 6 は復調特性から評価した、PT 信号強度に対するロッキングレンジ特性である。アクティブな素子を用いることなく、200 MHz の離調周波数以内において偏波無依存動作を実現した。

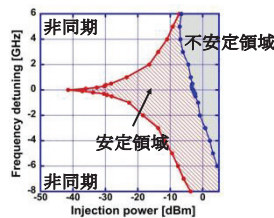


図 5 ロッキングレンジ特性

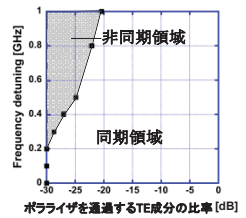


図 6 評価結果

4. まとめ

光電力リミッタ回路を用いることにより、離調周波数が ± 600 MHz 以内において PT の偏波状態に依存しない注入同期を実現した。次に、低反射率の入射端、高利得、短共振器の特徴を有する Phase-shift-free DFB-LD が光注入同期の偏波無依存化に適していることを明らかにし、本 LD を用いてアクティブな素子を用いることなく ± 200 MHz の離調周波数以内における偏波無依存光注入同期を実現した。

文献

- 1) R. Lang, "Injection locking properties of a semiconductor laser." IEEE J. Quantum Electron, vol. 18, no. 6, pp. 976-983, (1982).
- 2) 山田英一, 鈴木和宣, 中沢正隆, "エルビウム光増幅器の利得飽和を用いた光出力の安定化とソリトン通信への応用", 電気情報通信学会論文誌, Vol. J 74-C-I, (1991).

修士学位論文要約（令和5年3月）

耐量子計算機性暗号モジュールの安全性評価に関する研究

田中 裕太郎

指導教員：本間 尚文

Security Evaluation of Post-Quantum KEMs Module

Yutaro TANAKA

Supervisor: Naofumi HOMMA

This paper presents a side-channel attack on Post-Quantum Cryptography Key encapsulation (PQC). First, we propose a general side-channel attack on Fujisaki-Okamoto (FO) transform used in PQC Key Encapsulation Mechanism (KEM) to satisfy Chosen Ciphertext Attack (CCA)-secure. The proposed method uses the side-channel information during the execution of FO transform to guess the plaintext and performs Key Recovery Plaintext Checking Attack (KR-PCA) from the guessed plaintext. As FO transform is used in almost all PQC KEMs, the proposed method has high generality for PQC KEMs where KR-PCA is indicated. Then, we show that inference of plaintexts using side-channel information of FO transform is feasible using a classifier based on deep learning. We show that the proposed attack is feasible against most of NIST PQC KEM final candidates, and that full recovery of key values is possible with 576 traces against Kyber-512, one of the leading PQC KEM candidates.

1. はじめに

公開鍵暗号を用いた秘匿計算認証、電子署名技術は安全な情報通信の実現に必要不可欠である。一方で世界中で開発が進むゲート型量子計算機は従来の公開鍵暗号であるRSA暗号や楕円曲線暗号を高速に解読できる可能性があることから、量子計算機を用いた暗号解読への耐性のある耐量子計算機性暗号(Post-Quantum Cryptography: PQC)の開発・標準化が急がれている。PQCは標準化後、長期間情報のやり取りや保管といった場面で運用されることが予測されるため、高い安全性を満たす必要がある。暗号の安全性評価モデルの中で最も強力な攻撃者である選択暗号文攻撃(Chosen Ciphertext Attack: CCA)を実行可能な攻撃者に対しても安全性を確保するために、従来の公開鍵暗号の代替アルゴリズムであるPQC KEM(Key Encapsulation Mechanism: KEM)のほとんどでは選択平文攻撃(Chosen Plaintext Attack: CPA)に対して安全性を満たす耐量子公開鍵暗号スキーム(Public Key Encryption: PKE)にFO(Fujisaki-Okamoto)変換を用いてCCA安全を満たす耐量子公開鍵暗号を構築している。FO変換は入力暗号文中の改ざんを検知可能であり、改ざんを検知した際は平文から求まるシェア鍵の代わりに乱数を出力する。

サイドチャネル攻撃はデバイスに実装された暗号モジュールが動作した際に外界に漏洩するサイドチャネル情報を基にデバイス内部で扱われている秘密情報を推定する攻撃である。サイドチャネル攻撃は通常の攻撃モデルでは得ることのできない計算の中

間値を利用可能であるため、入出力値を用いた数学的暗号解読手法が未発見の暗号に対しても有効性が確認されている非常に強力な攻撃である。

本研究ではPQC KEMの復号アルゴリズム内に実装されているFO変換動作時のサイドチャネル情報から改ざん暗号文をクエリした際に復号して得られる平文を推測し、PKEへの選択暗号文を用いた鍵値復元攻撃(Key Recovery Plaintext Checking Attack: KR-CPA)を実現する。

2. FO変換によるCCA安全PQC KEM

PQC KEMはShorのアルゴリズムを用いても求解が困難な問題をベースとして構成されており、代表例としては格子暗号、符号暗号、同種写像暗号が挙げられる。しかしCCA安全を満たす公開鍵暗号を直接構築することは難しいことが知られている。そこで多くのPQC KEMでは上記の耐量子性のある問題ベースにしたCPA安全を満たすPKEを構築し、この暗号にFO変換を適用することでCCA安全を満たしている。FO変換は復号して得られる平文を再暗号化し、入力暗号文と再暗号化結果の等価性を検証することで暗号文中の改ざんの有無を検知している。FO変換には満たす安全性や計算速度等が異なる亜種が存在するものの、これらのすべては再暗号化と等価性検証といったFO変換共通のアイデアの下に構成されている。

3. 耐量子PKEへのKR-PCA

提案するKR-PCAの例として複数の格子ベースおよび符号ベースのPKEに対して適用可能なKR-PCAの手順を簡単化した表記で説明する。PKEにおける暗号文の復号処理では暗号文の復号後にデ

コード処理である DCD を実行して PKE の復号値を得る。格子ベースの KEM における DCD 処理前の PKE 復号結果は平文を m , PKE のパラメータの秘密鍵 k , 微小な誤差 e, e' を用いて $ECD(m) + ke + e'$ と表すことができる。格子ベースの PKE 復号アルゴリズムではこの値に DCD を適用させ微小な誤差 $ke + e'$ を除去する。格子ベースの PKE はこの微小な誤差 $ke + e'$ がある閾値 γ より小さい場合に平文 m を得る。一方で $ke + e'$ が閾値 γ 以上である場合, m とは異なる平文 \hat{m} が得られ, 復号に失敗する。

提案する KR-PCA において攻撃者は正当な暗号文に微小な誤差を加えた不正な暗号文 $c' = c + \delta$ を復号オラクルにクエリする。この際に PKE での入力暗号文 c' と対応する DCD 前の PKE 復号結果は $ECD(m) + ke + e' + \delta$ となる。DCD を実行した際に c' が m に復号されるためには誤差部分である $ke + e' + \delta$ と閾値 γ との関係が $ke + e' + \delta < \gamma$ を満たす必要がある。一方で $ke + e' + \delta \geq \gamma$ を満たす場合, 復号結果は \hat{m} が得られる。攻撃者は δ の値を調整しながら c' を複数回復オラクルにクエリを行った際の復号結果を知ることができれば $ke + e' + \delta = \gamma$ となる δ を求めることが可能である。前提条件として攻撃者の e, e', γ は既知のパラメータである。したがって攻撃者は $ke + e' + \delta = \gamma$ を満たす δ を求めることで秘密鍵 k に関する一次方程式 $ke + e' + \delta = \gamma$ を求解可能となり, 秘密鍵の回復が可能となる。この KR-PCA の手順は Guo らが提案した攻撃 ¹⁾ をベースとしており, ベースとしている問題や PKE スキームによって多少の違いがあるが, 不正な暗号文に対応する復号結果を取得できる場合, NIST PQC 公募コンペで第3ラウンドに残った9つの KEM のうち格子ベース KEM の Kyber, Saber, FrodoKEM, NTRU, NTRU Prime, 符号ベースの HQC, BIKE, 同種写像ベースの SIKE の8つ PKE に KR-PCA を適用可能である。

4. 波形識別器を用いた復号オラクル実現手法

サイドチャンネル波形を用いた平文判定オラクルを実現するための識別器をサイドチャンネル識別器と呼ぶ。FO 変換において PKE 復号アルゴリズムで得られた平文の値は疑似ランダム関数への入力(またはその1つ)となる。提案手法ではこの疑似ランダム関数動作時のサイドチャンネル情報を用いた深層学習に基づくサイドチャンネル識別器を提案する。波形のラベルは攻撃者が作成した暗号文に対応する平文である。攻撃時に入力した波形の分類結果を事前に作成した NN (Neural Network) を用いて推測し平文判定オラクルを実現する。提案手法では NN の精度が低い場合は平文の推測に複数波形を用いてオラクルアクセスの信頼性を向上させる。提案手法では尤度比検定を用いて実験的に高精度平文判定オラクルに必要な波形数を求める。まず作成した識別器の

ラベルに対応する平文を入力したときのサイドチャンネル情報を t 波形用意する。 t 個の波形を識別器に入力したときの出力結果である確率分布を用いて各ラベルにおける負の対数尤度を求める。この処理をランダムに選んだ 1000 個の平文で繰り返し, すべての試行で正解ラベルの負の対数尤度が他の不正解ラベルよりも大きくなるときの t を 1 回の平文判定オラクルの実現に必要な波形数とする。

5. 提案攻撃の評価実験

表 1 提案手法で完全な鍵回復に必要な波形数

PQC KEM	PRF	Accuracy	#Traces
Kyber			576
Saber	SHA3-512	0.9897	1,920
SIKE			10,980
FrodoKEM			2,804
HQC	SHAKE	0.9992	735
BIKE	256		18,111
Classic McEliece			58,536
NTRU	NTRU.Dec	0.9999	N/A
NTRU Prime			174

識別器の作成に用いた CNN アーキテクチャは Liu らが提案したサイドチャンネル攻撃に有効性が示されているもの ²⁾ を本手法に最適化したものを使用した。表 1 に攻撃に用いた識別器の精度とその識別器を用いた際の攻撃に必要な波形数を示す。調査対象とした PQC KEM は NIST の公募コンペで最終候補として残っている 9 つの実装を対象とした。PQC KEM 候補として挙げられている Kyber をはじめ, KR-PCA が未発見の Classic McEliece を除く 8 つに対して適用可能であることが分かり, 各実装に対して現実的な波形数で攻撃が可能であることが分かった。

6. まとめ

PQC KEM に実装されている FO 変換のサイドチャンネル波形を用いて一般性の高い攻撃手法を提案した。NIST によって PQC KEM アルゴリズムとして選定されている CRYSTALS-KYBER をはじめ多くの格子ベース, 符号ベース, 同種写像ベース KEM において現実的な波形数で攻撃を実現可能であることを確認した。

文献

- 1) Q. Guo, J. Thomas, and A. Nilsson, “A key-recovery timing attack on post-quantum primitives using the Fujisaki–Okamoto transformation and its application on FrodoKEM,” in CRYPTO, 2020, pp. 359–386.
- 2) Lui et al., “Effective Deep Learning-based Side-Channel Analyses Against,” IEEE 20th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications, 2021

修士学位論文要約（令和5年3月）

メモリ暗号化スキームの実装理論に関する研究

羽田 大倫

指導教員：本間 尚文， 研究指導教員：上野 嶺

A Study on Implementation Theory of Memory Encryption Scheme

Hiromichi HANEDA

Supervisor: Naofumi HOMMA, Research Advisor: Rei UENO

In recent years, Non-Volatile Memory (NVM) has gained attention due to its ability to store data permanently without standby power. NVM is power-saving and byte-addressable like the DRAM. Therefore, it is expected that NVM will be adopted as the main memory to replace DRAM in the foreseeable future. However, there are security and system-specific issues when using NVM to replace DRAM. Specifically, these are attacks such as tampering and invalid insertion, and data consistency issues. Countermeasures against attacks can be achieved by building a tree structure with encryption and Message Authentication Codes(MAC). However, a Parallelizable Authentication Tree(PAT), an adopted tree structure in recent years, suffers from data consistency problems in intermediate nodes at the recovery time from events such as crashes. In this paper, these problems are solved by using MACs' incremental property. Specifically, we propose a consistency guarantee method for NVM systems by focusing on the intermediate and leaf nodes of the tree structure, which achieves both performance and security by using incremental MAC.

1. はじめに

近年、不揮発性メモリ(NVM)は DRAM などの揮発性メモリと異なり、待機電力なくデータを永続的に格納できる性質などにより高い注目を集めている。特に、計算機の総消費電力がスマート社会の進展に伴うデータセンタや IoT デバイスの需要拡大により急速に増加すると予想されており、NVM はその削減への貢献が期待されている。また、NVM は DRAM と同様にバイトアドレッシング可能である。そのため将来的に、NVM を DRAM の代替としてメインメモリに採用することが想定されている。しかしながら、NVM を DRAM の代替として搭載する場合、セキュリティ上およびシステム上の特有の課題があり、既存手法では性能を大きく低下させることなくこれらの問題を解決することはできなかった。したがって、本研究では木構造の中間ノードと葉ノードのそれぞれに着目し、インクリメンタル MAC を活用することで性能を低下させることなくこれらの問題を解決する手法を提案する。

2. セキュアな NVM とデータの一貫性

セキュアな NVM を用いるシステムは CPU などの攻撃者がアクセスできない領域とメモリや、バスといった攻撃者がアクセス可能領域に分割される。さらに、NVM の全域に対して認証付き暗号(AE)とメッセージ認証コード(MAC)による木構造を構築することでリアルタイム性を損なわずにデータの機密性と完全性を保証する。ここで使用される木構造の PAT はナンスベースの AE/MAC に基づくものであり、木構造の更新処理

においてそれぞれの高さのノードを並列に更新することができる。しかし、この並列更新可能性によりクラッシュなどによって中間ノードのデータを喪失した場合、ナンスを復元できずシステムを正常に再開できない。

3. 木構造の中間・葉ノードに着目した提案手法

提案手法 1 は中間ノードに着目した ASIT を改良することで高速化を実現した。ASIT は中間ノードのキャッシュの内容を一部 NVM にコピーすることでクラッシュ後の木構造の復元を実現している。しかし、コピーしている内容のセキュリティのため、この部分を並列更新ができない木構造で保護する必要があった。そこで提案手法 1 ではキャッシュの内容をコピーしている領域に対してタグの更新が高速に可能なインクリメンタル MAC である PXOR-MAC を適用した。これにより、既存手法である ASIT と比較してアルゴリズムレベルにおいて実行時間を約 94% 削減した。

提案手法 2 は葉ノードに着目した SCUE を改良することで中間ノードのデータ量の削減と高速化を実現した。SCUE は葉ノードのカウンタの総和が NVM への書き込み回数と一致することからクラッシュ時に葉ノードのカウンタからルートノードの子ノードのカウンタまで復元することで木構造の復旧を実現した(復元ではなく復旧することに注意されたい)。しかし、SCUE は PAT のナイーブな性質(親ノードのカウンタは子ノードのカウンタの総和と一致する)を用いているため、木構造に対する代表的な最適化手法である分離カウンタを適用することはできない。そこで提案

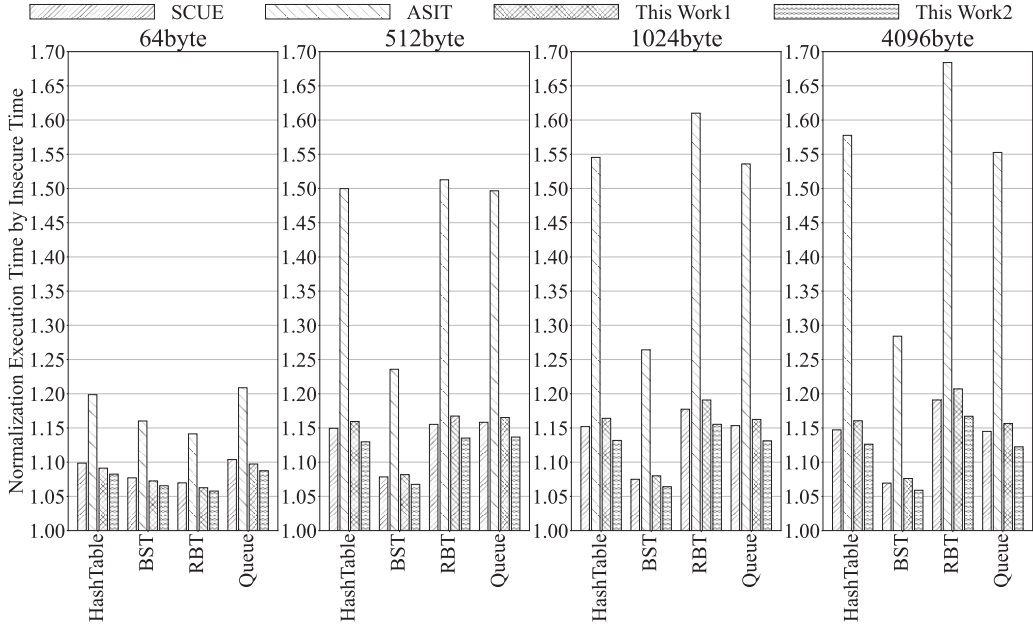


図 1: セキュリティ機構を設けていないNVMの実行時間で正規化した実行時間

手法 2 は葉ノードのカウンタとアドレスに対してPXOR-MACを適用することで、SCUEを分離カウンタを用いた木構造に対して適用可能に拡張した。また、カウンタがナンスの役割を果たすため、ナンスに対して明示的な入力はいらない。復旧時はSCUEと異なり、親ノードのカウンタ ctr_{parent} は $ctr_{parent} = ctr_{Major}[j] \times (2^n - 1) \times k + \sum_i ctr_{minor}[j][i]$ と指定することでリプレイ攻撃を防いでいる。さらに本手法ではPXOR-MACにより葉ノードのリプレイとスプライシングを検知可能であるため木のルートノードのカウンタまで復元する。また提案手法 2 はその実行に必要なデータは木の更新以前に判明しているため、その処理時間は木の更新時間で完全に隠蔽できる。

4. 分離カウンタを適用したELMの評価

本研究ではPATのインスタンスとして2023年現在最速のELMを採用する。本節では分離カウンタを適用したELMの評価を行う。ELMの中間ノードで使用しているPXOR-MACは、分離カウンタを適用していない場合2つの子ノードを同時に処理できる。しかし、分離カウンタを適用した場合は、子ノードのカウンタの合計が削減されるため、8つの子ノードを同時処理できる。具体的には、容量4TBを保護する場合、木構造の更新を5サイクル、読込を6サイクル短縮できる。また、中間ノード全体の容量は約496GBから約291.5GBと約41%削減することができる。

5. 評価実験と結果

今回、評価においてシステムシミュレータgem5を用いた。CPUは現代的なCPUと同等の設定とし

NVM容量は4TBとした。今回ベンチマークとしてハッシュテーブル、二分探索木、赤黒木、キューへのランダムデータの挿入を実行した。データサイズは4パターン用意した。提案手法1/2との比較条件として既存研究のASIT, SCUE, セキュリティ機構を持たない手法を採用した。図1に正規化実行時間のグラフを載せる。結果として、4096ByteのデータをQueueに挿入するベンチマークにおいて最大の性能差となった。提案手法1はASITと比較して約39.6%、提案手法2は約2.3%の実行時間を削減した。これは提案手法1/2において、インクリメンタル性MACであるPXOR-MACと、分離カウンタの優位性を示している。さらに、どちらの提案手法自体はメモリアイズが増加した場合でも処理時間は変化しないため、今後の大容量メモリを活用する社会においても優位性を持つ。

6. まとめ

今回、木構造の中間ノードと葉ノードのそれぞれに着目し、効率的かつ安全に木構造を復元・復旧する手法を提案した。今後の課題としてハードウェアへの実装・評価などが考えられる。

文献

- Zubair, K. A. and Awad, A.: Anubis: ultra-low overhead and recovery time for secure non-volatile memories, Proceedings of the 46th ISCA, Phoenix Arizona, ACM, pp. 157–168 (online), (2019).
- Huang, J. and Hua, Y.: Root crash consistency of SGX-style integrity trees in secure non-volatile memory systems, Proceedings of the 29th HPCA (2023).

修士学位論文要約（令和5年3月）

多モードファイバにおける GAWBS 雑音特性に関する研究

平井 孝明

指導教員：廣岡 俊彦

Study on GAWBS Noise Characteristics in Multi-mode Fiber

Takaaki HIRAI

Supervisor: Toshihiko HIROOKA

Internet traffic has been increasing by 50 % per year, and so the demand for a larger transmission capacity in a single optical fiber has been rapidly growing. However, the capacity per fiber is approaching its limit. As a breakthrough approach for overcoming this limit, “3M technology” — multi-level, multi-core, multi-mode— has been proposed. In a quadrature amplitude modulated (QAM) signal transmission, it has recently been found that guided acoustic-wave Brillouin scattering (GAWBS) degrades the transmission performance. GAWBS is non-stimulated scattering in a forward direction that occurs as a result of the interaction of light with a transverse acoustic vibration. In this paper, I present the theoretical and experimental analyses of GAWBS phase noises generated in multi-mode fiber (MMF) and clarify the mechanism.

1. はじめに

近年、光伝送の大容量化への需要は急速に高まっており、通信トラフィックの爆発的な増加が予想されている。さらなる伝送容量増大のため、マルチモードファイバ (MMF: Multi-mode Fiber) を用いて、各伝搬モードに異なるデータ信号を乗せるモード分割多重伝送技術に関する研究が行われている¹⁾。また、最近の光通信では光の位相情報を利用したコヒーレント光伝送方式が主流となっており、その伝送特性の劣化要因の一つとして導波音響波型ブリルアン散乱(GAWBS: Guided Acoustic-Wave Brillouin Scattering)²⁻³⁾が注目されている⁴⁻⁷⁾。GAWBS とは、円柱構造を有する光ファイバ中で発生する熱音響振動モードとファイバ中を伝搬する光波の相互作用により生じる前方散乱である。図1に GAWBS を引き起こす2種類の音響波の振動モードを示す。図1(a)の $R_{0,m}$ モードは位相雑音、(b)の $TR_{2,m}$ モードは位相雑音と偏波雑音を同時に引き起こすことが知られている。本研究では MMF 中における各伝搬モード (LP モード) で生じる GAWBS 位相雑音を測定し、その発生機構を実験および解析により明らかにした。

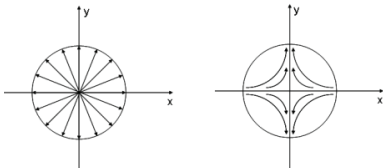


図1 $R_{0,m}$ および $TR_{2,m}$ モードの基本振動モード

2. 3MF における GAWBS 雑音特性の評価

図2(a),(b)にファイバ長 38.6 km の 3-mode fiber (3MF)において LP_{01} 、 LP_{11} モードをそれぞれ単独で励振した際の GAWBS 位相雑音のスペクトルを示す。また、図中のプロットは $R_{0,m}$ モードの位相雑音の大きさを数値計算した結果である。 LP_{11} モードの場合は高周波側で実測と計算の間に数 dB の差が存在する。その要因として、ヘテロダイン検波で位相雑音と同時に検出している強度雑音の影響が考えられる。そこで、直接検波系を用いて純粋な強度雑音成分を測定した。 LP_{11} モードを単独で励振した際の直接検波信号のスペクトル(黒)と、ヘテロダイン検波で得られたスペクトル(赤)を重ねて比較したものを図3に示す。高周波側で両スペクトルが類似していることより、図2(b)の高周波側にみられた数 dB の計算結果との差は強度雑音成分に起因することがわかった。この強度雑音は縮退する LP_{11a} と LP_{11b} モードがランダムに結合しながらファイバ中を伝搬する過程で生じる、モード間の光干渉に起因するものと考えられる。

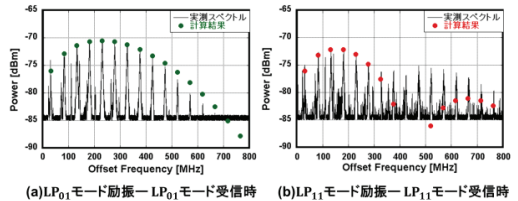


図2 各 LP モードにおける GAWBS 位相変調雑音の測定結果と計算機解析結果の比較

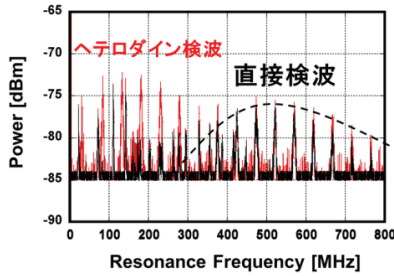


図3 LP₁₁モード単独励振時のヘテロダイン検波信号(赤)および直接検波信号(黒)の比較

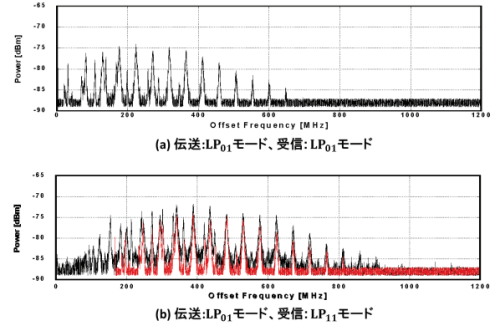


図4 LP₀₁モードを単独で励振した際のヘテロダイン検波の電気信号スペクトル

3. 異なるモード間の新たな GAWBS 雑音の観測

LP₀₁モードを単独で励振し、LP₀₁モード、LP₁₁モードで受信した際の 10-mode fiber (10MF)伝送路中で生じる GAWBS 位相雑音のヘテロダイン検波信号の測定結果を図 4(a),(b)に示す。非励振モードで受信した図 4(b)のスペクトルは、励振モードで受信した図 4(a)のスペクトルを高周波側に 165.40 MHz だけ周波数シフトした形状(図中の赤線に対応)と合致することがわかった。同様に LP₂₁、LP₀₂、LP₃₁、LP₁₂モードを受信した際のスペクトルとの比較において、それぞれ 236.57 MHz、236.63 MHz、307.70 MHz および 307.97 MHz の周波数シフト量 Δf が観測された。Shelby 氏³⁾は、長手方向に伝搬する音響波との位相整合により異なるモード間の結合が生じている可能性を指摘している。長手方向に波数ベクトル q を有する音響波は、2つの LP モードとの間の伝搬定数差 Δk_0 が、 $\Delta k_0 = q$ の位相整合条件を満たすとき、ファイバ断面内に存在する音響波の共鳴周波数を Ω_0 として

$$\Omega = \Omega_0 + \mu q^2 \quad (\mu: \text{係数}) \quad (1)$$

の周波数で結合を生じさせるとしている。今回実験により得られた周波数シフト量 Δf と伝搬定数差 Δk_0 との関係を図 5 に示す。図中には音響波の分散関係を

$$\Delta f = \frac{\mu}{2\pi} \sqrt{|\Delta k_0|} \quad (2)$$

と仮定してフィッティングした曲線も示している。実測値とフィッティングがよく一致していることより、周波数シフト量は伝搬定数差の 2 乗ではなく平方根に比例する関係にあることが分かった。この時、比例係数 μ は、 $\mu = 8.9 \times 10^5 \text{ [Hz} \cdot \text{m}^2]$ であった。図 5 に見られる LP モード間の伝搬定数差と周波数シフト量の関係は、フォノン分散曲線のうち、LA(縦音響フォノン)と TA(横音響フォノン)に類似した関係が見られている。したがって、モード結合を介した周波数シフトを伴う GAWBS 雑音は音響フォンを介して生じていると考えられる。

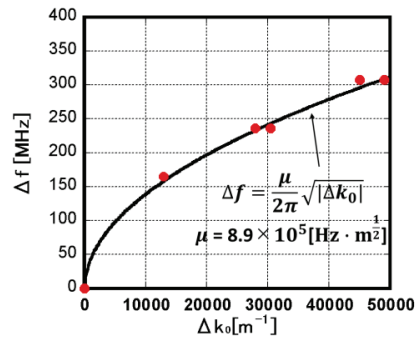


図5 周波数シフト量と伝搬定数差 Δk_0 の関係

4. まとめ

本研究では、実験および計算機解析により多モードファイバの各 LP モードにおける GAWBS 位相雑音特性を詳細に評価した。1つのモードを単独で励振し、別モードで受信した際の GAWBS 位相雑音を測定した結果、周波数シフトを伴うスペクトルが観測されることを明らかにした。本研究で明らかにした GAWBS 雑音特性をもとに、本雑音が MMF を用いたコヒーレント光伝送特性に及ぼす影響が明らかになることが期待される。

文献

- 1) S. Berdagué et al., Appl. Opt., vol. 21, no. 11, p. 1950 (1982).
- 2) R. M. Shelby et al., Phys. Rev. Lett. **54**(9), p. 939, (1985).
- 3) R. M. Shelby et al., Phys. Rev. B, **31**, p. 5244, (1985).
- 4) M. Nakazawa et al., Opt. Exp., **26**(7), p. 9165, (2018).
- 5) M. A. Bolshtyansky et al., OFC2018, M4B.3.
- 6) M. Paskov et al., OFC2019, Tu3J.3.
- 7) M. Yoshida et al., Opt. Exp., **27**(25), p. 36691, (2019).

修士学位論文要約（令和 5 年 3 月）

無線 IoT センサノード検出用 Wi-Fi バックスキャッタ受信機に関する研究

藤谷 雄紀

指導教員：末松 憲治

A Study on Wi-Fi Backscatter Receiver for Wireless IoT Sensor Node Detection

Yuki FUJIYA

Supervisor: Noriharu SUEMATSU

In order to realize smart factory for Society 5.0 and Industry 4.0, wireless Internet of Things (IoT) becomes a key technology. In the smart factory, many wireless devices exist in a closed area and radio interference becomes severe. A receiver architecture for Wi-Fi Access Point (AP) that detects Sensor Nodes (SNs) using 5 GHz band Wi-Fi backscatter and self-mixing has been proposed. In the AP receiver, the received backscattered signal is down-converted by the transmitted (Tx) Wi-Fi signal, i.e., self-mixing, therefore the pure SN's clock signal which is used for On-Off-Keying (OOK) modulation at the SN can be replied. In this study, the difference in Tx Wi-Fi signal modulation schemes between single-carrier and multi-carrier, and the influence of leaked Tx signal are described analytically. Moreover, Signal-to-Noise Ratio (SNR) considered the delay time of the backscattered signal is calculated as well. The results show that the line spectrum is obtained at the clock frequency of the SN, but the noise floor rises using the multi-carrier-modulated Tx signal because of subcarrier intermodulation. Especially, the leakage of the Tx signal causes the rise of the noise floor in the frequency range that is lower than Wi-Fi bandwidth. In addition, the symbol time dependence of the signal power and the noise power density is made clear analytically.

1. はじめに

Society 5.0 や Industry 4.0 で実現が期待されているスマートファクトリーでは無線 IoT デバイス数の増加に伴い電波干渉が深刻な問題となる。これまでに 5 GHz 帯 Wi-Fi バックスキャッタ、及びセルフミキシングを用いてセンサノード (SN: Sensor Node) を検出する Wi-Fi アクセスポイント (AP: Access Point) 用の受信機アーキテクチャが提案されている。AP 受信機では、受信したバックスキャッタ信号を元の Wi-Fi 送信信号によってセルフミキシングすることにより、SN で On-Off-Keying (OOK) 変調の際に使用されるクロック信号を再生できる。本論文では送信信号の変調方式の違い、送信波リーク、バックスキャッタ信号の遅延時間に着目して受信信号の定式化を行い、受信 Signal-to-Noise Ratio (SNR) に影響を与えるパラメータとそのメカニズムを解明する。

2. 送信信号の変調方式の違いを考慮した受信信号の定式化

図 1 に定式化のためのブロック図を示す。送信信号は、Binary Phase-Shift Keying (BPSK) 変調によるシングルキャリア (SC: Single-Carrier) 変調信号と Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 変調による (MC: Multi-Carrier) 変調信号を考慮、簡単化のため帯域制限なしの理想変調波とする。送信波リークはあり、なしそれぞれの場合を考える。SN クロック

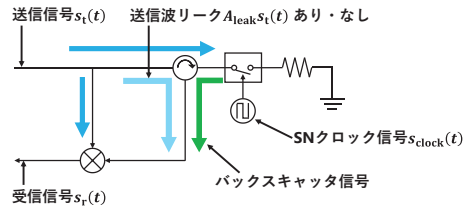


図 1 変調方式の違いを考慮した定式化方法

信号はクロック周波数を $f_{clock} = \frac{\omega_{clock}}{2\pi}$ とし、理想矩形波による OOK 変調を仮定する。ミキサは簡単化のため理想乗算器とする。

送信波リークなしの場合、送信信号を SC 変調とすると受信信号は、

$$s_{r,SC}(t) = \frac{1}{4} + \frac{1}{\pi} \sin(\omega_{clock}t) + \sum_{i=2}^{\infty} \left\{ \frac{1}{(2i-1)\pi} \sin((2i-1)\omega_{clock}t) \right\} + \text{アップミキシング成分} \tag{1}$$

と計算できる。ここで、 $f_c = \frac{\omega_c}{2\pi}$ は搬送波周波数を表す。

式(1)の周波数スペクトルイメージを図 2 に示す。BW は送信信号帯域幅である。式(1)、図 2 より、クロック基本波線スペクトルが得られ、フロアノイズは発生しないことがわかる。送信信号を MC 変調とすると、受信信号は、

$$s_{r,MC}(t) = \frac{1}{4} + \frac{1}{\pi} \sin(\omega_{clock}t) + \sum_{i=2}^{\infty} \left\{ \frac{1}{(2i-1)\pi} \sin((2i-1)\omega_{clock}t) \right\}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{4N_{sc}} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^{N_{sc}} \cos((\omega_i - \omega_j)t + \phi_i(t) - \phi_j(t)) \\
 & + \frac{1}{\pi N_{sc}} \sin(\omega_{clock}t) \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^{N_{sc}} \cos((\omega_i - \omega_j)t + \phi_i(t) - \phi_j(t)) \\
 & + \sum_{i=2}^{\infty} \left\{ \frac{1}{(2i-1)\pi N_{sc}} \sin((2i-1)\omega_{clock}t) \right. \\
 & \quad \left. \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^{N_{sc}} \cos((\omega_i - \omega_j)t + \phi_i(t) - \phi_j(t)) \right\} \\
 & + \text{アップミキシング成分} \tag{2}
 \end{aligned}$$

と計算できる。ここで、 $\phi(t)$ は位相、 N_{sc} はサブキャリア数、 $f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}$ はサブキャリア周波数を表す。式(2)の周波数スペクトルイメージを図3に示す。 f_c は送信信号中心周波数である。式(2)、図3より、サブキャリアの相互変調によりノイズフロアの上昇はあるが、クロック基本波線スペクトルが得られることがわかる。

送信波リークありの場合、SC変調ではフロアノイズは発生せず、MC変調では送信信号帯域幅以下のフロアノイズを増大させることが明らかとなった。

3. バックスキャッタ信号の伝搬遅延を考慮した受信信号の定式化

図4に定式化のためのブロック図を示す。送信信号はBPSK変調によるSC変調で帯域制限なしの理想変調波とする。このとき、信号電力(クロック基本波線スペクトル電力)は、

$$P_{\text{signal}} [\text{mW}] = \frac{5}{\pi^2} A_{\text{Tx}}^2 A_{\text{Rx}}^2 \left(1 - \frac{T_d}{T_s}\right)^2 \cos^2(\omega_c T_d) \tag{3}$$

クロック周波数近傍の雑音電力密度は、

$$\begin{aligned}
 G_{\text{noise}} [\text{mW/Hz}] \approx & \frac{5}{8} \frac{A_{\text{Tx}}^2 A_{\text{Rx}}^2 T_d^2}{T_s} \text{sinc}^2\left(\frac{\omega_{\text{clock}} T_d}{2}\right) \cos^2(\omega_c T_d) \\
 & + \frac{5}{\pi^2} \frac{A_{\text{Tx}}^2 T_d^2}{T_s} \cos^2(\omega_c T_d) \tag{4}
 \end{aligned}$$

と定式化できる。ここで、 A_{Tx} は送信信号振幅係数、 A_{Rx} はバックスキャッタ信号振幅係数、 T_s はシンボル時間、 T_d は遅延時間である。 $T_s = 100 \text{ ns}$ 、 $f_{\text{clock}} = 26 \text{ MHz}$ としたときの信号電力、雑音電力密度の計算値とシミュレーション値の比較をそれぞれ図5、6に示す。計算値とシミュレーション値は概ね一致しており、定式化は妥当だと考える。式(3)から信号電力は $T_d = T_s$ で0となり、遅延時間に対する信号電力低下はシンボル時間に依存する。また、雑音電力密度についてもシンボル時間で一般化できる。式(3)、(4)と熱雑音電力を用いて、受信SNRを計算した結果を図7に示す。今回は計算諸元としてAPアンテナ利得 $G_{\text{AP}} = 9 \text{ dBi}$ 、SNアンテナ利得 $G_{\text{SN}} = 0 \text{ dBi}$ 、APの送信電力 $P_{\text{AP}} = 20 \text{ dBm}$ 、IEEE802.11bのチャンネル1を想定して波長 $\lambda \approx 0.124 \text{ m}$ 、 $T_s = \frac{1}{11} \mu\text{s}$ 、周波数分解能 $\text{RBW} = 1 \text{ kHz}$ とした。この条件でSNRが20dB以上となる通信距離は約13m以下であり、通信距離はシンボル時間に依存している。この結果から、通信

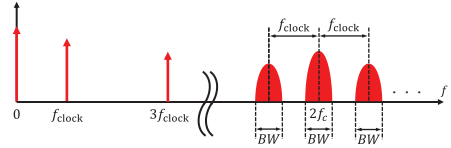


図2 式(1)の周波数スペクトルイメージ

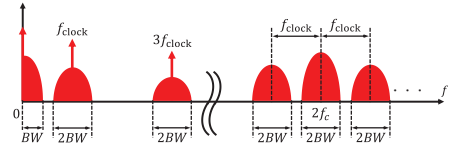


図3 式(2)の周波数スペクトルイメージ

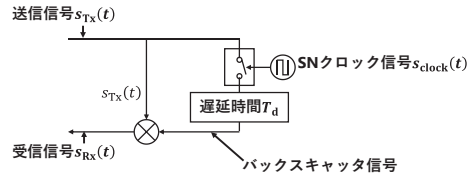


図4 バックスキャッタ信号の遅延時間を考慮した定式化方法

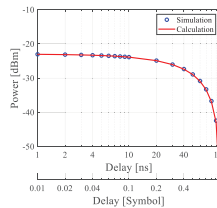


図5 信号電力

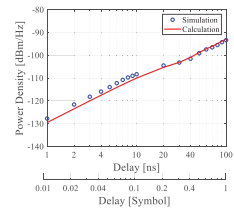


図6 雑音電力密度

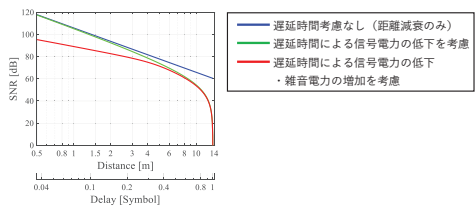


図7 受信SNR

距離延伸のためにはシンボル時間を長くする必要があとと考える。

4. まとめ

無線IoT SN検出用Wi-Fiバックスキャッタ受信機の受信信号を簡易式により定式化し、クロック基本波線スペクトルが得られる原理、フロアノイズ発生メカニズムを解明した。また、バックスキャッタ信号の遅延時間を考慮した受信SNRを計算し、通信距離のシンボル時間依存性を定量的に明らかにした。

文献

1) 末松ほか, 信学論, vol. J105-C, no. 1, pp. 2-10, Jan. 2022.

修士学位論文要約（令和5年3月）

中赤外分光による皮膚ガス計測に関する研究

布施 堯之

指導教員：松浦 祐司， 研究指導教員：松浦 祐司

Skin gas measurement based on mid-infrared spectroscopy

Takayuki FUSE

Supervisor: Yuji MATSUURA

We attempted to detect gases emitted from skin containing volatile metabolites using infrared spectroscopy. We constructed a mid-infrared spectroscopy system in which a cavity that serves as a gas cell is placed on the upper surface of an attenuated-total-reflection prism, and measured the absorption characteristics of the skin gas accumulated in the cell by sealing it with an object to be measured, such as a fingertip. Heating the gas cell after the measurement enables the removal of residual moisture, which shortens the measurement time to about 5 minutes. Using this system, skin gases were measured on the palms, and absorption peaks were detected that were thought to be caused by ammonia. Multiple regression analysis using the absorption spectra of the components emitted from ammonia solution showed good agreement with the obtained skin gas spectra, suggesting that ammonia in skin gas can be detected by this method.

1. はじめに

身体表面から放散される揮発性の無機および有機化合物である皮膚ガスは、血中成分を反映するとされており¹⁾早期の疾病診断への応用が期待される。また、非侵襲な代謝モニタリングへの適用も可能とされ、さまざまな検出・観察方法が提案されている。本報告では、多種の皮膚ガスを同時かつ短時間で検出可能な測定法として赤外赤外減衰全反射分光 (Attenuated Total Reflection: ATR) 法に着目し皮膚ガス測定及び皮膚ガス成分の検出を試みた。

2. 実験の概要

測定系の構成を図1に示す。フーリエ赤外分光光度計 (FT-IR) から取り出した赤外光を ZnS 台形プリズム (長さ 24 mm, 幅 2.3 mm) に入射し、その出射光を HgCdTe 検出器で受光した。図1に示すように、プリズム上面にフレームを取付け、その開口部にサンプルを配置して封止し、サンプル表面から放出されるガスを空間部 (深さ 3 mm) に閉じ込めて、プリズム上面に染み出るエバネッセント光の吸収として検出する。

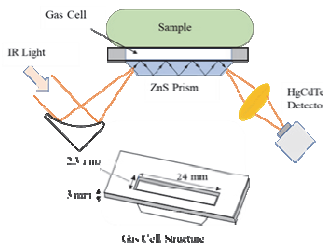


Fig.1 Structure of measurement setup

通常、エバネッセント光は染み出し深さが数 μm であり気体を測定することは難しい。そこでガスセル内に皮膚ガスを溜め込み、成分をプリズム表面に結露や凝縮させることでエバネッセント光の吸収を強くし感度向上を図った。本測定系を用いた測定の流れを以下に示す。

- ① 乾燥窒素ガスの吹き付けと綿棒を用いたプリズム上面の残留物の除去。
- ② バックグラウンドとしてガスセル上にサンプルを配置せず、空気のみ測定。
- ③ 再度プリズム残留物の除去。
- ④ 5 分間体の一部を密着させ、ガスセル内部に皮膚ガスを溜める。
- ⑤ 密着させたままの状態サンプル測定を行う。

バックグラウンド測定とサンプル測定はどちらも分解能 1 cm^{-1} 、積分回数は 64 回とした。皮膚をガスセルに密着させ測定をすることで、複数の特徴的なピークを持つ吸収スペクトルを得ることができ²⁾、成分を参照すると水、二酸化炭素、および水蒸気を持つ吸収スペクトルと類似した³⁾。図2に上記3つの成分の影響が小さい $1500 - 1000 \text{ cm}^{-1}$ の範囲の皮膚ガスと水蒸気の吸収スペクトルを示す。皮膚ガスと水蒸気を比較すると $1500 - 1250 \text{ cm}^{-1}$ にかけて類似した鋭いピークが確認でき、皮膚ガスのこの範囲に表れているピークは水蒸気に起因するピークだと考えられる。一方で 1270 cm^{-1} 、 $1150 - 1050 \text{ cm}^{-1}$ 付近には水蒸気以外のピークを確認できる。この結果から皮膚ガスの大部分を占める水蒸気の他にも成分を検出できる可能性を示した。

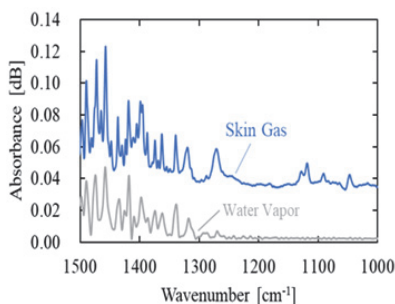


Fig.2 ATR spectra of skin gas and water vapor

3. 測定系の改良

本測定系では連続した測定を行う上での課題が見つかった。皮膚ガス測定後 N_2 ガスではガスセル上の残留物を完全に除去できず、次のバックグラウンド測定に影響を及ぼし正確な測定ができなかった。測定系を30分程度放置すること残留物による吸収ピークを抑えることが可能であったが、短時間で測定ができるという長所が失われてしまうため改良を行った。調査を進め、残留物の原因は水蒸気がプリズム表面で結露していることだと予想したため、ガスセルの加熱による残留物の除去を試みた。ガスセルを $40^\circ C$ に加熱し、再度室温に戻すことで残留物の除去が可能であることを確認し、これにより再測定に必要な時間が5分程度に短縮することが可能となった。

4. 皮膚ガス内アンモニアについての検討

次に皮膚ガスの一種であり、疲労やストレスのバイオマーカーとなる可能性が示唆されているアンモニアの検出を試みた。測定対象となる体の部位は測定が容易な体の部位の手首や指と比較して手掌からの放散量が多いことから、測定部位は手掌とした^{4,5)}。図3に手掌をガスセルに5分間密着させた後に測定した皮膚ガスの吸収スペクトルを水蒸気(濃度7%)のそれと比較して示す。皮膚ガスの吸収スペクトルには水蒸気の吸収に一致する複数のピークが確認できるが、 $1300 - 1200\text{ cm}^{-1}$ 付近には水蒸気以外の成分に起因すると思われる緩やかなピークが現れている。そこで濃度0.1%の水溶液を揮発させることによりアンモニアガスを発生させ、その吸収スペクトルを測定し、手掌スペクトルと比較をした。その結果、図3に示すように手掌の皮膚ガス吸収スペクトルに現れる緩やかなピークにほぼ一致する吸収ピークが確認された。更にこの領域において水蒸気のみ単回帰分析と、水蒸気とアンモニア水による重回帰分析を行った。その結果、測定された皮膚ガススペクトルに対する相関係数は、水蒸気のみによる単回帰では

0.88、アンモニア水と水蒸気による重回帰では0.94となった。アンモニアの影響を考慮することで回帰分析の結果相関係数が向上したことから、皮膚より滲出するアンモニア成分検出の可能性が示された。

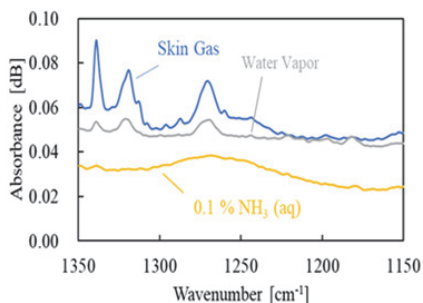


Fig.3 Comparison of ATR spectra of skin gas, water vapor, and vapor of 0.1% ammonia solution

5. まとめ

短時間で測定可能なATR法を用いて、早期の疾病診断への応用が期待される皮膚ガスの測定を試みた。ATR法で用いるプリズム上にガスセルを設置し皮膚ガスの測定を行うことで、水蒸気や水とは異なる吸収ピークが確認された。プリズムに残留物が発生し測定間隔が30分程度必要とされたが、ガスセルを加熱することにより残留物の除去が可能となり、測定間隔が5分程度に短縮された。手掌から得た皮膚ガススペクトルとアンモニア水を気化させた気体間に似たような吸収ピークが確認できたため重回帰分析を行った。水蒸気のみ単回帰分析に比べアンモニア水を追加した重回帰分析では相関係数が0.88から0.94と大きくなったことから、皮膚ガス内アンモニア検出の可能性が示唆された。

文献

- 1) K. Mitsubayashi, K. Toma, K. Iitani, T. Arakawa, *Sens. Actuators B: Chem.* 367, 132053 (2022).
- 2) I. K. Ilev, R. W. Waynant, in *Mid-Infrared Semiconductor Optoelectronics*, 118, 615, Springer: London (2006).
- 3) National Institute of Standards and Technology, <https://webbook.nist.gov/chemistry/>, (2023/1/25 閲覧).
- 4) S. Furukawa, Y. Sekine, K. Kimura, K. Umezawa, S. Asai, H. Miyachi, *J. Chromatogr. B*, 1053, 60 (2017).
- 5) F M Schmidt, O Vaitinen, M Metsälä, M Lehto, C Forsblom, P-H Groop and L Halonen, *J. Breath Research*, 7, Number 1(2013).

修士学位論文要約（令和5年3月）

量子カスケードレーザを用いた中赤外光音響分光法による血中成分分析

前野 雅信

指導教員：松浦 祐司

Analysis of blood components by mid-infrared photoacoustic spectroscopy using a quantum cascade laser

Masanobu MAENO

Supervisor: Yuji MATSUURA

Photoacoustic spectroscopy (PAS) using mid-infrared light is expected to be a non-invasive method for tissue analysis. In this study, we fabricated and evaluated a compact PAS system for blood component analysis. The system is composed of a quantum cascade laser as a light source and a highly sensitive photoacoustic cell with very small cell volume. Using this system, we measured the skin on the wrist and succeeded in obtaining stable spectra with absorption peaks attributable to various biological components. Then we attempted to estimate blood glucose levels by measuring spectra associated with blood glucose levels obtained by blood sampling and performing multivariate analysis. The results showed that the blood glucose level was successfully determined as high or low as 130 mg/dl with a correct response rate of higher than 70%.

1. はじめに

近年、生活習慣病患者の増加が世界的に問題となっている。中でも、糖尿病患者の世界的増加は著しくなっている¹⁾。糖尿病に対して治療法は確立されておらず、日常的な血糖値モニタリングが必要とされている。しかし、現状で主流となっている測定方法は、指先に針を刺し採血を行う侵襲的測定であるため、身体的苦痛や感染症のリスクといった問題がある。そこで、生体に対して非侵襲である血糖値測定システムの開発が求められている。

血糖値の非侵襲測定の手法の一つとして、中赤外領域の光を用いた光学的手法が挙げられる。中赤外領域である波長 3 - 12 μm 付近には、生体組織を構成する様々な分子の強いピークを持つ指紋領域がある。これまで我々の研究グループでは、この中赤外領域の光と、減衰全反射 (Attenuated Total Reflection: ATR) 法を組み合わせることで、非侵襲血糖測定システムの確立を試みてきた。先行研究では口唇粘膜を対象に測定を行い、間質液中に染み出したグルコースの検出に成功している²⁾。しかし測定深さが数 μm 程度に限られることから、生体組織の計測においては測定部位が口唇粘膜など角質のない部位に限られるという制限がある。

そこで本研究では、従来の ATR 法よりも深部の測定が可能である光音響分光法 (Photoacoustic Spectroscopy: PAS) を用いた生体組織成分の分析手法を検討した。

2. 原理

PAS は、光を吸収した試料が発生する熱を音響的な方法を用いて検出する手法であり、パルス変調された光の照射による試料の周期的な温度変化や圧力変化をマイクロフォンを用いて音として検出する。パルス光照射による音響波発生の過程は、①照射光が試料に吸収される、②吸収された光パワーが熱エネルギーに変換される、③試料に熱膨張が生じる。④照射光が途絶えると熱的緩和によって試料は元の状態に戻る、というサイクルによる。熱膨張と熱緩和が繰り返され、変調光と同じ周波数の音響波が発生する。

光源には、波長 8.3 - 10.8 μm の範囲で波長可変な外部共振器型量子カスケードレーザを用いた。光源から出た光がチョッパーによって変調され、ビームエキスパンダによってビームを拡大し、軸外し放物面鏡によって集光させた光を試料の真下から照射する。試料から発生した音響波をマイクロフォンによって検知し、ロックインアンプによって増大させた信号を検出した。

なお、音響波を効率よく集めるために用いた光音響セルを図 1 に示す。音響セルには直径 2 mm、高さ 2 mm の円筒状のチャンバーが形成されており、その底を ZnSe 窓によって封止し、試料を上面開口部に密着させることで、チャンバーが密閉される。チャンバーとマイクロフォンは内径 1 mm の中空音響伝送路によって接続されている。セルの作製にあたり、検出感度向上のためチャンバー容積を小さく、損失を抑えるために伝送路を短く設計している。

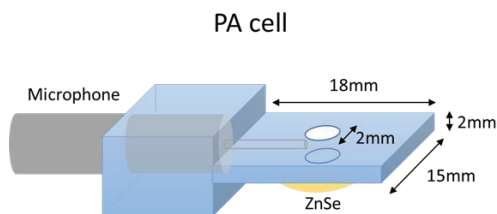


図1 光音響セルの構造

3. 本測定におけるスペクトル測定

本測定系で測定される PAS スペクトルが、ATR 法で測定出来る赤外吸収スペクトルと同様の特徴を有するかどうかを確認するため、血糖値の主成分であるグルコース水溶液の測定を行った。サンプルには、5%グルコース水溶液をゼラチンによって固めたグルコースゲルを用いており、リファレンスには、グルコースを加えていないものを用いている。図2にPASスペクトルをATRスペクトルと比較して示す。両者のスペクトルの形状は概ね一致していることから、PASスペクトルは吸収スペクトルを線形的に反映することを確認した。

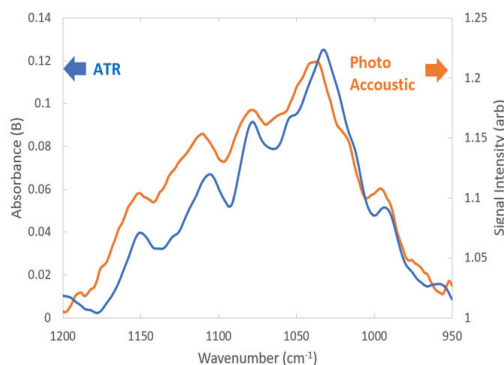


図2 グルコースのPASおよびATRスペクトル

4. データ解析による血中成分分析

血中成分分析をするために、血糖値の変動に合わせた生体測定を試みた。生体測定には、実際に糖尿病テストで用いられている経口ブドウ糖負荷試験にもとづき実験を行った。測定手順としては、穿刺装置によって指腹部から採血し、自己血糖値測定を行ったのち、PAS分光法によって手首の測定を行うという1セットを5分間隔で2時間の測定を行った。

測定データの解析には、分散度が最大となるように閾値を求める判別分析を用いた。今回のデータでは、説明変数が波数であり、目的変数は血糖値となる。血糖値が130 mg/dl未満で取れたデータを血糖値「低」、130 mg/dl以上の時を血糖値「高」とした。また、特徴量の抽出として変数増減法による変数選択を行った。

6日間の手首を対象とした測定で得られた114点のPASスペクトルデータに対して判別分析を行った結果を図3に示しており、解析後の判別得点が0よりも高ければ血糖値「高」、0未満であれば血糖値「低」として判断されている。判別の中率としては70.8%という結果が得られ、最終的に判別に重要として選択された波数は、1048 cm⁻¹、1032 cm⁻¹、1022 cm⁻¹、1072 cm⁻¹の4つとなった。

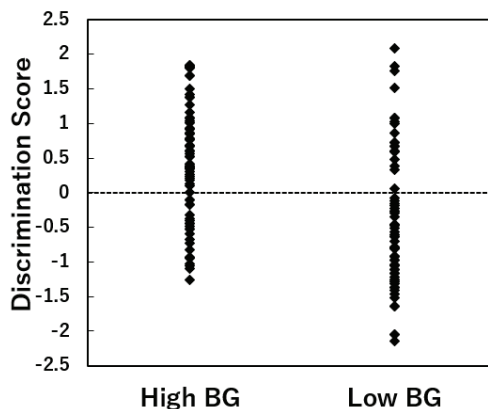


図3 判別得点結果

選択された波数の中でも1048 cm⁻¹と1032 cm⁻¹が比較的影響度が高いことがわかった。1048 cm⁻¹付近では、1050 cm⁻¹にはインスリン、1052 cm⁻¹にはアルブミン、1055 cm⁻¹には脂質やコレステロール、グルコースのC-O伸縮といった成分が挙げられるが、ここでは、血糖値の上昇に合わせて増加するインスリンや脂質が有力ではないかと考えられる。1032 cm⁻¹付近では、1030 cm⁻¹にグルコースのC-OH伸縮、1032 cm⁻¹にO-CH₃やメキシ基、フェニルアラニンのC-H伸縮が挙げられ、糖の上昇に合わせてグルコースの成分が増加しているのではないかと考えられる。

5. まとめ

本研究では、手首の皮膚を対象として生体測定を行い、データ解析によって血糖値の高低に対して判別を行った結果、血糖値の高低に対しては判別可能であることが確認でき、影響を与えている変数の選択にも成功した。また、選択された波数から血糖値変動に対して影響を与える成分の推定も行った。

文献

- 1) L. Kopin, C. J. Lowenstein, "Dyslipidemia,," Ann. Intern. Med, 167, ITC81-ITC96 (2017).
- 2) K. Yoshioka, T. Koyama, S. Kino and Y. Matsuura: "Non-Invasive Blood Glucose Measurement Using Quantum Cascade Lasers", J. Japan Society for Laser Surgery and Medicine, Vol.39, No.2, pp.105-110 (2018).

修士学位論文要約（令和5年3月）

基地局機能分離下でのクラスタを考慮した周波数割当に関する研究

眞尾 幸佑

指導教員：西山 大樹

A Study on Frequency Allocation Considering Clusters
in Radio Access Network Disaggregation

Kosuke MASHIO

Supervisor: Hiroki NISHIYAMA

In the fifth generation of mobile communication system (5G), much attention has been focused on virtualization and split of base station function. In this study, we investigate the deployment of a temporary wireless access network by deploying vehicles equipped with virtualized and split base stations in areas where disaster disrupted existing wireless communications. Also, users will be clustered by directional antennas and frequency reuse will be used to improve the communication rate. The problem is that when an appropriate frequency allocation is not performed according to the communication condition, some users will have significantly low communication rates. Therefore, this research aims to improve the minimum rate of users, and we propose two allocation methods based on the information obtained under the information constraint due to the base station function split.

1. はじめに

第5世代移動通信システム(5G)において基地局機能を仮想化・分離することに注目が集まっている。本研究では災害時の通信途絶地域に仮想化・分離された基地局を搭載した車両を配備することで、臨時の無線アクセスネットワークを展開することを検討する。その際、基地局機能の分離により、瞬時に値が変動する情報を伝送することが困難となる。また、指向性アンテナによりユーザをクラスタ分けし、周波数の再利用を行うことで通信レートの向上を図る。本研究における課題は、ユーザの通信状況に応じた適切な周波数割当をしなければ、通信レートが著しく小さいユーザが生じることである。そのため、本研究ではユーザの最小レートを向上することが目的であり、基地局機能分離による情報制限下で得られる情報に基づいた割当手法を提案し、ユーザの最小レートの向上を実現する。

2. 基地局機能分下でのクラスタを考慮した無線通信の技術要素及び課題

本研究では災害で一部通信機能が損失した地域に対し、車両型基地局を配備し、生存制御部と連携することで、被災地域のユーザを收容するシナリオを検討する。図1に想定システムモデルを示す。

本研究で注目する基地局機能は5Gにおいて再定義された機能である Centralized Unit(CU)・Distributed Unit(DU)・Radio Unit(RU)である。制御部である CU・DUを仮想化し、別の場所に配置することで、柔軟なネ

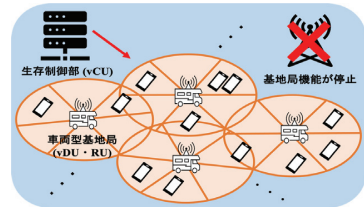


図1 想定システムモデル

ットワークを構築することに注目が集まっており、本研究では車両型基地局に搭載された仮想化された DU である virtualized Distributed Unit (vDU)及び RU と、生存制御部に搭載された仮想化された CU である virtualized Centralized Unit (vCU)で構築される臨時的無線アクセスネットワークを想定する。

また、車両型基地局には複数の指向性アンテナが存在し、これによりユーザを6つにクラスタ分けする。隣接しないクラスタ間では干渉が生じないと仮定し、同一の周波数を用いる。Orthogonal Frequency Division Multiple Access(OFDMA)による下りリンク通信の周波数割当を想定し、その際、vCU が各クラスタへの周波数割当を決定し、それを基に vDU が各クラスタ内でユーザへの詳細な割当を決定する。vCU-vDU 間は無線通信により情報を伝送しており、vDU で得られる情報の内、チャンネル状態のような瞬時に値が変動する情報を vCU は得られないため、vCU からユーザへの直接割当ではなく、2段階の割当構造になっている。また、本研究では同一周波数のリソースブロックをまとめてサ

ブチャンネルと呼称し、vCU から各クラスタへのサブチャンネル割当について検討する。

上記想定環境において、ユーザの通信状況に応じた適切なサブチャンネル割当を行わなければ、通信レートが著しく小さいユーザが生じる可能性がある。一例として、各クラスタにサブチャンネルを等分割当するケースを考える。この際、各クラスタの人数や、ユーザのチャンネル状態に関係なく、一定数のサブチャンネルがクラスタに与えられるため、ユーザの多いクラスタやチャンネル状態の悪いユーザが多いクラスタに属するユーザは通信レートが小さくなると考えられる。

以上の議論を踏まえ、本研究では上記の問題を定式化する。ユーザの最小レートを目的関数として定め、目的関数を最大化するために、vCU は各クラスタへ割当するサブチャンネル数を制御する。しかし、前述の通り、vCU ではチャンネル状態を得られないため、この問題の最適解を式から直接導出することは不可能である。そこで、vCU で得られる情報に基づいたヒューリスティックな割当手法を2つ提案する。

3. サブチャンネル割当方式の提案

本研究で注目した vCU で得られる情報はクラスタ毎の人数比と各ユーザの位置情報である。それぞれの情報を基に2つの割当手法を提案する。

クラスタ毎の人数比からサブチャンネル割当を行う人数比分割方式について説明する。1台の基地局が収容する6個のクラスタの内、隣接しない3個のクラスタでは同一のサブチャンネルを用いる。この3個のクラスタの中で、最も人数の多いクラスタを1個選択する。全基地局数をN台とすると、合計で2N個のクラスタが選択される。この2N個のクラスタの人数比で全サブチャンネルを割り、2N個のクラスタへサブチャンネルを割当する。最後に、選択しなかったクラスタに対する割当を2N個のクラスタの内、対応するクラスタに対する割当と同一にする。

各ユーザの位置情報からサブチャンネル割当を行う擬似レート方式について説明する。本方式ではユーザの位置情報からパスロスみのチャンネル状態を推定し、それを基にvCU上で求めた通信レートを擬似レートと呼称する。初めに仮の割当として各クラスタにサブチャンネルを等分割当し、各クラスタ内で収容するユーザに、各クラスタ内における最小レートを最大となるようにサブチャンネルを割当する。これにより、全ユーザが擬似レートを持つこととなる。その後、同一サブチャンネルを用いる3個のクラスタの内、擬似レートが最小のユーザがいるクラスタを選択する。全基地局数をN台とすると、合計で2N個のクラスタが選択される。この2N個のクラスタに属するユーザの中で、最大擬似レートを持つユーザのサブチャンネル1個を、最小擬似レートを持つユーザに付与する。最小擬似レートが一定値に収束するまで付与の工程を

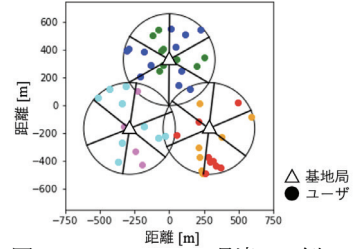


図2 シミュレーション環境の一例

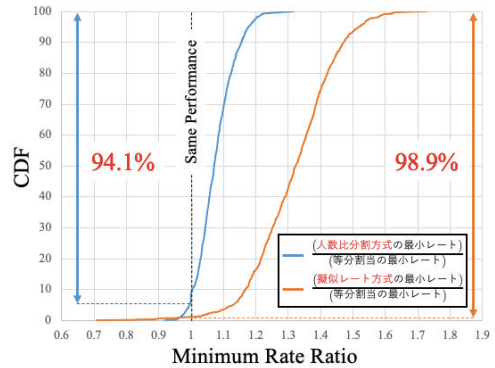


図3 各提案手法と等分割当の最小レートの比較

繰り返す。そして、収束までの内、最小擬似レートが最大となった際の各クラスタのサブチャンネル割当を2N個のクラスタに対する割当とする。最後に、選択しなかったクラスタに対する割当を2N個のクラスタの内、対応するクラスタに対する割当と同一にする。

4. シミュレーションによる性能評価

図2にシミュレーション環境の一例を示す。等距離に基地局を3台配置し、ランダムな分布でユーザを50人配置し、クラスタの向きをランダムに変更し、1000回各手法でサブチャンネル割当を行う。2つの提案手法の最小レートを等分割当における最小レートで正規化し、累積分布関数(CDF: Cumulative Distribution Function)を用いてプロットしたものが図3である。人数比分割方式は94.1%、擬似レート方式は98.9%のケースで等分割当よりも最小レートを向上させることから、各提案手法の有効性が確認できる。

5. まとめ

本研究では基地局機能分離による情報制限下において、クラスタを考慮した周波数割当方式を提案した。本研究は、最小レートを向上させる技術を確認し、災害時の臨時通信システムの性能向上に寄与したと言える。本研究はJSPS 科研費JP20K11785の助成を受けたものである。

文献

1) B. Balasubramanian *et al.*, "RIC: A RAN Intelligent Controller Platform for AI-Enabled Cellular Networks," *IEEE Internet Computing*, vol. 25, pp.7-17, Apr. 2021

修士学位論文要約（令和5年3月）

基地局機能分離環境における端末収容と帯域割当に関する研究

松澤 和泉

指導教員：西山 大樹

A Study on User Equipment Accommodation and Bandwidth Allocation in Environments with Radio Access Network Disaggregation

Izumi MATSUZAWA

Supervisor: Hiroki NISIYAMA

In recent years, the demand for wireless communications has increased dramatically with the launch of 5G services. Next-generation communication systems must be able to cope with exploding communication demands and form flexible networks. Therefore, efforts are underway to divide conventional base station functions and to virtualize base station functions using general-purpose hardware. This study focuses on a scenario in which a vehicle base station is used in a disaster environment in a next-generation communication system. In the event of a disaster, all UEs are required to receive communication services, and it is important to ensure fairness in communication. Therefore, we propose a control method that achieves high fairness in consideration of information restrictions during a disaster and evaluates the effectiveness of the proposed method through simulations.

1. はじめに

近年、IoT(Internet of Things)の普及や5Gのサービス開始等により、無線通信への需要は非常に高まっている。急激に増加する通信端末や基地局設備を効率的に運用するため、従来の基地局機能を遅延や制御規模に合わせて新しく分割し、また汎用ハードウェアを用いて基地局機能を仮想化する取り組みが進められている¹⁾。

本研究では、こうした基地局機能の分割や仮想化がなされた次世代通信システムにおいて、災害によって通信設備が損壊し通信インフラから孤立したエリアが発生した環境を想定する。発災時において情報通信は重要であり、迅速な復旧対応が求められる。次世代通信システムでは、先述の仮想化された基地局機能を車両やドローンに搭載することで臨時のカバレッジを展開することが考えられる。本研究では、車両を基地局として利用するシナリオに注目し、下りリンク通信を行う際に発生する課題を解決する制御手法の提案と評価を行う。

2. 想定通信システムモデル及び研究課題

図1に本研究にて想定する災害時の通信システムモデルを示す。生存制御部は、各車両基地局(BS: Base Station)が使用する周波数帯域と各端末(UE: User Equipment)の接続するBSを決定し、無線バックホール技術を利用して制御情報を各BSに伝達する。各BSは取得した制御情報を基に各UEに対してスケジューリングを行い、データの送信を行う。このと

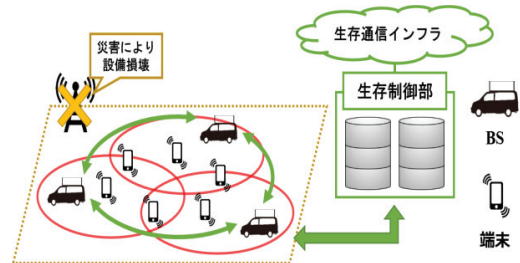


図 1: 想定システムモデル

き、無線アクセス方式は直交周波数多元接続方式を利用する。

想定システムにおいて、各BSの境界エリアに存在するUEが達成する通信性能に注目する。境界上に存在するUEの接続先は、一般的には接続可能なBSの信号強度を比較し最も高いBSと接続する。しかし、複数のUEが1つのBS周辺に偏って位置していた場合、上述の方法では使用可能な無線資源を偏って利用することとなり、通信性能が低下することが考えられる。また、災害時は通信設備が損壊しているため光ファイバを用いたバックホール伝送ができないことが想定される。そのため、バックホール通信に無線を使用する必要があり、平常時と比較して遅延の影響が大きくなり制御に必要な情報が取得できないことが考えられる。したがって本研究では情報制限を考慮した上で高い通信性能を達成する端末収容・周波数帯域割当手法を提案する。

3. 提案端末収容・周波数帯域割当手法

災害時の通信では、より多くのUEに対して通信サービスを提供することが求められる。そのため、平常時と比較し通信における公平性の確保が重要となり、本研究ではスループットの最小値を最大化する端末収容・周波数帯域割当手法を提案することで公平な通信の実現を目指す。

想定するシステムにおいて、あるBSがあるUEに対してデータを送信する際に達成される信号対雑音電力比(SNR: Signal to Noise power Ratio)を導出した。このSNRを用いて、シャノンの式により各UEで達成されるスループットを導出し、想定システムの数理モデル化を行った。

本研究で解決すべき最小スループットを最大化する最適化問題は、システムにて発生する情報制限等の観点から直接解を求めることが困難である。そこで達成可能なスループットの概算値を利用し解析を行い、解析結果から各BSでの収容数を均一化する端末収容方法とBSとUE間の距離による性能の劣化を補正する周波数帯域割当手法を提案した。

4. シミュレーションによる性能評価

シミュレーション環境を図2に示す。各BSを配置し、各BS間に境界エリアを設けた。UEは各境界エリアにランダムに配置し、UE配置を変化させ制御手法を実行した。このとき、提案手法(Proposed)に加えて、距離が最小のBSに収容する方法とシステムで使用可能な周波数帯域を等分に割り当てる方法を用いたベンチマーク手法(Benchmark)を実行した。さらに、提案手法のうち、端末収容方法と周波数帯域割当方法をそれぞれ片方のみ用いる手法を実行した。端末収容方法のみを利用する場合(Only-Connection)は、周波数帯域は等分割当を行う。周波数帯域割当手法のみを実行する場合(Only-BW)は、UEは距離が最小のBSと接続する。

10万通りのUE配置について先述の制御手法を実行し、各UEで達成されたスループットを記録した。そのうち、目的関数である最小値について注目し、各UE配置において達成されたスループットを累積分布関数(CDF: Cumulative Distribution Function)を用いてプロットしたものを図3に示す。シミュレーション結果から、ベンチマーク手法では収容先の偏り固定された周波数帯域の影響により、UE配置によって最小スループットの性能劣化が確認される。対して、提案した端末収容方法、周波数帯域割当方法によって最小スループットが向上し、両方適用したProposedがもっとも高い性能を示し、想定環境における提案手法の有効性が確認された。

また、シミュレーションにて各UEで達成されたスループットを用いて、公平性の指標であるFairness

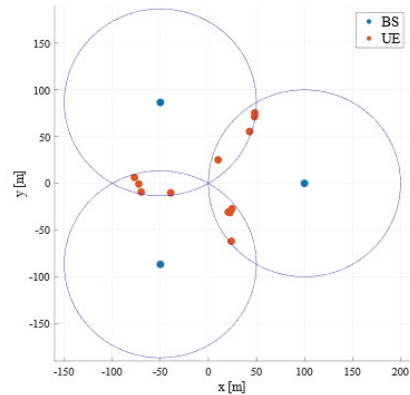


図2：シミュレーション環境

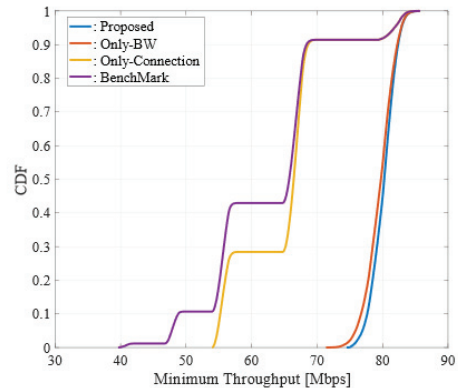


図3：最小スループットのCDF

Index²⁾を導出し比較したところ、提案手法が最も高い平均値を示し、また最大値と最小値の差が最も小さく提案手法によってどのようなUE配置でも公平な通信が実現できることが確認された。

5. おわりに

本研究では次世代通信システムにおいて災害が発生した環境にて、車両基地局を利用するシナリオに注目し、災害時の情報制限を考慮した上で高い公平性を実現する制御手法を提案した。性能評価の結果、最小スループットと公平性指標の値が向上することが確認された。本研究はJSPS科研費JP20K11785の助成を受けたものである。

文献

- 1) L. Bonati *et al.*, “Intelligence and Learning in O-RAN for Data-Driven NextG Cellular Networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 10, pp. 21-27, Oct. 2021.
- 2) R. Jain *et al.*, “A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared System,” Digital Equipment Corporation, Tech. Rep. DEC-TR-301, Sep. 1984.

修士学位論文要約（令和5年3月）

無線アクセスバックホール統合伝送における無線資源分割に関する研究

八島 拓也

指導教員：西山 大樹

A Study on Radio Resource Partitioning in Integrated Access and Backhaul

Takuya YASHIMA

Supervisor: Hiroki NISHIYAMA

Integrated access and backhaul (IAB), which is cost-effective and has the potential to allow the construction of more flexible networks because the use of the millimeter-wave technology can provide high-speed and high-capacity wireless backhaul and replace fiber backhaul with wireless backhaul. However, only a limited number of studies have analyzed radio resource efficiency of IAB by introducing radio resource partitioning ratio in IAB of 3GPP Release 17 resource multiplexing. Therefore, the purpose of this study is to derive radio resource partitioning ratio, to maximize radio resource efficiency and to analyze its characteristics taking into account the UEs' minimum rate guarantee and the signal-to-noise ratio (SNR) of each channel. Our results show that the ratio is dependent on the UEs' minimum rate guarantee and the SNR according to a certain rule.

1. はじめに

第5世代移動通信システムの高度化によって通信セルの小型化や通信基地局の高密度化が進んでいる。その結果として通信基地局とコアネットワークを結ぶ有線バックホール設置の費用増大という問題が生じている。これを解決するための技術としてIAB(Integrated Access and Backhaul)が考えられている。IABでは有線バックホールを無線バックホールに置き換えることで、有線バックホール設置の費用を低減することが可能であり、また、通信の中継器を柔軟に展開し、より強靱な通信ネットワークの構築を可能とする。

本研究では3GPP(Third Generation Partnership Project)のRelease 17で可能となったIABの新しい通信パターン¹⁾において、無線資源利用効率を最大化する無線資源分割比の導出と、その特性の解析を行うことを目的とする。

2. IABの無線資源分割に関する技術課題

IABにおいて集約基地局としての役割を果たすIAB donorと通信の中継器としての役割を果たすIAB node間の通信をバックホールリンクと呼称し、IAB nodeとUEs(User Equipments)間の通信をアクセスリンクと呼称している。IABではバックホールリンクとアクセスリンクで共通の無線資源を分割して使用することが可能である。ここで生じる技術課題として、無線資源の分割方法によって無線資源利用効率が変わることが考えられる。そこで、本研究ではFDD(Frequency Division Duplex)型全二重のIABとTDD(Time Division Duplex)型双方向の半二重の

IABにおいて無線資源分割比を導入し、UEsの最低保証レートと通信路のSNR(Signal-to-Noise Ratio)を考慮した上で無線資源利用効率を最大化する無線資源分割比の解析を行う。

3. FDD型全二重のIABの無線資源分割の最適化

FDD型全二重のIABの解析モデルを図1に示す。IAB donor 1台、IAB node 1台、IAB nodeが収容するUEsという構成を対象とする。周波数帯域幅分割比 α ($0 < \alpha < 1$)を導入し、与えられた周波数帯域幅 W を W_1 と W_2 に分割し図のように割り当てる。また、全ての通信は同時刻に行われる。ここで干渉の影響は無視している。次に、各通信路のSNRの大小関係の仮定をおき、各通信路の通信路容量をシャノン・ハートレーの定理から導く。その後、無線資源利用効率として周波数利用効率を導出する。そして、要求条件としてUEsに最低保証レートを想定し、これを満たすような範囲で周波数利用効率を最大化することを考える。

図2にアクセスリンクのアップリンクの最低保証レート G_{UL} と周波数利用効率を最大化する分割比 α_M の関係を黒い実線で示す。ここでアップリンクはUEs側からIAB donor側へ向かう通信を指している。また、図2からIAB nodeとUEs間のアクセスリンクのアップリンクのSNRである γ_{UL}^{AL} が小さくなるにつれて、 G_{UL} の変動による α_M の変動も大きくなることが読み取れる。

4. TDD型双方向の半二重のIABの無線資源分割の最適化

TDD型双方向の半二重のIABの解析モデルを

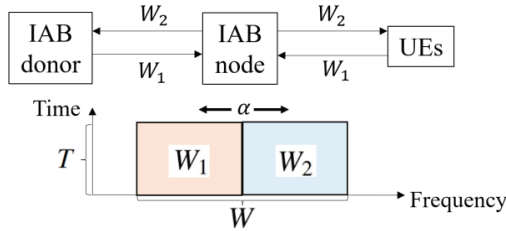


図1 FDD型全二重のIABの解析モデル

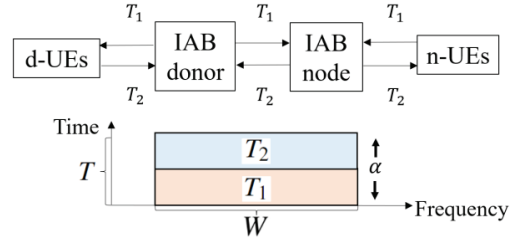


図3 TDD型双方向の半二重のIABの解析モデル

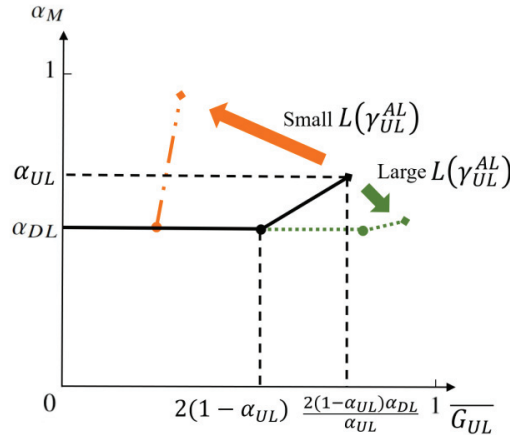


図2 FDD型全二重のIABにおけるアクセスリンクのアップリンクの最低保証レートと最適値 α_M の関係

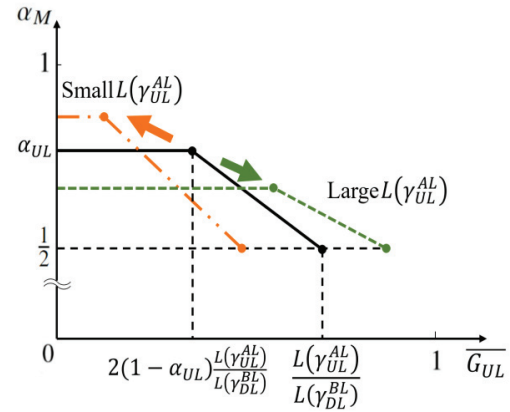


図4 TDD型双方向の半二重のIABにおけるアクセスリンクのアップリンクの最低保証レートと最適値 α_M の関係

図3に示す。IAB donor1台、IAB node1台、IAB donorが收容するd-UEs、IAB nodeが收容するn-UEsという構成を対象とする。時間分割比 α ($0 < \alpha < 1$)を導入し通信時間 T を T_1 と T_2 に分割し図のように割り当てる。また、全ての通信で同一周波数帯域幅を用いる。ここで干渉の影響は無視している。次に、各通信路のSNRの大小関係の仮定をおき、各通信路の通信路容量をシャノン・ハートレーの定理から導く。その後、無線資源利用効率として総和レートを導出する。そして、要求条件としてUEsに最低保証レートを想定し、これを満たすような範囲で総和レートを最大化することを考える。

図4にアクセスリンクのアップリンクの最低保証レート G_{UL} と総和レートを最大化する分割比 α_M の関係を黒い実線で示す。また、図4から γ_{UL}^{AL} が小さくなるにつれて、 G_{UL} の変動による α_M の変動も大きくなることが読み取れる。

5. まとめ

本研究では高度化する次世代通信の需要を満たす技術であるIABの無線資源分割に着目した。3GPP Release17において可能となったIABにお

いて無線資源分割比を導入し、無線資源利用効率を最大化する無線資源分割比の解析を行った。解析の結果としてFDD型全二重のIABとTDD型双方向の半二重のIABにおいて無線資源利用効率を最大化する無線資源分割比はUEsの最低保証レートやアクセスリンクのアップリンクのSNRに一定の法則で依存することが示された。以上より、本研究はIABの無線資源分割比と無線資源利用効率の関係を明かにし、IABシステム設計に寄与するものであると言える。本研究はJSPS科研費JP20K11785の助成を受けたものである。

文献

- 1) J. Kim, I. Kim, and H. Chung, "Resource multiplexing enhancements for integrated access and backhaul in 5G new radio release 17," ICTC, pp. 936–938, Oct. 2020.
- 2) T. Yashima and H. Nishiyama, "Analysis of optimal bandwidth partitioning ratio in full-duplex integrated access and backhaul," IEEE ICC Workshops, pp. 01–06, May 2022.

修士学位論文要約（令和5年3月）

外部磁場を用いた鎖状鉄ナノ粒子の合成

赤星 栄治

指導教員：齊藤 伸， 研究指導教員：小川 智之

Synthesis of chain-like iron nanoparticles using an external magnetic field

Eiji AKAHOSHI

Supervisor: Shin SAITO, Research Advisor: Tomoyuki OGAWA

The Fe nanoparticles synthesized under the influence of an external magnetic field were investigated and the formation of partially chain-like structures was confirmed. As the strength of the magnetic field was increased, the ratio of these chain-like Fe nanoparticles also increased. The shape of the particles became increasingly complex, and while shape control was not achieved, it is believed that the magnetic field played a role in promoting adsorption between particles. Further enhancement of the magnetic field is necessary to achieve unidirectional chain formation. As the heating time increased, an aggregation of particles was observed. This is believed to be a result of preferential aggregation of the chain-like Fe nanoparticles. No significant variations were observed when the starting phase was altered, indicating that the formation of chain-like Fe nanoparticles occurs after the particle growth process has been completed.

1. はじめに

近年、高度な情報化社会の進展に伴い、大容量の情報を瞬時にやり取りするための小型で低消費電力の通信端末やメモリデバイスが必要になっている。そのためには、高周波数帯で動作するアンテナが必要で、高共鳴周波数、高透磁率、低損失を持つ磁性材料が求められている。¹⁾透磁率と共鳴数波数はトレードオフの関係で、スヌーク則から高 Ms な材料ほど高透磁率と高共鳴数波数が期待される。Fe ナノ粒子は、電氣的に絶縁性を有し、低損失が期待され、高 Ms を有することで、高透磁率を有しながら、高共鳴周波数が期待されている。本研究では、Fe ナノ粒子の形状磁気異方性磁界を利用し、10GHz 以上の高周波数帯で磁性体を駆動することを目指している。具体的に反磁界を利用して高形状磁気異方性磁界を実現し、高共鳴周波数化を行う。反磁界は形状に依存し、アスペクト比2の鎖状鉄ナノ粒子を合成できれば 16.45 GHz の共鳴周波数を実現できると試算している。本研究では、球状鉄ナノ粒子を融合し鎖状化する方法と、粒子の異方的成長を利用した鎖状化の二つのアプローチでアスペクト比2以上の鎖状鉄ナノ粒子合成を目指している。

2. 実験方法

出発相とする球状鉄ナノ粒子は、酸素および水分濃度が 0.1 ppm 以下の Ar ガス雰囲気酸化に保たれるグローブボックスの中で、Fe(CO)5 と

Oleylamine の混合前駆体を Kerosene に混ぜて 190°C で熱分解することで合成した。合成後の溶液は不純物を取り除くため、アセトンで2回洗浄し、真空中で乾燥後、粉末で回収した。第3章で合成、観察する鎖状鉄ナノ粒子は、先ほど合成した鉄ナノ粒子をトリオクチルアミンに溶かし、260°C で磁場を印加しながら加熱することで合成した。洗浄回収は鉄ナノ粒子と同様の方法で行った。4章では、トリオクチルアミンに溶かす原料を Fe(CO)5 と Oleylamine の混合前駆体に変えて、260°C で磁場を印加しながら合成を行った。洗浄回収方法も先ほどと同様である。実験条件は主に加熱時間、印加磁界、合成中の溶液の攪拌の有無を変えながら行った。作製した鉄ナノ粒子の構造は X 線回折測定 (XRD)、透過電子顕微鏡 (TEM) を用いて評価した。粒子解析方法としては球状粒子と融合体の二つに大きく粒子を分類した。融合体は、二量体、湾曲型、直線型からなる鎖状粒子と複雑型の大きく二つに分類した。これらの形状比率を粒子占有面積から導出する。各条件 2000 以上の粒子から評価を行った。

3. 球状鉄ナノ粒子を出発相として外部磁場を用いた鎖状鉄ナノ粒子の合成と外部磁場が構造に与える影響

本章では、球状鉄ナノ粒子を融合することで鎖状鉄ナノ粒子を合成し、その磁場依存性や、溶液対流、反応時間との関係を調べた。磁場をかけない

状態でも、鎖状鉄ナノ粒子の合成は確認された。この結果から、界面活性剤の脱着反応と球状鉄ナノ粒子同士の吸着が起きていると考えられる。印加磁場を大きくしたときに鎖状鉄ナノ粒子比率と形状として複雑型が上昇していることが分かった。形状制御には至らないが、鎖状鉄ナノ粒子比率が増えた理由として、磁場によって溶液中の鉄ナノ粒子の濃度に偏りができたため、粒子同士の吸着が部分的に進んだからと考えられる。加熱時間が伸びることで鎖状粒子の比率が減少していることがわかった。これは加熱時間増大の影響で粒子が凝集した影響と考えられ、鎖状鉄ナノ粒子が球状鉄ナノ粒子より優先的に凝集すると考えられる。攪拌については鎖状鉄ナノ粒子比率の減少、複雑型の減少が確認された。これは攪拌による溶液の対流により粒子同士の吸着が妨害される方向に働いたと考えられる。

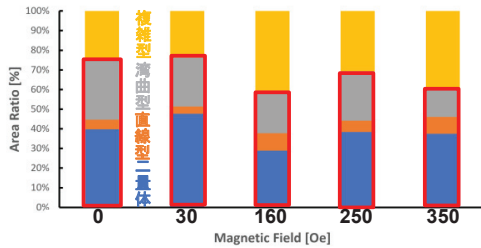


図1 融合Feナノ粒子の各形状における比率と印加磁場の関係

4. 混合前駆体を出発相として外部磁場を用いた鎖状鉄ナノ粒子の合成と外部磁場が構造に与える影響

印加磁場を大きくしたときに鎖状鉄ナノ粒子比率と、形状として複雑型が上昇していることが分かった。攪拌により、鎖状鉄ナノ粒子の比率が減少すること、複雑型が減少することが分かった。図2から粒子融合、粒子形状ともに、球状鉄ナノ粒子を出発相とした際と同様の結果が今回得られ、磁場の影響は粒子成長過程以降で受けていると考えられる。

磁場を大きくすることで複雑型が増えたのは、磁場が粒子を一方方向に配列させるまでの力を全体に働かせていないが、磁場の偏りによってFeナノ粒子の濃度に偏りを生み出し、濃度が濃い場所で粒子同士が融合しやすくなったと考えられる。また攪拌によって複雑型形状が減少していることから、溶液の対流は濃度の偏りを弱める方向に働くが、磁場がFeナノ粒子を一部一方方向配列させていた部分ではFeナノ粒子の一方方向への融合ができていたと考えられる。

また加熱時間増大により凝集化が起きることを確認した。前駆体出発においては粒成長の時間が必要で、

球状Feナノ粒子を出発相とした場合も粒子融合の時間が必要なことから適切な加熱時間の設定が必要であると考ええる。図3に示すように、加熱時間1時間で、粒成長過程初期における粒子融合に一部成功した。

今回の検証から、鎖状化比率向上のためには、粒子を一方方向配列させるより強い磁場、複雑型形状の発生や凝集をしないよう攪拌を行うこと、適切な加熱時間の設定が必要であると考ええる。

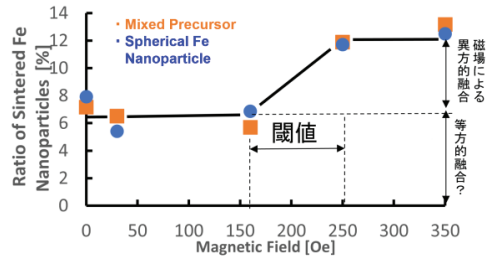


図2 融合粒子比率の磁場依存性

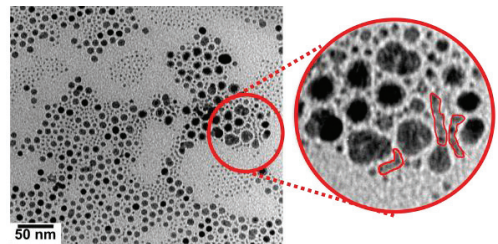


図3 粒成長過程初期における粒子の融合(加熱時間1時間)

5. まとめ

外部磁場下で合成した鉄ナノ粒子を観察し、鉄ナノ粒子の融合を確認した。また、磁場を大きくすることで鎖状鉄ナノ粒子の比率の向上が見られた。形状としては複雑型が増えており、形状制御には至らなかったが粒子同士の融合を進めたため、粒子は磁場の影響は受けていると考えられる。一方方向への鎖状化を達成するためには、高磁場勾配が必要で、さらなる磁場の強化が求められる。また加熱時間増大による粒子の凝集化と鎖状粒子比率の減少が見られた。これは鎖状鉄ナノ粒子を優先的に凝集するものと考えられる。出発相を変更したことによる結果の違いはなく、粒成長初期過程での粒子融合も確認できたが、今回の合成条件の範囲では粒成長後の磁場の影響が強かったと考えられる。

修士学位論文要約（令和 5 年 3 月）

次世代通信デバイスのモノリシック集積化に向けた SiC 上グラフェンの電波送受信機能に関する研究

石田 智也

指導教員：佐藤 茂雄， 研究指導教員：吹留 博一

Study on Radio Wave Transmitting and Receiving Functions of Graphene on SiC for Monolithic Integration of Next Generation Communication Devices

Tomoya ISHITA

Supervisor: Shigeo SATO, Research Advisor: Hirokazu FUKIDOME

I developed an antenna using graphene grown on SiC. The antenna consists of a coplanar waveguide (CPW) and antenna elements. The characteristic impedance Z_0 of the CPW was matched to the characteristic impedance of the measurement system ($Z_S = 50 \Omega$) to minimize return loss. The k-dependence of Z_0 was investigated and found to be $Z_0 = 50 \Omega$ when $k = 0.556$. The return loss (RL) and transmission power efficiency of this CPW from 300 kHz to 9 GHz showed that $RL < -37.3$ dB and transmission power efficiency = 99.97%. This means that a very low-loss CPW was fabricated. In addition, this is the first successful fabrication of the graphene antenna on SiC resonating at 40.7 GHz. S_{11} was found to be -15.51 dB. This means that the transmission power efficiency of 97.19%. The transmission power efficiency at the resonant frequency is 90% in the previous report. Our antenna is more efficient by 7%, compared to that in the previous report. This demonstrates the capability of the graphene antenna on SiC for communicating in millimeter-wave frequencies.

1. はじめに

グラフェンはバルクの銅を超える電気伝導度や優れたプラズモニック特性を有するため、Beyond 5G でのアンテナ応用が期待されている¹⁾。グラフェンの成膜法は数あるが、SiC の表面熱改質により得られるグラフェンは、デバイス作製時に転写を必要とせず、かつ、単結晶として成長する。また、Dash らはテラヘルツ帯で動作する同一形状のグラフェン・アンテナにおいて、Si 系基板の種類によって、共振周波数、反射損失が異なることを解析的に示しており、SiC 上グラフェンを用いたアンテナの優位性を報告している²⁾。しかし、実際に SiC 上グラフェンを用いたアンテナの作製例はない。そこで、SiC 上グラフェンを用いたアンテナのミリ波帯における電波放射を実証し、高効率なグラフェン・アンテナの創出を目的とした研究を行った。

2. コプレーナ導波路(CPW)における特性インピーダンス Z_0 の素子構造依存性

CPW の Z_0 は基板誘電率および給電線幅(W)と給電線-GND 線間のギャップ(G)により決定される素子構造因子 k に依存する。そのため、CPW の Z_0 を測定系の特性インピーダンス $Z_S = 50 \Omega$ と一致させるために、CPW における Z_0 の素子構造因子 k に対する依存性を調べた(図 1)。ここで、接触抵抗の低減および金属/グラフェン界面における密着性を向上するために、CPW

を Au/Ti/グラフェンで構成した。

図 1 より、 $k=0.556$ の時、 $Z_0=49.87$ (図 1 中の点線)となり、測定系に対する CPW のインピーダンス整合が取れることが明らかとなった。また、 Z_0 の実測値は SiC の基板誘電率を用いて算出した理論曲線よりも 1Ω 程度高くなった。これは、SiC 上グラフェンの存在により、CPW を構成する Au の結晶性が低下し、Au の抵抗が増加したためだと考えられる。

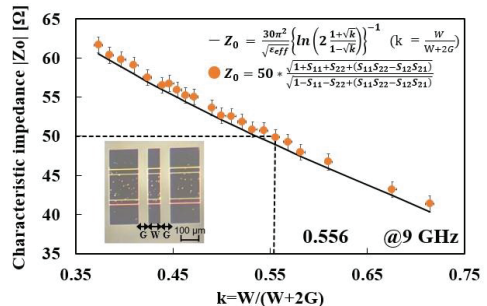


図 1 CPW における特性インピーダンス Z_0 の素子構造依存性

3. CPW の反射損失・挿入損失特性

図 2 および図 3 に、作製した CPW の反射損失 (RL) 特性と挿入損失 (IL) 特性を示す。300 kHz ~ 9 GHz の周波数範囲において、CPW の反射損失は

RL<-37.3 dBであった。9 GHzにおける伝送電力効率は99.97%であることから、反射がほぼ無い、低損失なCPWであることがわかった。またILは-0.14 dB以下だった。これは、入力信号に対して、出力信号が約2%しか減衰しないことを意味する。以上より、反射損失および挿入損失特性から、SiC上グラフェンを用いた低損失なCPWを作製できたことが明らかとなった。

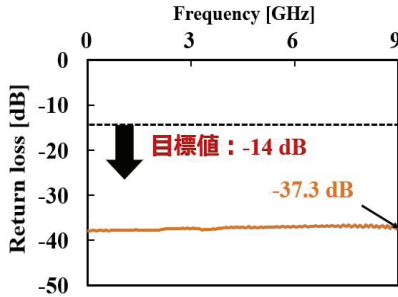


図2 CPWの反射損失特性

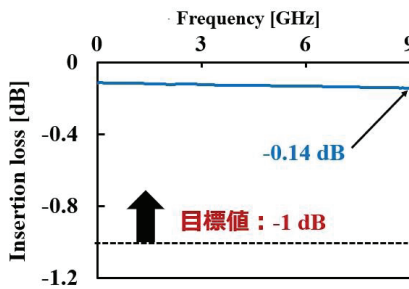


図3 CPWの挿入損失特性

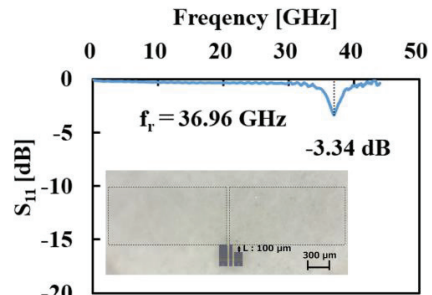
4. SiC上グラフェンを用いたアンテナの動作実証とアンテナ構造の最適化

前章までに作製したCPWを給電部に用い、アンテナエレメントをSiC上グラフェンで構成したグラフェン・アンテナを試作した。図3に、作製したグラフェン・アンテナにおける反射係数 S_{11} の測定結果を示す。GNDの上端とアンテナエレメントの下端との距離(L)が $100\ \mu\text{m}$ の時、 $36.96\ \text{GHz}$ にて S_{11} が最小となり、共振動作が確認された。共振動作時の S_{11} は $-3.34\ \text{dB}$ であり、伝送電力効率は 53.76% であった。以上より、SiC上グラフェンを用いたアンテナの共振動作を実証した。

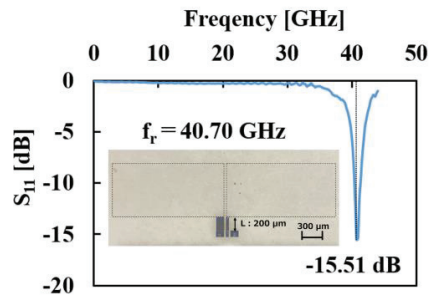
一方次にSiC上アンテナの高効率化を目指した。具体的には、 $L=200\ \mu\text{m}$ としたアンテナを試作した。その結果、共振周波数が $40.7\ \text{GHz}$ まで向上した。さらには、共振動作時の S_{11} は $-15.51\ \text{dB}$ となり、伝送電力効率 97.19% を達成した。よって、Lの長さの最適化により、伝送電力効率を 43.43% 向上させることに成功した。

Lの長さや伝送電力効率の関係を次のように考察

する。アンテナ動作時において、アンテナエレメントと接続されていないGNDの上端とアンテナエレメントの下端には、互いに逆方向の交流電流が流れる。その結果、GND側に発生する電磁界はアンテナエレメント側の電磁界に対して逆位相となる。よって、これらの電磁界は互いに打ち消し合う。GNDの上端とアンテナエレメントの下端との距離が短いほど、お互いの電磁界の位相差は小さくなり、打ち消しの度合いが強まる。ゆえに、伝送電力効率が悪化すると推察される。以上から、Lを長くすることで電磁界の打ち消しが低減され、伝送電力効率が向上したとされる。



(a) $L=100\ \mu\text{m}$



(b) $L=200\ \mu\text{m}$

図3 グラフェン・アンテナにおける S_{11}

5. まとめ

Z_0 が $50\ \Omega$ となるようにCPWの構造最適化を行うことで、SiC上グラフェンから成る低損失CPWを実現した。さらには、SiC上グラフェンを用いたBeyond 5G対応アンテナの共振動作を初めて実証した。アンテナ素子構造の最適化により、共振動作時の伝送電力効率として 97.19% を達成し、高効率グラフェン・アンテナを実現した。

文献

- 1) H. Hao, D. Hui, and D. Lau, Nanotechnol. Rev., **9**(2020)683.
- 2) S. Dash, and A. Patnaik, Physica E Low Dimens. Syst. Nanostruct., **126**(2021)114479.

修士学位論文要約（令和 5 年 3 月）

植物免疫制御に向けたプラズマ合成五酸化二窒素に対する 植物早期応答解明

岩本 拓仁

指導教員：金子 俊郎， 研究指導教員：佐々木 渉太

Investigation of Initial Responses in Plants Exposed to Plasma-Synthesized Dinitrogen Pentoxide

Hiroto IWAMOTO

Supervisor: Toshiro KANEKO, Research Advisor: Shota SASAKI

Dinitrogen pentoxide (N_2O_5) is a promising chemical, but it has not been used widely due to the difficulties of its production and storage. Our new air atmospheric pressure plasma (APP) device/method enables *in-situ* production and supply of N_2O_5 with easy handling. Here, we explored the applicability of the APP-generated N_2O_5 in agriculture. While ozone (O_3) exposure can reportedly induce systemic acquired resistance in the phytohormone salicylic acid pathway which generally causes growth retardation, we newly found that N_2O_5 exposure can induce plant defensin genes such as *PDF1.2* that follow a jasmonic acid (JA) pathway without growth retardation in *Arabidopsis thaliana*. As an early response, cytosolic Ca^{2+} concentration was increased in a single leaf directly exposed to N_2O_5 and the Ca^{2+} signal propagated to non-exposed leaves within 1 min. The Ca^{2+} response is similar to a wound-induced response, which elicits a systemic defense response by JA. We also found that expression of JA-related genes were significantly induced in both exposed and non-exposed leaves. These results indicate that the APP-generated N_2O_5 exposure provokes a systemic defense response without growth retardation.

1. はじめに

空気分子を多機能な活性酸素・窒素種 (RONS) にその場変換可能な非平衡大気圧プラズマ技術が注目されている。近年、我々は空気から五酸化二窒素 (N_2O_5) を高い選択比でプラズマ電気合成することに世界で初めて成功した [1]。 N_2O_5 は、よく使われる RONS であるオゾン (O_3) や一酸化窒素 (NO) と比較して、極めて高い水溶解性を示すとともに、ユニークな酸化・ニトロ化作用を有するため、幅広い応用が期待されている物質である。一方で、 N_2O_5 の熱分解性と吸湿性は長期保管を極めて困難にしており、工場での集中生産ではなく、現場でのその場合成が必要な物質であるといえる。さらに、 N_2O_5 の従来合成法は、危険な物質や操作を要求するものであったため、生物学分野における研究例はほとんどなく、我々の知る限りマウスにおける急性毒性を調べた 1 例のみに留まっている [2]。本研究では、簡便にその場合成した N_2O_5 を用いて、農業分野における N_2O_5 活用法を探索するため、プラズマ合成 N_2O_5 をモデル植物であるシロイヌナズナ (*Arabidopsis thaliana*) に照射した時の、植物の早期応答を調べた。

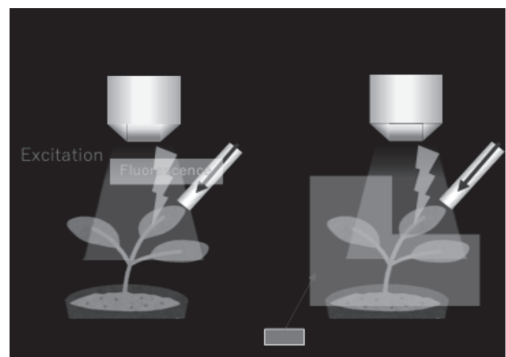


図 1 プラズマ合成 N_2O_5 のシロイヌナズナに対する全身照射と一枚の葉への局所照射

2. 実験方法

ガス状 N_2O_5 に対する植物の早期応答を調査するため、図 1 に示すように緑色蛍光カルシウムイオンセンサータンパク質 (GCaMP3) を導入したシロイヌナズナに約 200 ppm の N_2O_5 を 30 s 照射した時の細胞質内カルシウムイオン濃度 ($[Ca^{2+}]_{cyt}$) 変化を観察した。 N_2O_5 照射後、解析する遺伝子に合わせて所定時間静置した後に、葉を採取し、RT-qPCR 法で遺伝子発現解析を行った。

3. プラズマ合成 N₂O₅ に対する植物の Ca²⁺ 応答

N₂O₅ を植物体全身に照射すると、図 2(b) に示すように、照射から 10 秒以内に、[Ca²⁺]_{cyt} の上昇を開始することが判明した。さらに、1 枚の葉にのみ N₂O₅ を照射すると、図 2(c) に示すように照射葉で [Ca²⁺]_{cyt} が上昇し、その後非照射葉へと [Ca²⁺]_{cyt} 上昇シグナルが伝搬していくことが明らかとなった。全身・局所照射いずれにおいても、照射数分後には、葉脈で高い [Ca²⁺]_{cyt} が維持されている様子が見られた。これらの Ca²⁺ シグナル伝搬様態は、先行研究で明らかとなっている植物が物理傷害を受けた時に生じる応答と非常に似通っている [3]。さらに、植物は傷害を受けた時に全身的な防御応答を誘導することや、傷害から 10 分以内に防御に関わる植物ホルモンの一つであるジャスモン酸 (JA) 関連遺伝子の発現を誘導することがよく知られている [3]。そこで次に、N₂O₅ 照射後の遺伝子発現を調べた。



図 2 植物体の (a,b) 全身、(c) 一枚の葉に (a) 空気、(b,c) N₂O₅ を照射した時の Ca²⁺ 応答

4. N₂O₅ 照射による JA 関連遺伝子の発現

N₂O₅ 照射から 10 分後における JA 関連遺伝子 (*OPR3*, *JAZ5*) の発現を RT-qPCR 法を用いて調べた (表 1)。この結果は、JA 関連遺伝子がプラズマ合成 N₂O₅ の照射によって有意に誘導されたことを示しており、N₂O₅ が JA 経路に関連する全身応答を誘導する可能性が示唆された。

5. N₂O₅ 照射による防御応答遺伝子の発現

植物の全身防御反応には、主にサリチル酸 (SA) 経路を辿る全身獲得抵抗性 (SAR) と、JA とエチレン (ET) 経路を辿る誘導全身抵抗性 (ISR) の 2 種類がよく知られている。本研究では N₂O₅ 照射による JA 関連の経路が活性化する可能性が表 1 より示唆されたことから、ISR に関与する抗菌ペプチド関連遺伝子である *PDF1.2* の遺伝子発現を解析した。その結果、表 2 に示す通り、プラズマ合成 N₂O₅ は最低で

も照射から 3 時間以内には有意に *PDF1.2* の発現を誘導し、そして少なくとも 24 時間は *PDF1.2* の顕著な発現を維持することが判明した。これらの結果から、プラズマ合成 N₂O₅ は ISR に関わるような防御応答を誘起する可能性が示唆された。

表 1 空気、N₂O₅ 照射から 10 分後における JA 関連遺伝子の相対的な発現 (*UBQ10*)

Treated gas	<i>OPR3</i>	<i>JAZ5</i>
Air	—	—
N ₂ O ₅	++	++

表 2 空気、N₂O₅ 照射 3, 24 時間後における *PDF1.2* の相対的な発現 (*TUB*)

Treated gas	3 h	24 h
Air	—	—
N ₂ O ₅	+	++

5. まとめ

N₂O₅ の農業応用に向けて、プラズマ合成 N₂O₅ 照射に対する植物の早期応答を解明することを目的に実験を行った。植物はプラズマ合成 N₂O₅ を照射されると、それを検知し、10 秒以内に [Ca²⁺]_{cyt} 上昇を誘起し、N₂O₅ 照射葉から非照射葉への [Ca²⁺]_{cyt} シグナル伝搬を惹起することを明らかにした。また、プラズマ合成 N₂O₅ を照射した植物体において、JA 関連遺伝子の有意な発現が 10 分程度で生じ、数時間～24 時間という長い時間スケールで植物の全身防御反応に関わる抗菌ペプチド遺伝子 *PDF1.2* の顕著な発現が誘導されることが明らかとなり、わずか 30 秒という短時間の N₂O₅ 処理によって、長期間の植物免疫を活性化できる可能性が示唆された。

文献

- 1) S. Sasaki, K. Takashima and T. Kaneko, *Int. Chem. Res.*, **60**, 798 (2021).
- 2) W.M. Diggle and J.C. Gage: *Br. J. Ind. Med.*, **11**, 140 (1954).
- 3) M. Toyota, et al., *Science*, **361**, 1112 (2018).
- 4) D. Tsukidate, K. Takashima, S. Sasaki, S. Miyashita, T. Kaneko, H. Takahashi, and S. Ando, *PLOS ONE*, **17**, e0269863 (2022).

謝辞

本研究を進めるにあたり、生物を扱う基礎技術等、様々な技術を指導していただいた生命科学研究所 教授 東谷篤志先生及び東谷研究室の皆様 に深く感謝いたします。

修士学位論文要約（令和 5 年 3 月）

プラズマ活用その場観測 CVD による機能化二次元シート材料の
高品質合成

岩本 祐汰

指導教員：金子 俊郎， 研究指導教員：加藤 俊顕

High Quality Synthesis of Functionalized 2D Sheet Materials by Plasma Assisted
In-Situ CVD

Yuta IWAMOTO

Supervisor: Toshiro KANEKO, Research Advisor: Toshiaki KATO

Transition metal dichalcogenide (TMD), two-dimensional material, is expected to be promising candidates for novel transparent flexible devices because of their excellent electrical and optical properties. In terms of the industrial applications, there are still remained several issues to be solved in the growth stage of TMDs. Improving the quality of TMD is one of the most important issues, which can be overcome by clarifying the synthesis mechanism of monolayer TMD. We have recently succeeded in developing the in-situ monitoring CVD for the first time, which proposed the possibility that the nucleation mechanism of WS₂ follows non-classical nucleation. In this study, we focus on the lateral growth stage of monolayer WS₂ after the nucleation. The detailed crystal morphology and uniformity are investigated by comparing time-evolution information of crystal growth obtained by in-situ monitoring CVD and PL-mapping information measured after the growth. It was found that the growth speed of monolayer WS₂ was changed by varying local substrate temperature controlled by spot heater. Furthermore, PL intensity and its uniformity were strongly influenced by growth speed. WS₂ grown by fast-speed mode shows relatively low PL intensity in the center region of crystal, while high and uniform PL intensity can be obtained for WS₂ grown by slow-speed mode. These results suggest that there may be a correlation between growth rate and the introduction of sulfur vacancy.

1. はじめに

遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)は、優れた電気特性を有しつつ、透明かつフレキシブルであるため、明太陽電池など様々なデバイスへの応用が期待されている。しかし応用に向けては TMD 結晶サイズ、結晶品質ともに不十分な現状にあり、TMD の成長機構を理解することが重要である。そこで、本研究グループではその場観測 CVD という独自の TMD 合成手法を開発した¹⁾。本手法では CVD 合成中の基板表面を光学的に直接観測することが可能であり TMD の成長速度やインキュベーションタイムなどの成長因子を実測することができる。先行研究では TMD の一種である二硫化タングステン(WS₂)の特異な核発生や二次元成長モデルの提唱に至っている²⁾。一方で、結晶品質に直結する欠陥導入機構は未解明である。そこで本研究では、WS₂ の成長因子と結晶品質の相関解明を目的とした。

2. 基板温度による成長因子の制御

先行研究より WS₂ の成長は液相状態を介した液相一固相転位が支配的であることが明らかになった。液相一固相転位は成長駆動力と前駆体拡散の 2 つの因

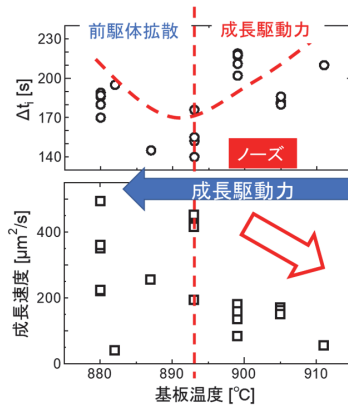


図 1 基板温度に対する成長速度とインキュベーションタイムの変化。

子で主に決定され、2 つの因子それぞれ液相前駆体の温度と相関があることが知られている。そこで本研究では、基板下部に設置したスポットヒータの出力を変化させることで、合成場の温度を変えずに基板温度(液相

前駆体温度)のみを変化させることを可能にした。他の合成条件を固定し、スポットヒータにより液相前駆体の温度のみを変化させて合成を行った結果、インキュベーション時間が基板温度に対し C 型に変化することが明らかとなった(図1)。この変化は古典的結晶成長モデルにおける時間-温度遷移(TTT)ダイアグラムの傾向と一致していることから、基板温度によって成長駆動力と前駆体拡散を制御できている可能性が示唆された。また成長速度は基板温度の上昇とともに減少することも明らかとなり、これは基板温度の上昇とともに液相前駆体と固体結晶成長点における化学ポテンシャルの差に起因する成長駆動力の低下で説明ができる。

3. 基板温度による結晶品質の変化

次に基板温度と結晶品質の相関解明を行った。結晶品質は、蛍光(PL)マッピングにより取得した WS₂ 結晶中心の PL 強度で評価した。910°C付近の高温領域では PL 強度は高かったが、六角形形状に結晶が成長することが判明した(図2)。これはタングステン欠損によるものだと考えられる。一方で低温領域の結晶は PL 強度が著しく低下することが確認された(図2)。ここで PL 強度減少の原因を調べるべくラマンマッピングを行った。ラマンスペクトルの E_{1g}, A_{1g} の

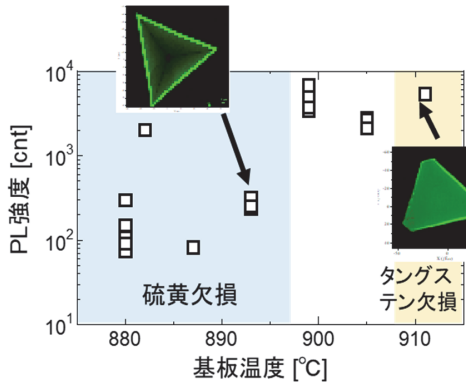


図2 基板温度に対する PL 強度の変化。

ピーク位置と、PL 強度に依存性がみられなかったため、PL 強度減少の原因は硫黄欠損によるものだと考えられる。さらに 900°C で合成された PL 強度の高い結晶に対して走査型透過型電子顕微鏡(STEM)観察を行ったところ、著しいタングステンと硫黄の欠損は見られず、高品質結晶であることを確認した。

4. 結晶欠陥導入機構の考察

成長因子と結晶品質の関係から結晶欠陥導入機構について考察する。成長速度と PL 強度をプロットしたところ、低速成長時は PL 強度が低く、高速成長時は PL 強度が高くなるという明確な依存性がみられた(図3)。ここで TMD と類似の原子層物質であるカーボンナノチューブを例に考えると、欠陥導入は結

晶エッジでの欠陥修復の可否によって決まることが知られている³⁾。同様に考えると、TMD の硫黄欠陥導入も欠陥修復と成長速度のバランスで決まっている可能性がある。つまり成長速度が速い場合は、結晶エッジで欠陥修復が起こる前に次の結晶が成長し欠陥が安定化するのに対し、遅い成長の場合は結晶エッジで欠陥が修復されてから結晶が成長するため高品質結晶となると説明できる。

また図3より成長速度 200 μm²/s を境に PL 強度が急激に変化することが分かる。ここで結晶エッジの欠陥が結晶中に取り込まれる時間(aυ/ΔW)を結晶成長速度から算出したところ 5~8 ms を境に PL 強度が大きく変化することが分かった。これは同時間スケールで硫黄欠陥修復が行われている可能性を示唆していると考えている。

5. まとめ

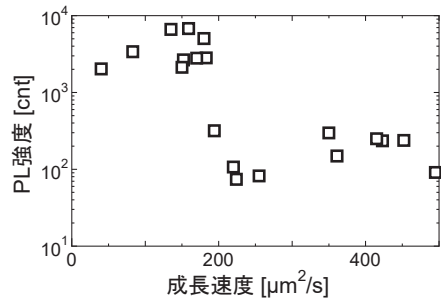


図3 成長速度と PL 強度の関係。

その場観測 CVD を用いて、TMD 成長における成長因子と結晶品質の相関解明に向けて研究を行った。その結果、硫黄欠陥導入量と成長速度の間に明確な依存性が存在することを初めて明らかとした。さらに、硫黄欠陥導入が成長速度と欠陥修復のバランスで決定するモデルを提唱し、硫黄欠陥修復時間が数 ms 程度の時間スケールで起こっている可能性を示した。本研究は、TMD の典型的な欠陥である硫黄欠陥の導入機構を実験的に検証したものであり、高品質な TMD 結晶合成の重要な知見になると考えられる。

文献

- 1) C. Li, T. Kameyama, T. Takahashi, T. Kaneko, and T. Kato, *Sci. Rep.*, **9** (2019) 12958.
- 2) X. Qiang, Y. Iwamoto, A. Watanabe, T. Kameyama, X. He, T. Kaneko, Y. Shibuta and T. Kato, *Sci. Rep.* **11** (2021) 22285.
- 3) Q. Yuan, Z. Xu, B. Yakobson and F. Ding, *Phys. Rev. Lett.* **108** (2012) 245505.

修士学位論文要約（令和5年3月）

ランダム構造探索法による新奇ホウ化物超伝導体の理論研究

上原 健也

指導教員：白井 正文， 研究指導教員：阿部 和多加

Theoretical Study of Novel Superconducting Borides
by Random Structure Searching

Kenya UEHARA

Supervisor: Masafumi SHIRAI, Research Advisor: Kazutaka ABE

Since the discovery of superconductivity of mercury in 1911, various substances have been discovered in the field of superconductors. In this study, looking for new superconducting borides, we theoretically investigate the possibility of metal borides MB_n ($M=K, Na, Rb, Cs$) with n being 1 through 6, where ab initio methods and random structure searching are used. Also focusing on $Pm\bar{3}m$ structure in hexaboride from the results of the above substances, we investigated the possibility of the $Pm\bar{3}m$ structure of MB_6 ($M=Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Pb, Nb, V$) as a superconductor. As a result, relatively high T_c (10.5K) is obtained for $RbB_6(Pm\bar{3}m)$. Although the $Pm\bar{3}m$ RbB_6 is thermodynamically unstable at ambient pressure, its formation enthalpy becomes negative at high pressures above about 2GPa. These results suggest that the $Pm\bar{3}m$ RbB_6 has potential as a superconductor.

1. はじめに

1911年に水銀の超伝導体が発見されてから現在まで様々な超伝導体が発見されてきた。その中で2001年に MgB_2 において超伝導を示すことが発見され、高い超伝導転移温度 T_c (39K)となること^[1]が分かった。そこでホウ化物の超伝導体に着目し、探索することにした。またホウ化物の超伝導体を探索の対象とした理由は他にもあり、一つはホウ素が軽い元素であること、もう一つはホウ素はp軌道を占める価電子が初めて現れる元素であり2p軌道が原子核付近に局在できるため電子とイオンの相互作用が強く働くことができる。これらのことからホウ化物においてまだ見つかっていない超伝導体があるのではと考えた。

2. 理論的枠組み

超伝導体を探索するにあたり、最初にランダム構造探索法によりホウ化物の各組成における最安定構造を探索した。その概要は、原子の種類と組成を指定した後、原子を単位胞内にランダムに配置する。この際空間群などの対称性は考慮しない。次に原子をランダムに配置した構造に対して第一原理計算を行うことにより構造緩和を行う。この操作を繰り返すことで数千個の緩和構造を得て、その中からエネルギーの一番低い構造を採り出す。

構造探索で最安定構造を探し出した後に以下の(1)式で定義される形成エネルギーを求め熱力学的な安定性の評価を行った。

$$E_f = E(MB_n) - E(M) - nE(B) \quad (1)$$

ここで E は構造のエネルギーを、 M は金属元素を、 B はホウ素をそれぞれ表し、形成エネルギーが負となると単体に相分離せず、熱力学的に安定と評価した。力学的安定性の評価はfrozen phonon法^[2]を用いた。

これら上記の評価を行った後に超伝導体としての可能性がある物質に対して等方的Eliashberg方程式を解くことにより T_c を求めた。ただし、電子間斥力に由来するパラメータである μ^* の値は本研究では0.13に設定した。

3. 最安定構造探索と形成エネルギー

アルカリ金属のホウ化物についてランダム構造探索を行い、最安定構造に対して式(1)の形成エネルギーの計算を行った結果、 $NaB_4(C2/m)$ 、 $NaB_6(Pm\bar{3}m)$ において最安定構造となり、その形成エネルギーが負となった。形成エネルギーはそれぞれ-0.042eV/atom、-0.028eV/atomとなった。ここで()の中は構造の空間群を表す。 NaB_6 については $Pm\bar{3}m$ で超伝導転移温度の計算がなされており、14.6K^[3]と予測されていたが本研究により NaB_6 の最安定構造が $Pm\bar{3}m$ であることを確認することができた。また形成エネルギーが負とはならなかったものの、わずかに正であった物質として $RbB_6(Pm\bar{3}m)$ と $CsB_3(I4/mmm)$ があった。形成エネルギーはそれぞれ0.045eV/atom、0.084eV/atomとなった。また電子の状態密度を確認することにより金属になるか確認したところ、全て金属であったが、 CsB_3 ではフェルミエネルギーにおける状態密度が極端に小さく超

伝導体としての可能性は低いと考えられる。

上記までの結果から図1のような結晶構造である六ホウ化物における $Pm\bar{3}m$ 構造に着目し、遷移金属の六ホウ化物において $Pm\bar{3}m$ になりうるかを計算した。この結果 LuB_6 においてのみ $Pm\bar{3}m$ で最安定構造かつ形成エネルギーが負(-0.2eV/atom)となった。また WB_6 においては個別にランダム構造探索を行ったところ $P2/m$ 構造で最安定となり、その形成エネルギーが負となった(-0.067eV/atom)。

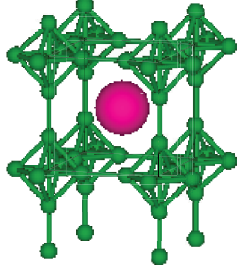


図 1: RbB_6 の $Pm\bar{3}m$ 構造

4. 超伝導転移温度の計算

超伝導転移温度を計算する前に力学的安定性の評価を行ったところ、 $NaB_4(C2/m)$ 、 $RbB_6(Pm\bar{3}m)$ 、 $WB_6(P2/m)$ 、 $LuB_6(Pm\bar{3}m)$ のうち LuB_6 のみ力学的に不安定となった。等方的Eliashberg方程式により T_c を求めた結果は NaB_4 では0.3K、 WB_6 では1.6Kとあまり高い T_c を得ることはできなかった。この要因としては NaB_4 においてはフェルミエネルギーにおける状態密度が小さく、電子格子相互作用についてもあまり働いていなかったためであると考えられる。 WB_6 についてはフェルミエネルギーにおける状態密度は比較的高いのだが、ホウ素だけではなく、重いタングステンの格子振動も超伝導に寄与するために高い T_c が得られなかったと考えられる。一方で、 RbB_6 については10.5Kと比較的高い T_c を得られた。そこで RbB_6 のどの振動モードが高い T_c に寄与しているのかを確かめるためにEliashberg関数 $\alpha^2F(\Omega)$ を計算した。

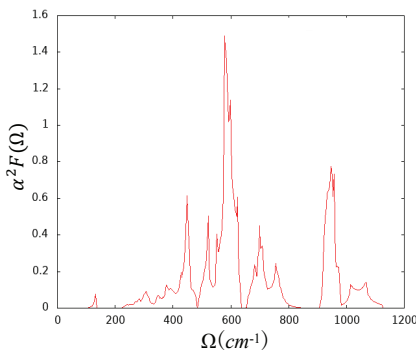


図 2: RbB_6 の Eliashberg 関数

$\alpha^2F(\Omega)$ は超伝導に寄与する格子振動を特徴づける量であり、この値が大きいことが高い T_c に繋がる。図2の結果から $600cm^{-1}$ 付近のモードが高い T_c に寄与していると分かった。そのモードがどのような振動であるかを確認したところ、ホウ素の正八面体が回転するモードであることが分かった。

5. RbB_6 の合成の可能性

RbB_6 の $Pm\bar{3}m$ 構造において超伝導体としての可能性を見出せたが、形成エネルギーはわずかに正となり合成の面で課題が残る。そこで圧力下での形成エンタルピーを計算することにより圧力下での合成可能性について確認したところ、図3の結果になった。

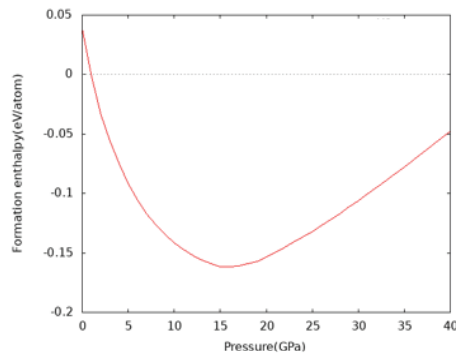


図 3: RbB_6 の形成エンタルピーの圧力依存性

図3の結果から2GPa付近で形成エンタルピーが負になり熱力学的に安定となることが分かった。

6. 結論

新奇金属ホウ化物として $NaB_4(C2/m)$ と $WB_6(P2/m)$ 、 $RbB_6(Pm\bar{3}m)$ を提案した。特に RbB_6 では T_c が10.5Kと比較的高い T_c に達し、新たな超伝導体として有望である。 RbB_6 の合成については約2GPaで形成エンタルピーが負となり、加圧下で合成できる可能性がある。しかし、合成可能というには圧力下でこの構造が最安定となることを確認することとエンタルピーの組成依存性を調べる必要があり、今後の課題として残された。

7. 文献

- [1]J.Nagamatsu, *et al.*, Nature (London) 410, 63 (2001).
- [2]A.Togo and I.Tanaka, Scr. Mater. 108, 1 (2015).
- [3]Z.Yuan, *et al.*, Chem. Phys. Lett. 722, 80 (2019).

修士学位論文要約（令和5年3月）

走査型非線形誘電率顕微鏡による
 Al_2O_3 /ダイヤモンド界面の微視的評価に関する研究

尾形 結友

指導教員：白井 正文， 研究指導教員：山末 耕平

Study on Microscopic Evaluation of Al_2O_3 /Diamond
Interface using Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy

Yu OGATA

Supervisor: Masafumi SHIRAI, Research Advisor: Kohei YAMASUE

We investigate the microscopic interface charge states at Al_2O_3 /diamond in real space through local capacitance measurement by time-resolved scanning nonlinear dielectric microscopy. By using local deep level transient spectroscopy based on this microscopy method, we show that interface defect density has spatially non-uniform clustered distributions at the Al_2O_3 /diamond interface. In addition, we find that the spatial fluctuations of the local capacitance-voltage (CV) characteristics at the Al_2O_3 /diamond interface are much higher than those at a hydrogen-annealed SiO_2 /Si interface. These high spatial fluctuations of the interface charge states possibly give significant impacts on the channel mobility of diamond-based power devices.

1. はじめに

近年、ワイドバンドギャップ半導体であるダイヤモンドのパワーデバイスへの応用が期待されている。ダイヤモンドを用いたパワーデバイスの実用化に向けた課題のひとつとして、金属-絶縁体-半導体(MIS)デバイスのチャネル移動度の向上が挙げられる¹⁾。チャネル移動度は MIS 界面に存在する高い界面準位密度(D_{it})やその不均一に伴う表面ポテンシャルゆらぎにより律速され得る¹⁾²⁾³⁾。MIS デバイスに用いられるゲート絶縁膜-半導体界面をナノスケールで評価する手法として、走査型非線形誘電率顕微鏡(SNDM)が知られている⁴⁾。SNDM では先鋭な導電性探針をゲート絶縁膜と半導体の積層構造から成る試料に接触させ、それによって生じる局所的な MIS 構造の静電容量変化を測定できる。このため、DLTS (Deep level transient spectroscopy) や容量-電圧 (CV) 特性測定など、絶縁膜-半導体の界面評価手法を微視的に行える⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾。本研究では、SNDM を発展させた時間分解 SNDM⁷⁾を用いて ALD (Atomic layer deposition) 法で成膜された Al_2O_3 をゲート絶縁膜とする Al_2O_3 /ダイヤモンドウェハ界面のナノスケール評価を行った。主として OH 基で表面を終端し、 Al_2O_3 膜を成膜したダイヤモンド (以下、 Al_2O_3 /OH-ダイヤモンド) の評価結果を以下では要約する。

2. 測定試料および測定手法

本研究では、時間分解 SNDM に基づく局所 DLTS⁷⁾により D_{it} 分布を観察した。また、局所 CV 特性測定⁸⁾を行い、表面ポテンシャルゆらぎを反映する

と考えられる局所 CV 特性のゆらぎを調べた。測定した試料は ALD 法により形成された Al_2O_3 層 (膜厚 50 nm)、p 型ダイヤモンド(111)層 (厚さ 300 μm)、高濃度 p 型ダイヤモンド層 (200 nm)、オーミック接触のための金電極層から構成される積層構造を持つ。ALD による Al_2O_3 膜の成膜を行う前に、ウェットアニール処理によりダイヤモンド表面は OH 基で終端されている。さらに表面の一部を原子レベルで平坦化するため、まず Ni の炭素固溶反応を用いたエッチング処理により(111)面を形成し、次に水素プラズマエッチングによる表面処理によって表面にステップ-テラス構造を形成している。局所 DLTS では、長さ 5 μs の矩形波パルス電圧 (蓄積パルス) を測定点毎に試料に印加し、得られた静電容量変化を解析して D_{it} 分布を得た。局所 CV 特性測定では、長さ 150 μs の三角波状パルスを印加した。なお、いずれの測定でも雑音低減のため、繰り返し電圧パルスを印加し、時間平均化を行った。また、局所 CV 特性測定では同時にその微分特性を得る手法⁸⁾を用いたため、周波数 1 MHz の微小正弦波電圧を三角波状パルス電圧に重畳した。測定はすべて室温、大気中で行い、先端半径 2 μm の Pt-Ir コート探針を使用した。

3. 局所 DLTS による D_{it} 像観察

図 1 に得られた D_{it} 分布像と蓄積パルスに対する静電容量の応答波形を示す。図 1(a)より、 D_{it} が高い領域は数 10 nm から数 100 nm サイズのクラスターをつくり、それらが不均一に分布することがわかった。図 1(b)は、高い D_{it} が検出された測定点で典型的に

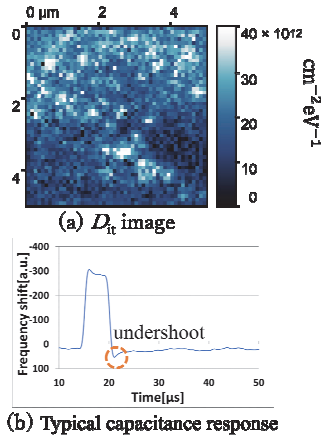


図1 局所 DLTS 観察による Al₂O₃/OH-ダイヤモンド試料の D_{it} 分布像および容量応答

みられた応答波形である。蓄積パルスの印加により静電容量も基本的には同様の矩形波状変化を示すが、蓄積パルスの緩和直後、アンダーシュートを示し、その後指数関数的に減衰して定常値に収束する様子がみられた。静電容量の示すアンダーシュートおよび指数関数的な減衰は、蓄積パルスが緩和された後、界面欠陥に捕獲されていた多数キャリアが放出される過程に対応する。このように、本研究では局所 DLTS により Al₂O₃/OH-ダイヤモンド界面に生じる不均一な D_{it} 分布の可視化に成功した。

4. 局所 CV 特性のゆらぎ評価

図 2(a)に Al₂O₃/OH-ダイヤモンドで得られた局所 CV 特性のゆらぎを可視化した像を示す。ここでは、局所 CV 特性の変曲点を与える電圧を特徴量として抽出した。図 2(b)は、比較のため、高品質な界面を持つ水素アニールされた熱酸化 SiO₂/p-Si 試料(膜厚 10 nm)を同様に測定して得られた像である。いずれの像においてもクラスター状の不均一が観察されたが、SiO₂/p-Si に比較すると Al₂O₃/OH-ダイヤモンドはより不均一が強いことがわかる。実際、局所 CV 特性のゆらぎを比較するため、特徴量の標準偏差を算出したところ、Al₂O₃/OH-ダイヤモンドの方が数倍高いゆらぎを示すことがわかった。これは、Al₂O₃/OH-ダイヤモンド界面が水素アニール SiO₂/Si に比較して数倍高い表面ポテンシャルゆらぎも持つことを示唆する。高い表面ポテンシャルゆらぎの原因として、高い D_{it} を持つクラスター状領域が界面に存在することが挙げられる。また、局所 CV 特性のゆらぎは界面に存在する D_{it} に加え固定電荷密度 (Q_f) 分布も反映する。 D_{it} や Q_f とそれらのゆらぎを低減することが Al₂O₃/OH-ダイヤモンド界面の品質の向上に不可欠と考えられる。

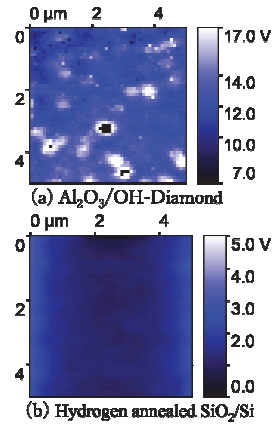


図2 局所 CV 特性のゆらぎの二次元像

5. まとめ

本研究では、時間分解 SNDM に基づく絶縁膜-半導体界面の微視的物性評価手法を用いて主に Al₂O₃/OH-ダイヤモンド界面のナノスケール評価を行った。その結果、絶縁膜下に埋もれた Al₂O₃/ダイヤモンド界面の微視的な電荷状態を実空間で調べることができた。時間分解 SNDM はダイヤモンドを応用した MIS デバイスのチャネル移動度を律速する要因となる D_{it} や Q_f の分布、それらが引き起こす表面ポテンシャルゆらぎを評価できる有用な手法と言える。

謝辞

本研究の遂行にあたり、在職中、御指導を頂くとともに、その後も多大なる御支援を頂きました現東北大学未来科学技術共同研究センター長康雄教授に感謝の意を表します。また、金沢大学ナノマテリアル研究所徳田規夫教授には試料を御提供頂くとともに、御指導、御議論を頂きました。誠にありがとうございました。

文献

- 1) T. Matsumoto *et al.*, Appl. Phys. Lett., **114**(2019), 242101.
- 2) J. R. Brews, J. Apply. Phys. **46** (1975), 2181.
- 3) J. R. Brews, J. Appl. Phys., **46**(1975), 2193.
- 4) Y. Cho, A. Kirihara, and T. Saeki, Rev. Sci. Instrum, **67**(1996), 2297.
- 5) Y. Cho, Jpn. J. Appl. Phys., **56**(2017), 100101.
- 6) N. Chinone and Y. Cho, J. Appl. Phys., **122** (2017) 105701.
- 7) Y. Yamagishi, and Y. Cho, Appl. Phys. Lett., **111**(2017), 163103.
- 8) K. Yamasue and Y. Cho, Microelectron. Reliab., **135**(2022), 114588.

修士学位論文要約 (令和 5 年 3 月)

(W-Zn)酸化物の複合薄膜形成と光触媒作用

角田 聖

指導教員：齊藤 伸， 研究指導教員：岡田 健

Formation of (W-Zn) oxide composite thin film and its photocatalysis

Sho KAKUTA

Supervisor: Shin SAITO, Research Advisor: Takeru OKADA

In this thesis, the formation of ZnWO₄/WO₃ films by co-sputtering of ZnO with W and their photocatalytic activity were studied. Bilayer-like structure of ZnWO₄/WO₃ films can be formed by time evolution of the sputtering yield due to temperature change of the target. Photoluminescence and x-ray diffraction analyses indicate continuous composition change in the thickness direction originates from the W concentration. The composite films show clear photocatalytic activity, resulting from the suppression of carrier recombination due to heterojunction formation and the band gap change due to oxygen defects.

1. はじめに

半導体の複合材料は構造の設計やバンドアライメントの制御により新たな機能の発現や高機能化が可能である。現在、半導体複合材料は幅広い分野で利用されており、ZnWO₄/WO₃ 複合材料がエレクトロクロミクスや光触媒の分野で優れた物性を示すことが報告されている¹⁾。その作製方法には PLD 法、ゾルゲル法があるが、工業的な使用には適していない。スパッタリング法は汎用性の高い手法として知られているが、ZnWO₄ をターゲットとして用いる限りコスト面に課題が残る。そこで本論文では、ZnO ターゲットと W チップのコスパッタリングによる ZnWO₄/WO₃ 複合薄膜の形成と光触媒作用について研究を行った。

2. ZnWO₄/WO₃ 二層膜の作製

RF マグネトロンスパッタリング法(出力 200W、Ar 雰囲気 1.0Pa、基板加熱なし、25min)により、ZnO 焼結体と W チップをコスパッタすることで薄膜を堆積した。その後、電気炉を用いて焼成(800°C、O₂ 雰囲気、5min)することで薄膜を作製した。

W 濃度を变化させたときの XRD 回折パターンを図 1 に示す。W 低濃度では ZnO の微弱な回折ピークが観測され W 濃度の上昇に伴い消失した。ZnWO₄ の回折ピークはいずれの W 濃度においても観測され、結晶方位の回折強度は W 濃度により複雑に変化した。WO₃ の回折ピークは 48 at.% 以上の W 高濃度でのみ観測された。各組成のピーク強度から、膜中の組成は W 濃度の上昇に伴い

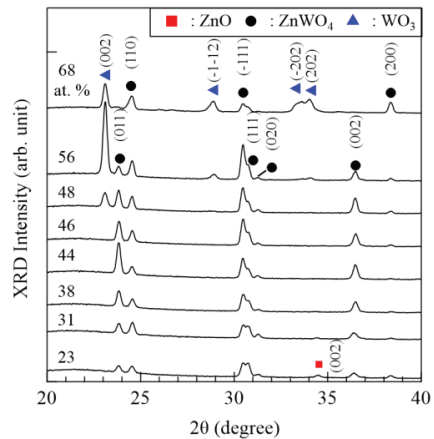


図 1. XRD 回折パターン

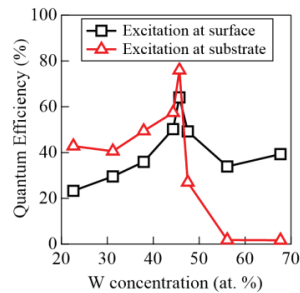


図 2. 量子収率と W 濃度の関係

ZnWO₄ のほぼ単一組成から ZnWO₄ と WO₃ の混合膜に変化することが明らかになった。

PL 測定の結果から算出された量子収率と W 濃

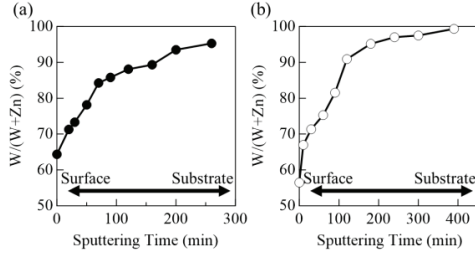


図 3. W 高濃度(86 at. %)膜の(a)焼成前と(b)焼成後の厚さ方向の組成分布

度の関係を図 2 に示す。表面励起、基板励起どちらにおいても量子収率は 45 at. %で最大となった。また、量子収率は励起方向によっても変化し、特に W 高濃度において基板から励起した際、ほとんど発光が見られなくなった。

励起方向による量子収率の変化が大きい W 高濃度の薄膜について、Ar スパッタにより膜表面をエッチングしながら XPS 測定を行うことで、厚さ方向の組成分布を分析した。図 3(a)に示すように、薄膜を堆積した段階において W と Zn の組成比に厚さ方向の偏りが生じることがわかった。スパッタ収率はターゲットの温度上昇に伴い増大することが報告されているため²⁾、組成比の偏りはターゲットの温度上昇に伴うスパッタ収率の時間変化により生じたと考えられる。この組成の偏りは焼成後も維持され(図 3(b))、W 濃度の高い基板側で WO₃、膜表面に ZnWO₄ が形成し、厚さ方向に連続的に組成変化する二層に近い構造を形成する。励起方向による量子収率の変化は、厚さ方向の組成の偏りに起因するといえる。

3. 光触媒作用の評価

薄膜の光触媒作用についてメチレンブルー(MB)脱色試験によって評価した(図 4)。MB 分解率は W 濃度の上昇に伴って向上する傾向を示し、特に 40 ~ 50 at. %以上で分解は促進された。また、WO₃ 薄膜(図 3▲)や従来の 2 段階スパッタと焼成によって作製した二層膜(図 3◆)と比較し、W 高濃度条件下で高い MB 分解率を示した。このことから、

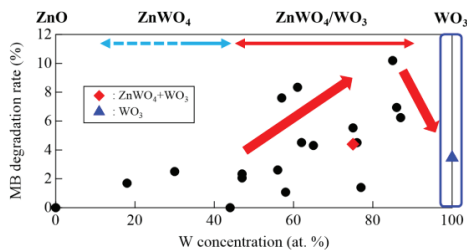


図 4. MB 分解率と W 濃度の関係

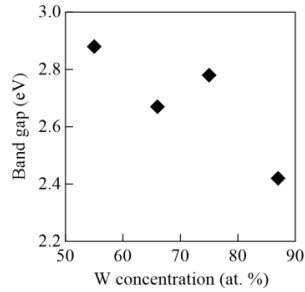


図 5. バンドギャップと W 濃度の関係

図 3 で示された構造は、MB の分解において有効であるといえる。

複合材料の光触媒作用について、バンドアライメントについて考察した。ZnWO₄と WO₃は Type II ヘテロ接合を形成し接合界面で電荷移動が発生する。そのため効率的に電荷が分離され、キャリア再結合率が抑制されることで光触媒効果が発現し、これが MB 分解を促進する要因の 1 つだといえる。

また、光吸収と MB 分解の関係について検討した。図 5 に示すように、W 高濃度条件下の薄膜のバンドギャップは W 濃度の上昇に伴い狭まる傾向を示した。これにより光吸収量が増加し、MB の分解が促進されたと考えられる。WO₃は、酸素欠陥の生成によりバンドギャップが変化することが知られていることから³⁾、薄膜のバンドギャップ変化は、焼成時の酸素供給不足により、WO₃ 結晶内に生じる酸素欠損量が増加したこと起因すると思われる。

4. おわりに

本研究では ZnO ターゲットと W チップのコスパッタリングによる ZnWO₄/WO₃ 複合薄膜の形成と光触媒作用の評価を行った。ターゲット温度上昇に伴うスパッタ収率変化により、厚さ方向に連続的に組成変化する複合二層膜構造が形成された。複合薄膜は、WO₃ 単層膜と従来法で作製した二層膜に比べ高い光触媒作用を示した。この光触媒作用はヘテロ接合界面における電荷移動とキャリア再結合抑制、酸素欠陥生成による WO₃ のバンドギャップ変化が影響を与えることが明らかとなった。

参考文献

- 1) H. Wei et al., *Electrochim. Acta* **132**, 58 (2014).
- 2) R. Behrisch et al., *Nucl. Inst. Methods Phys. Res. B* **82** [2], 255 (1993).
- 3) W. Wang et al., *J. Mater. Chem. C* **4** [27], 6641 (2016).

修士学位論文要約（令和5年3月）

日常モニタリングのための慣性センサを用いた 歩容変化の検出と分類に関する研究

片山 堅斗

指導教員：渡邊 高志

A Study on Detection and Classification of Gait Change Using an Inertial Sensor for Daily Monitoring

Kento KATAYAMA

Supervisor: Takashi WATANABE

Falls are a serious problem for the elderly and hemiplegics. One of the causes of falls is a decrease in balance and walking abilities. When these abilities decline, the gait is considered to change from the usual stable gait (reference gait). Therefore, in this study, only the individual's reference gait data measured by a single IMU was used to detect minor gait changes, without using the gait data after the gait change. Also, a classification of the type of gait change was investigated. The Local outlier Factor was used to evaluate the average detection rate for the 7 attached IMUs and 6 subjects, and the detection rate was more than 96.5% in the gait of a healthy subject and more than 89.3% in the gait of a simulated hemiplegic subject. Although it is difficult to judge gait changes visually, high detection rates were obtained even for non-monotonic gait such as that of hemiplegics, suggesting the effectiveness of the proposed method. The accuracy of the gait change classification using a Feed-forward Neural Network was more than 97.6% for both healthy and simulated hemiplegic gait in the intra-subject evaluation, but the accuracy was low in the inter-subject evaluation conducted by Leave-One-Subject-Out Cross-Validation. In the future, experiments with actual hemiplegic patients and improvement of the accuracy of classification are issues to be considered.

1. はじめに

高齢者や片麻痺者にとって、転倒は寝たきりに直結する骨折を引き起こす可能性があり、深刻な問題である。また、片麻痺者の転倒発生率は高齢者の一般集団よりも高く、日々のモニタリングや転倒予防が必要である。高齢者や片麻痺者が転倒する原因として、運動能力やバランス能力の低下が挙げられる。これらの能力が低下すると普通の安定した歩行（基準歩行）から歩容が変化すると考えられる。

慣性計測ユニット（IMU）で計測した歩行データに機械学習を適用した異常歩行の検出や分類は広く行われているが、一般的に教師データとして異常歩行データを必要とする。この異常歩行データは入手することが難しく、教師データにない異常の検出が難しい。本研究では、単一のIMUを使用して、個人の基準歩行のみで歩容の変化を検出することを目的とし、歩容に変化があった場合、歩容変化の種類を分類を試みた。

2. 基準歩行に対する予測誤差の算出方法

個人の歩容変化を検出するために、基準歩行で学習した長・短期記憶（LSTM）モデルを用いて、歩容変化検出の特徴量として歩行データの予測誤差

を算出した。予測誤差は時刻 n のIMUで計測した3軸加速度、3軸角速度信号の6成分の計測値に対し、次の時刻を予測するモデルを作成したときの、計測値と予測値の差分の絶対値とした。予測モデルは基準歩行を用いて作成するため、基準歩行データに対して予測誤差は小さく、歩容変化歩行データに対して予測誤差が大きく出力されることが予想される。

3. 制限を加えた模擬歩行での歩容変化検出

若年健常者6名（ 22.8 ± 1.1 歳）を対象とし、腰部、両大腿部、両下腿部、両足部にIMU（MTw, Xsens社）を伸縮性バンドで取り付け、健常者歩行（H）と片麻痺者模擬歩行（S-Hem）を計測した。片麻痺者模擬歩行は、膝関節と足関節を弾力包帯で固定し、膝関節の屈曲と足関節の背屈を制限することで片麻痺者歩行の一形態を模擬した。

高齢者や片麻痺者の転倒に関連する歩容変化として、ストライド時間の増加、歩隔の増加、遊脚期のクリアランス低下、両脚支持期時間の増加などが挙げられる。本研究では、被験者が自然と感じる歩行を基準歩行とし、先行研究で示された片麻痺者の転倒群、非転倒群の歩行パラメータ差を用いて、歩容変化歩行を計測した。基準歩行か

ら 29.9% ストライド時間を増加させた歩行¹⁾ (ST), 脚長の 6.4% 歩隔を増加させた歩行²³⁾ (SW), 口頭指示でクリアランスを低下させた歩行 (C) と両脚支持期時間を増加させた歩行 (DST) を計測した. 被験者平均の歩行パラメータ差を算出した結果, ストライド時間は 0.3 s 程度の増加, 歩隔は 8-9 cm 程度の増加, クリアランスは 1 cm 程度の低下, 両脚支持期は 200 ms 程度の増加となり, 検出対象が目視では判断するのが難しい軽微な変化であることを確認した. 検出には教師なし異常検出方法である局所外れ値因子法 (LOF) を用いた. 基準歩行は 25 試行, 歩容変化歩行は 5 試行ずつ計測した. 基準歩行のうち, 10 試行を LSTM モデルの学習, 10 試行を LOF の学習, 5 試行をテストデータとした. 歩行データは 1 ストライドごとに分割し, 入力信号は信号データと予測誤差データを比較した. 検出率は基準歩行と歩容変化歩行の 2 値分類の精度とした. 図 1 に異なる入力信号での検出率の比較を示す. 箱ひげ図にはそれぞれの歩容変化歩行での 7 つの IMU, 6 人分の検出率をプロットした. 平均値は健常者歩行, 片麻痺者模擬歩行ともに予測誤差データを用いたほうが高く, 有意水準を 0.05 として Student の対応のある t 検定を行った結果, 片麻痺者模擬歩行では予測誤差データを用いたときの検出率が有意に高かった. 軽微な変化を検出するうえで予測誤差データを用いたことで変化した特徴が明確になり, 検出に有効になったと考えられる. 表 1 に予測誤差データを用いたときの歩容変化別の 7 つの IMU, 6 人分の検出率の平均値±標準偏差を示す. 平均値に着目すると, 健常者歩行では全ての歩容変化で 96.5% 以上, 片麻痺者模擬歩行では 89.3% 以上の検出率を得た. 非単調な歩行

においても高い検出率が得られ, 実際の片麻痺患者への適用可能性を確認した.

4. 歩容変化分類の検討

軽微な変化の種類の分類可能性を調査するために, 4 つの歩容変化歩行 (ST, SW, C, DST) を 4 クラスに分類するモデルを教師あり学習の順伝播型ニューラルネットワークで作成した. 評価データは, 歩容変化検出でテストデータに用いた 5 試行分のデータとした. 1 人のデータで 5 分割交差検証を行う被験者内評価, Leave-One-Subject-Out 交差検証を行う被験者間評価を実施した. 信号データを入力信号として分類を行った結果, 7 つの IMU, 6 人分の分類精度の平均値±標準偏差が, 被験者内評価と被験者間評価でそれぞれ, 健常者歩行で 98.69±1.03%, 70.37±12.99%, 片麻痺者模擬歩行で 97.61±1.61%, 57.35±16.86% となった. 被験者内評価は片麻痺者模擬歩行でも 97% を超える分類精度が得られたが, 教師データにテストデータの被験者が含まれない被験者間評価では分類精度が低く, 被験者ごとに精度にばらつきがあった. 本研究では被験者が 6 名とデータ数が少ない. 基準歩行や発生する歩容変化歩行も個人差があるため, 被験者間評価で分類精度が低かったと考えられる. また, 1 つの歩容変化を 1 つのクラスに分類するモデルを作成したため, 複合的に発生する歩容変化を考慮できていない. 今後は, 被験者数の増加, マルチラベル分類の検討を行うことで分類精度の向上が期待できる.

5. まとめ

単一の IMU を用いて歩容変化検出と分類を検討した. 歩容変化検出では様々な歩容の変化において, 高い検出率が得られ, 本方法の実用性が示唆された. 歩容変化分類では被験者内評価では高い分類精度が得られたが, 被験者間評価では分類精度が低かった. 実際の片麻痺患者での実験や分類精度の向上が課題である.

文献

- 1) J. Latorre, C. Colomer, M. Alcàiz, and R. Llorens, Gait analysis with the Kinect v2: Normative study with healthy individuals and comprehensive study of its sensitivity, validity, and reliability in individuals with stroke, *J. Neuroengineering and Rehabilitation*, **16** (1), pp.1-11 (2019)
- 2) J. C. Dean and S. A. Kautz, Foot placement control and gait instability among people with stroke. *J. Rehabil. R & D*, **52**, pp.577-590 (2015)
- 3) HY Hsiao, V. L. Gray, R. A. Creath, Stuart A. Binder-Macleod, and Mark W. Rogers, Control of lateral weight transfer is associated with walking speed in individuals post-stroke. *J. Biomechanics*, **60**, pp.72-78 (2017)

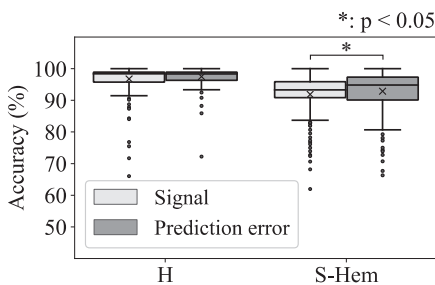


図 1 異なる入力信号での検出率の比較

表 1 歩行変化別の検出率 (%)

	健常者歩行	片麻痺者模擬歩行
ST	97.89±1.94	92.56±7.43
SW	96.55±4.77	89.34±7.79
C	97.76±1.99	94.38±4.67
DST	97.86±1.74	95.33±3.89

修士学位論文要約（令和5年3月）

不活性雰囲気でのコールドスプレー法により 作製したナノ結晶集合体の組織と軟磁気特性

久留宮 悠平

指導教員：齊藤 伸， 研究指導教員：小川 智之

Microstructure and Softmagnetics of Nanocrystalline Assemblies Prepared by Cold Spraying in Inert Atmosphere

Yuhei KURUMIYA

Supervisor: Shin SAITO, Research Advisor: Tomoyuki OGAWA

1. Introduction

Recently, research on highly efficient soft magnetic materials, amorphous and Fe-based nanocrystalline materials, has been actively conducted toward the realization of a decarbonized society. In the current process, saturation magnetization is reduced due to the inclusion of nonmagnetic elements to suppress coarsening of crystal grains. Therefore, there are growing expectations for Fe-based nanomaterials that have saturation magnetization equivalent to that of Fe and low coercivity. However, since the Fe nanoparticles that make up Fe-based nanomaterials are very small, it is difficult to achieve high density due to frictional forces between the particles.

Therefore, we investigated the formation of high-density films by using the cold spray method (CS method), a technique in which material particles are injected into a high-pressure gas stream at a lower temperature than the melting point of the material and accelerated, and the film is formed by the impact force generated by the collision with the substrate. The CS method is expected to improve soft magnetic properties by reducing the effective magnetic anisotropy energy due to the very small grain size while maintaining the high saturation magnetization of Fe. In this study, magnetic properties, crystal structure, and packing ratio of the fabricated Fe nanoparticle assemblies were evaluated in order to verify the microstructure and soft magnetic properties.

2. Experimental Methods

First, since Fe nanoparticles have a very large specific surface area relative to their volume, we developed an

environment for forming Fe nanoparticle assemblies in an inert atmosphere using a CS apparatus. The molding conditions for the Fe nanoparticles with surfactant adsorbed were as follows Carrier gas temperature was fixed at 100 °C and injection pressure was fixed at 0.5 MPa. On the other hand, particles without surfactant adsorption were molded at a carrier gas temperature of 500 °C and carrier gas pressure of 0.7 MPa. Other conditions were as follows. For Fe nanoparticles with or without surfactant, the spray travel speed was 30 mm/s, the number of layers was 30 times, the distance between the spray nozzle and the substrate was 10 mm, and the substrate was cooled at -5 °C during the molding. The fabricated Fe nanoparticle assemblies were post-annealed to remove the surfactant and to eliminate crystal lattice distortion. The heat treatment conditions were as follows. First, vacuum heat treatment was performed at a vacuum of 10 Pa or less. Subsequently, heat treatment was performed in H₂ gas. As a control experiment for CS, pressed Fe nanoparticles were prepared at a pressure of 40 MPa. The structure of each sample was evaluated by transmission electron microscopy (TEM), density by liquid weighing, crystal structure by X-ray diffraction (XRD), and magnetic properties by a sample vibration magnetometer (VSM).

3. microstructure of Fe nanoparticle assemblies by CS method

Fe nanoparticle assemblies were successfully prepared by the CS method. For Fe nanoparticles without surfactant adsorption, multiple small pieces were fabricated due to cracking and chipping during the molding process. On the other hand, Fe

nanoparticle assemblies with surfactant adsorption did not crack or chip. This may be caused by the surfactant acting as a binder between the particles. Volume fraction of Fe nanoparticle assembly without surfactant adsorption was 98% packed by CS. And the volume fraction of Fe nanoparticle aggregate with surfactant adsorption was 35% packed. This may be due to the small Volume fraction of Fe nanoparticles inside the compact caused by the surfactant intervals inside the aggregate. Therefore, post annealing was performed in order to eliminate the surfactant. After the post annealing, the Fe nanoparticle aggregate achieved a high volume fraction ratio of 97%. From the above results, it is considered that the CS method is useful for the high density of Fe nanoparticles.

From the crystal structure evaluation, the Fe nanoparticle assemblies were produced with and without surfactant, and were composed of no-oriented α -Fe nanoparticles assemblies with lattice constants equal to bulk values of Fe. On the other hand,

for Fe nanoparticle assemblies with surfactant adsorbed, crystallite size of 14.8 nm was obtained after post annealing, whereas Fe nanoparticle assemblies without surfactant Fe nanoparticles had a size of 24.1 nm. This may be due to suppressing the grain growth by the surfactant during the post annealing.

From the microstructure evaluation, the Fe nanoparticle assemblies can be considered densely packed, with a nanocrystal occupied area

fraction of more than 90%, with or without surfactant.

4. Soft magnetic properties of Fe nanoparticles assemblies

Fe nanoparticles assemblies with surfactant adsorbed did not show any change in coercivity before post annealing independent of the difference in molding technique. This may be caused by the magnetic isolation of the Fe nanoparticles by the surfactant. After the post annealing, saturation magnetization was the same as the bulk value of Fe independent of the molding technique due to the removal of surfactant. This indicates that more than 90% of the surfactant was removed by the post annealing. And the Fe nanoparticle assembly prepared by CS showed a 70% reduction in coercivity compared to the compacted compact. This indicates that CS is superior in the fabrication of magnetic materials with excellent soft magnetic properties. On the other hand, for the Fe nanoparticles assemblies without surfactant

adsorption, the coercivity of the CS compacts before post annealing was reduced coercivity down to 158 Oe from the coercivity of the as synthesized Fe powder. In addition, post annealing further reduced the coercivity down to 52 Oe.

5. Conclusion

As shown Fig. 1, the magnetic properties of post annealing Fe nanoparticle aggregates made of raw powder with surfactant adsorbed, which have the best soft magnetic properties in this study, with those of general soft magnetic materials. The saturation magnetic flux density, B_s , was 2.0 T, which is 90% B_s compared to bulk of Fe, achieving the target value. On the other hand, the coercivity was 320 A/m, which still remains a problem. This is thought to be that this may be a decrease in the averaged ratio of anisotropic energy due to a decrease in the number of crystalline particles within a certain range by the CS method and post annealing.

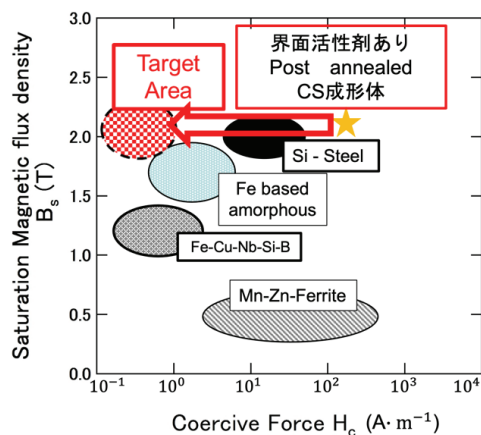


Fig.1 Relationship between coercivity and saturation flux density of general soft magnetic materials and Fe nanoparticle assemblies fabricated by CS method.

修士学位論文要約（令和5年3月）

六方晶窒化ホウ素へのグラフェンのヘテロエピ成長と それを用いたデバイス応用への研究

小濱 路生

指導教員：佐藤 茂雄， 研究指導教員：吹留 博一

A Study on Graphene Hetero-epitaxial Growth on Hexagonal Boron Nitride and its Application to Devices

Roki KOHAMA

Supervisor: Shigeo SATO, Research Advisor: Hirokazu FUKIDOME

Hexagonal boron nitride (h-BN) is an appealing substrate dielectric for use in improved graphene-based devices. The carrier mobility in the graphene on SiO₂ which is often used as a substrate for graphene is $1 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V}$. This carrier mobility is much lower than theoretical values because of the surface roughness and charge traps of SiO₂. On the other hands, hexagonal boron nitride (h-BN) has a flat surface and few charge trap. So, The carrier mobility in the graphene on h-BN improves up to $6 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. But now, it is difficult to use h-BN as a substrate for graphene. Since the method to make graphene on h-BN is very tough process, So, in this study, we aimed to grow graphene on h-BN. In fact, we succeed in the heteroepitaxy of graphene on h-BN. Furthermore, we controlled both the thickness and stacking of graphene grown on h-BN.

1. はじめに

グラフェンは理論上、この世に存在するものの中で一番高い $2,000,000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 以上のキャリア移動度を持つ。グラフェンの支持基板として用いられる SiO₂ 基板のグラフェンにおいて、 $1 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ のキャリア移動度が報告されている。これは基板由来の粗い表面や電荷トラップによって、グラフェンの理論特性と比較してはるかに低い値を示している。[1] 一方、h-BN はその平坦な表面と電荷トラップの少なさをもって、h-BN 上グラフェンのキャリア移動度を $6 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ にも向上すると報告されている。h-BN はグラフェンの支持基板として非常に有用であるといえる。しかし、SiC 上 h-BN の置換によるグラフェンの成長は報告されているが、h-BN 上へのグラフェンのエピ成長は未達成である。そこで本研究では、h-BN 上のグラフェンのヘテロエピ成長を試みた。

2. h-BN 上へのグラフェンのヘテロエピ成長

C 終端 SiC 基板上に堆積させた h-BN 上へのグラフェンのエピタキシャル成長を、SiC 表面の熱昇華法を用いて試みた。本試料に対し、h-BN 上グラフェンの断面のエネルギー分散型 X 線分光法(EDS)と断面 TEM 観察を行った。ホウ素、炭素、窒素、シリコンを表す EDS の結果を図 1 に示す。赤はホウ素、青は炭素、緑は窒素、ピンクはシリコンを表している。最下層において、シリコンのピンクと炭素の青の混在した領域が表れた。これは、基板が SiC であるということと合致する。SiC の

上に窒素の緑とホウ素の赤の混在した領域が表れた。これは h-BN の領域を示している。h-BN の上に薄く炭素の青の領域が表れた。これはグラフェンの成長を示している。

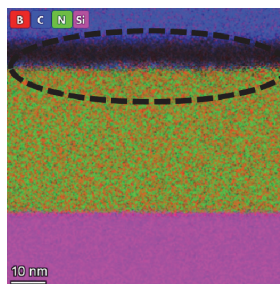


図 1 h-BN 上グラフェンの断面 EDX 像

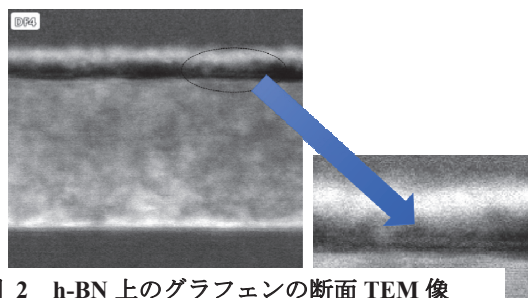


図 2 h-BN 上のグラフェンの断面 TEM 像

このEDS測定した領域の断面TEM像を図2に示す。このTEM像において、EDX像からグラフェンと考えられる領域に層状の像が表れた。これらの結果から、SiC上に堆積したh-BNの上にグラフェンが成長していることを明らかにした。

3. h-BN上に成長したグラフェンの化学結合状態の解析

h-BN上に成長したグラフェンの化学結合状態を顕微Raman分光法によって調べた。C末端SiC上のh-BNのある領域に成長させたグラフェンの顕微ラマンスペクトルをエラー! 参照元が見つかりません。に示す。このラマンスペクトルから、 1350cm^{-1} 付近にh-BNの存在を表す E_{2g} バンドが表れた。それに加え、 1580cm^{-1} 付近にGバンド、 2750cm^{-1} 付近のG'バンドのグラフェンの存在を表す2つのバンドが表れた。これらから、この領域においてC末端SiC上にh-BN、グラフェンの双方が存在していることが考えられる。また、h-BNの存在する領域で測定されたスペクトルではG'バンドが明瞭に分裂した。つまり、h-BN上にグラフェンがBernal積層をとって成長したことが示唆された。

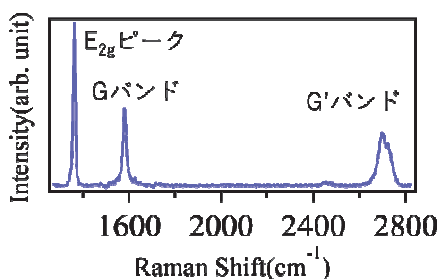


図3 h-BN上グラフェンの顕微ラマンスペクトル

4. エピタキシャル薄膜中へのC導入による歪緩和過程への影響

グラフェンの積層構造を調べるために、h-BNが存在しない領域(領域A)、h-BN微小片上のグラフェンが存在する領域(領域B)における直径3μm程度の微小領域からの電子回折(μ-LEED)像を図4に示す。h-BNが存在しない領域では、六角形のスポットが2組表れた。それらのスポットは互いに30°回転していた。また、末端SiC上に成長したグラフェン特有の非Bernal積層特有の円弧上のスポットも表れた。一方、h-BN上にグラフェンが存在する領域においては、二組の六角形状のスポットが観測された。グラフェンが存在しないh-BNのμ-LEEDとの比較から、この2つのスポットはそれぞれh-BNによるものとグラフェンによるものであると考えられる。この2つのスポットは15°回転して表れた。μ-LEED解析から、h-BNの存在は、グラフェンの成長様式を変調させることが考えられる。

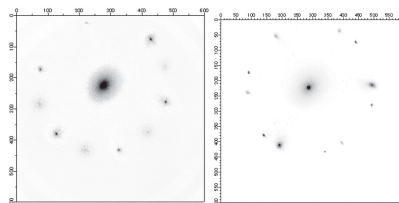


図4 SiC上グラフェンとh-BN上グラフェンのμ-LEED像

さらに、微視的領域からの電子反射率(μ-ER)を測定することでグラフェンの層数の微視的な変化を調べた。その結果を図に示す。緑の実線で領域A、赤の実線で領域Bからのμ-ERを示している。領域AがSiC上に直接グラフェンが成長した領域であることが分かっている。よって、3-6 eVでのdipの数から、それぞれの領域におけるグラフェンの層数を計測できる。その結果SiC上に直接成長グラフェン(領域A)の層数は6層とわかる。一方、h-BN上でグラフェンが存在する領域Bにおいては、一層グラフェンから成る微小領域と二層グラフェンから成る微小領域が混在していると考えられる。その理由は、既報より、3つあるdipに関して4-5eVのピークは一層領域に由来するもの、~3 eVよ~6 eVのピークは二層領域に由来するものと帰属できるからである。

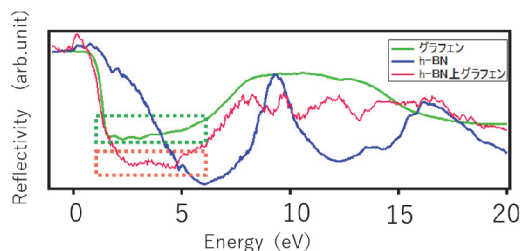


図5 SiC上グラフェンとh-BN上グラフェンの電子反射スペクトル

5. まとめ

SiC基板からのSi熱昇華法を活用して、h-BN上のグラフェンのヘテロエピ成長法を創出した。Si昇華により、遊離された炭素原子がh-BN表面上へ拡散し、自己組織的に結合することで、h-BN上にグラフェンが成長したと考えられる。本法は、グラフェン・デバイスの高性能化に資するものとなる。

文献

- 1) K. L. Shepard et al., J. Hone, Nature Nanotech.5 (2010) 722
- 2) Joung Real Ahn et.al, J. Am. Chem. Soc. 2015, 137, 6897-6905

修士学位論文要約（令和5年3月）

座位での下手投げ動作の機能的電気刺激制御に関する基礎研究

近藤 友樹

指導教員：渡邊 高志

A Basic Study on Functional Electrical Stimulation Control of Underhand Throwing Movement in the Sitting Position

Tomoki KONDO

Supervisor: Takashi WATANABE

The cerebrovascular disease causes paralysis on the extremities as an after-effect. Therefore, rehabilitation is generally undertaken after the disease to recover motor function and prevent motor function decline. Conventional rehabilitation has the problem of repetitive monotonous movements, lowering patients' motivation. As an approach to this issue, this study proposes a rehabilitation method that combines FES (Functional Electrical Stimulation) and sports for the disabled. However, the patient's own limited motor function is a barrier to sports participation. This study examined the feasibility of movement assistance for participation in sports by utilizing FES, focusing on the underhand throwing movement in the sitting position. First, the throwing movements were measured in order to determine FES control movement to throw a ball farther in a sitting position. Then, FES control method to develop the throwing movement was examined. The experimental results suggested that electrical stimulation of the extensor muscle group slightly increased the velocity of the throwing movement and expands the range of movement of the upper limb in the FES control. However, further improvement of the control method is needed to increase the velocity of the upper limb.

1. はじめに

脳血管疾患は片麻痺などの後遺症により手足が麻痺するため、一般的に罹患後はリハビリテーションに取り組むことになる。従来のリハビリテーション方法は、単調な反復動作による患者のモチベーション低下が課題として挙げられる。そこで、先行研究ではFESとゲームアプリによるリハビリテーションが提案されているが¹⁾、自宅で気軽に取り組み可能な反面、他者との交流機会の減少が懸念される。本研究ではFESと障がい者スポーツを組み合わせたリハビリテーションを提案した。障がい者スポーツへの参加により、地域社会への復帰などのメリットがある一方で、患者自身の運動機能の限界がスポーツ参加への障壁となっている²⁾。そこで本研究では、FESを活用することで、スポーツに参加するための動作補助の実現可能性について検討した。座位での下手投げ動作を対象とし、最初に、ボールをより遠くに投球するための投球動作を検討し、次に、その投球動作を実現するためのFES制御方法について検討した。

2. 随意投球実験による投球動作および筋活動の確認

座位での下手投げ動作にwindアップ動作を導入することの有効性および筋活動の確認を目的として、随意での投球実験を実施した。windアップとは図1に示すように、上肢を後方へ伸展する動作を示す。健

常男性6名を対象に、windアップなしとwindアップありにおける座位での下手投げ動作時のボールの飛距離、上肢の運動、筋活動を計測した。このとき上肢に慣性センサや筋電センサを装着した。上肢の運動速度は、手関節部の水平方向および鉛直方向速度の積 V_xV_y より評価した。

実験結果よりボールの飛距離、投球動作中の V_xV_y の最大値ともにwindアップありのときの方が大きかった。これより、windアップの動作により上肢の運動速度が増加し、ボールの飛距離が向上したと考えられる。また、筋電図よりwindアップの動作に上腕三頭

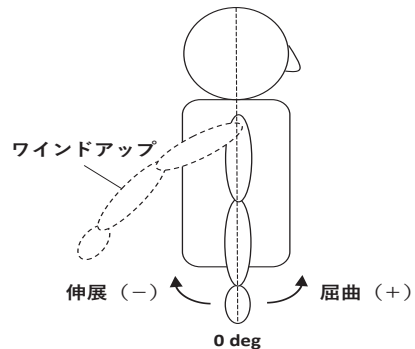


図1 windアップ動作および上肢の矢状面での運動

筋および三角筋後部がそれぞれ関与していることを確認した。以上より、座位での下手投げ動作においてワインドアップ動作を導入することの有効性を確認した。また、屈筋だけでなく、伸筋も活用することで上肢の運動速度を増加させることができると考えられる。

3. 電気刺激実験によるワインドアップ動作の有効性の確認

FES での投球動作におけるワインドアップの有効性の確認を目的として、電気刺激実験を実施した。健康男性6名を対象に、3種類の刺激方法による上肢の運動を慣性センサより計測した。電気刺激を印加する筋の組み合わせとして、上腕二頭筋のみ(1筋刺激)、上腕二頭筋・三角筋前部(2筋刺激)、上腕二頭筋・三角筋前部・上腕三頭筋・三角筋後部(4筋刺激)の3種類について比較した。電気刺激は屈筋群に0.8秒間刺激後、伸筋群に0.8秒間刺激(1筋刺激、2筋刺激は0.8秒間刺激オフ)を3回繰り返した。4筋刺激時の拮抗筋側への刺激電圧は、目視で筋の収縮が確認できる最小値の運動閾値とした。

実験結果より前腕部の最大伸展角度と最大 $VxVy$ の関係を図2に示す。2筋刺激と4筋刺激において最大伸展角度と最大 $VxVy$ の間に相関がみられた。これより、FES による投球動作において伸展運動が大きいほど、上肢の運動速度が増加する傾向にあることが示唆された。一方で、最大 $VxVy$ の全体平均は2筋刺激時に最も大きくなった。4筋刺激時に最大 $VxVy$ が大きくならなかった原因として、被験者によらず固定した0.8秒という刺激時間が短く、十分にワインドアップの動作を構築できなかったこと、筋応答の遅れや拮抗筋側への刺激により、屈筋と伸筋が共収縮し動作を妨げていたことが考えられる。以上より、刺激方法の改善が必要だと考える。

4. 可変刺激タイミング制御の実験的検討

上肢の運動速度を向上させる制御方法の改良を目的として、可変刺激タイミング制御による電気刺激実験を実施した。可変刺激タイミング制御は、前腕部の最大屈曲時に屈筋、最大伸展時に伸筋への刺激を終了し、刺激終了直後に拮抗筋側への刺激を開

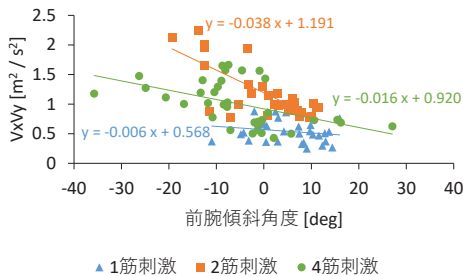


図2 2回目伸展時の前腕部最大伸展角度と3回目屈曲時の最大 $VxVy$ の関係

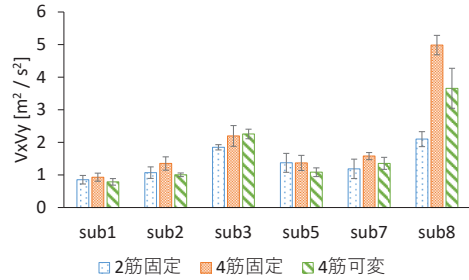


図3 各被験者の最大 $VxVy$ の平均

始する方法(4筋可変)とした。比較対象として2筋および4筋を刺激対象とした、0.8秒間で刺激を切り替える、固定刺激タイミング制御(2筋固定、4筋固定)を行った。拮抗筋側への刺激電圧は0Vとした。

実験結果より各被験者の刺激方法ごとの最大 $VxVy$ の平均を図3に示す。今回提案した4筋可変ではあまり $VxVy$ の増加が確認できなかった。しかし、ほぼ全ての被験者で2筋固定より4筋固定の方が大きいことが確認された。これより、拮抗筋側への刺激を排除して屈筋と伸筋を刺激することで、上肢の運動速度が増加する傾向にあることが示唆された。また、4筋刺激時には2筋刺激時より前腕部の最大伸展角度が大きかった。これより、FES による下手投げ動作におけるワインドアップ動作の実現可能性が示唆された。一方で、随意投球実験で計測された最大 $VxVy$ と比較すると、刺激による動作の最大 $VxVy$ は全体的に小さく、さらなる刺激方法や制御方法の改善が必要である。

5. まとめ

本研究の結果より、座位での下手投げ動作において、FES 制御によるワインドアップ動作の実現可能性が示唆された。また、伸筋群への刺激により投球動作の速度増加が期待できる。一方で、スポーツで要求される速い動作の制御は、従来の日常生活での使用を目的とする FES 制御とは異なるため、投球動作における上肢の運動速度の増加を目的とした制御方法の改良が必要である。

文献

- 1) M. J Fu, M. Y Harley, T. Hisel, R. Busch, R. Wilson, J. Chae, and J. S Knutson, "Ability of people with post-stroke hemiplegia to self-administer FES-assisted hand therapy video games at home: An exploratory case series", Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering, Vol.6, pp.1-11 (2019).
- 2) R. Diaz Jr, E. Miller, E. Kraus, and M. Fredericson, "Impact of Adaptive Sports Participation on Quality of Life", Sports Medicine and Arthroscopy Review, Vol.27, pp.73-82 (2019).

修士学位論文要約（令和5年3月）

混合変調半導体レーザーの変調帯域拡大に関する研究

島 卓未

指導教員：八坂 洋

Study on Modulation Bandwidth Expansion
of Hybrid Modulation Semiconductor Laser

Takumi SHIMA

Supervisor: Hiroshi YASAKA

In this study, we measured and analyzed the small signal modulation response of an hybrid modulation laser (HML) with a long cavity length of 625 μm precisely. We confirmed that the HML showed high PPR frequency of 60 GHz and had a wide bandwidth close to 80 GHz. We also designed and measured a HML with a shorter cavity length of 410 μm , which had high PPR frequency of around 120 GHz. By improving the measurable modulation frequency range of the measurement setup, we confirmed that the short cavity length HML had wider E/O modulation bandwidth than 124 GHz and demonstrated that the HML has potential as an ultra-high-speed DML.

1. はじめに

現在、短距離通信の大容量化に向け、多値化や多重化技術の導入が進められているが、更なる高速化には光源高速化によるシンボルレートの向上が必要不可欠である。近年、直接電流変調半導体レーザーを高速化する手法として外部共振器付与による光子共鳴(PPR: Photon-Photon Resonance)効果の導入が注目されている¹⁾。小信号応答特性上で PPR 効果による第 2 の共振ピークを形成することで変調帯域を 108 GHz まで拡大した報告がある²⁾。しかし、直接電流変調方式では緩和振動周波数以上の高周波領域における急激な感度劣化のために変調帯域の拡大幅が制限されていた。この問題に対し、直接電流変調と共振器内部損失変調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、PPR 効果と組み合わせることで変調帯域を 66 GHz 以上にまで拡大できるという実験結果が報告されている³⁾。本研究では、変調特性評価系の高 SN 比化を図り 80 GHz まで測定帯域を拡大し、共振器長 625 μm の混合変調半導体レーザーの変調特性を詳細評価した。また、100 GHz 以上の超広帯域な応答特性の実現に向け、共振器長 410 μm の短共振器混合変調半導体レーザーの設計を進め、小信号応答特性の評価を行った。

2. 混合変調半導体レーザーの数値解析

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。InAlGaAs-MQW-DFB 活性領域に外部共振器としても作用する共振器内部損失変調(ICLM: intra-cavity loss modulation)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。

3. 混合変調半導体レーザーの小信号応答特性測定実験

本実験では電極パッド等の CR 時定数に依存しない混合変調半導体レーザー素子本来の小信号応答特性を測定するために光励起方式を採用した⁴⁾。図 2 に小信号応答特性の測定系構成を示す。光励起方式では外部で生成した強度変調信号光を素子の射出端から注入し、素子の DFB 活性領域および損失変調領域で吸収させることで強度変調を施す。強度変調信号光は、波長可変レーザーから出力された連続光を LN-MZM によって強度変調し生成する。この際、DFB 活性領域における直接利得変調が誘起されることを避けるために強度変調信号光の波長を 1480 nm に設定した。DFB 活性領域で励起された電子(キャリア密度)と損失変調領域の吸収係数はある特定の変調比率で変調されることになる。また、シグナルジェネレータからの出力周波数 f_m の 2 倍波の変調サイドバンド強度を測定することでシグナルジェネレータの帯域(40 GHz)の 2 倍の変調周波数領域(80 GHz)の応答感度の評価を実現している。

図 3 に長共振器混合変調半導体レーザー(共振器長:625 μm)の小信号応答特性を示す。DFB 活性領域への注入電流は $I_{DFB} = 105 \text{ mA}$ 、ICLM 領域への印加逆バイアス電圧は $V_{ICLM} = 0.9, 1.0, 1.1 \text{ V}$ にそれぞれ設定した。小信号応答特性では、ICLM 領域への印加逆バイアス電圧を大きくするほど高周

波数領域の変調感度が高くなり、本混合変調半導体レーザで 80 GHz に迫る変調帯域幅が実現できることを確認した。また、変調周波数 65 GHz 付近で PPR ピークを確認でき、PPR 効果が変調帯域幅の拡大に効果的に寄与できていることを確認した。

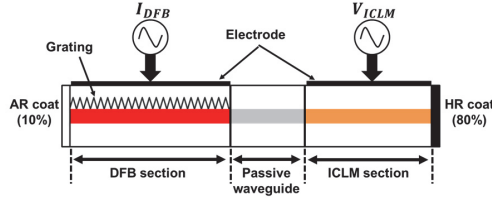


図1 混合変調半導体レーザの構造図

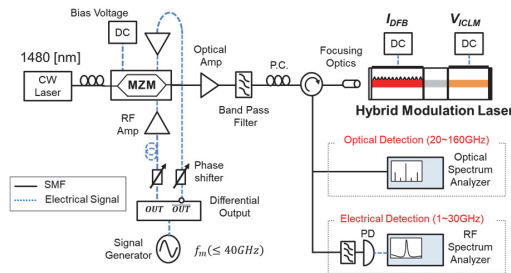


図2 小信号応答特性の測定系構成

4. 混合変調半導体レーザの評価

更なる高速化を目指し、短共振器化した混合変調半導体レーザ(共振器長: 410 μm)を設計・試作し、小信号応答特性を評価した。短共振器化により PPR ピーク周波数が 120 GHz 程度になることを考慮し、シグナルジェネレータで設定した周波数 f_m の 4 倍の帯域までの評価 (160 GHz) を可能とするために大振幅 $4f_m$ 強度変調信号光の生成を行った。LN-MZM の動作点を透過率が最大になる点で駆動し、印加変調電圧振幅を $3V_{\pi}$ とすることで、搬送波および ± 1 次の高調波成分を抑制して ± 2 次の高調波成分を効率的に生成した⁵⁾。

変調周波数 140 GHz まで短共振器混合変調半導体レーザを評価した結果を図 4 に示す。直接電流変調に比べて共振器内部損失変調を相対的に大きくするために、強度変調光の波長を 1493 nm にシフトし、DFB 活性領域での光の吸収量を減少させた。120GHz 付近に設定した PPR ピークが変調帯域の拡大に効果的に寄与したことで 124 GHz の小信号変調帯域幅を確認できた。

5. まとめ

本研究では、超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数値解析・検証実験を行った。長共振器混合変調半導体レーザでは

80 GHz に迫る広帯域な変調帯域幅を有することを実証した。また、更なる高速化に向け短共振器混合変調半導体レーザを設計・試作し、124 GHz の変調帯域幅を有する半導体レーザを実現した。

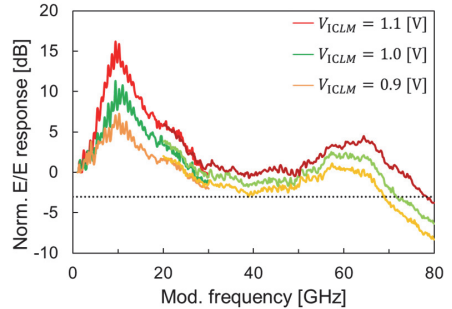


図3 長共振器混合変調半導体レーザの小信号応答特性

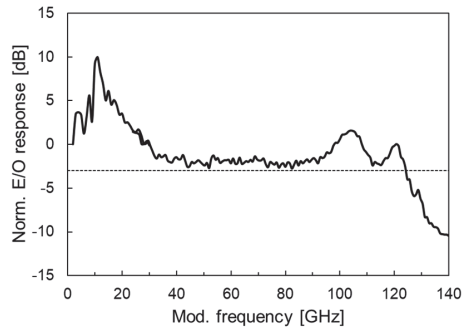


図4 短共振器混合変調半導体レーザの小信号応答特性

文献

- 1) Y. Matsui, R. Schatz, G. Carey, T. Sudo, and C. Roxlo, ISLC 2016, paper WA1 (2016).
- 2) S. Yamaoka, N.-P. Diamantopoulos, H. Nishi, R. Nakao, T. Fujii, K. Takeda, T. Hiraki, S. Kanazawa, H. Tanobe, T. Kakitsuka, T. Tsuchizawa, F. Koyama, and S. Matsuo, ECOC 2019, paper PDP.2.1 (2019).
- 3) M. Kanno, N. Yokota, and H. Yasaka, IEEE Photon. Technol. Lett. 32, 839 (2020).
- 4) B. Su et al., IEEE J. Quantum Electron., vol. 28, no.1, pp. 118-127, (1992).
- 5) H. Kiuchi, T. Kawanishi, ISBN: 978-953-307-088-9, (2010).

修士学位論文要約（令和5年3月）

グラフェンと非熱平衡流動相との界面における発電特性

武田 光流

指導教員：齊藤 伸， 研究指導教員：岡田 健

Characteristics of Power Generation at the Interface between Graphene and Non-Thermal Equilibrium Fluid Phase

Hikaru TAKEDA

Supervisor: Shin SAITO, Research Advisor: Takeru OKADA

Power generation at flowing water and graphene is an effective way to reuse low-temperature waste heat. In this thesis, the effects of flow conditions, including turbulent/laminar flow and temperature, on the power generation were investigated. The origin of the electromotive force (EMF) is the electronic state change of graphene, resulting from flow transition; from turbulent to laminar flow along flow direction. In the presence of non-thermal equilibrium flow, the flow-EMF and the thermal-EMF were generated simultaneously, indicating the graphene-flow system has potential for use of waste heat.

1. はじめに

近年、脱炭素社会の実現に向けて、低温排熱を効率的に再利用する新しい技術が求められている。温排水は低温排熱の温度域を広くカバーするため、流水をエネルギー源として利用することが有効だと言える。近年、機械的なエネルギー変換を行わない流水発電システムが報告され、流水とグラフェンを用いた発電システム¹⁾²⁾が次世代の発電システムの候補として期待されている。しかし、発電メカニズムについてはまだ議論の余地があり、流動状態や熱拡散がグラフェンの電子状態に与える影響は解明されていない。本論文では、流れ方向に熱拡散がある流体（非熱平衡流）とグラフェンとの界面における発電特性について研究した。

2. 実験方法

化学気相成長法により合成したグラフェンを、親水化処理をしたガラス基板上に転写し、グラフェン/基板上に金電極を蒸着した。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をシリンジポンプで吸引することで水流を印加した。電極の両端に変負荷抵抗を接続し、出力電力が最大になるときの電圧を測定した。起電力を算出し、チャンネル面積で規格化し評価を行った。

3. 発電現象における流動状態の効果

流動状態の影響を検討するために流路サイズの異なる複数の流路を作製し起電力を測定した。図1に示すように、同じ流速でも流路サイズのアスペクト比によって起電力の大きさが異なり、流動状態と起

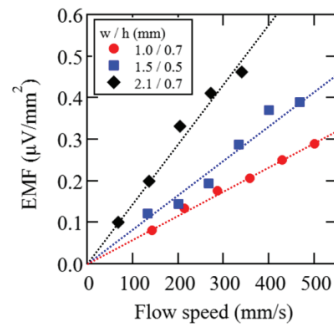


図1 異なる流路サイズにおける起電力の流速依存性。wは流路の幅、hは流路の高さを示す。

電力には明確な相関があることが分かった。

また、空間的な流動の発達が起電力に及ぼす影響を検証するため、流れの方向によって流動状態の異なる流路を作製し、数値シミュレーションとあわせて解析を行った。流動状態は流路内バッファ領域の有無に依存し、理想的な層流と乱流-層流遷移が起こる場合に大別できることがシミュレーションによって明らかになった(図3)。また、乱流から層流に遷移する過程が起電力の増加に効果的であることが実験的に示された(

図4)。このときグラフェンの電子状態は、乱流領域でガラス基板の表面電位によってpドーピングされ、層流領域では電気二重層がつくる電界によってn型にシフトする。その結果、水流方向に対して不均一なキャリア濃度となる。これらのことから流動による起電力発生には乱流からすみやかに層流に遷移する流

動が必要なことが明らかになった。

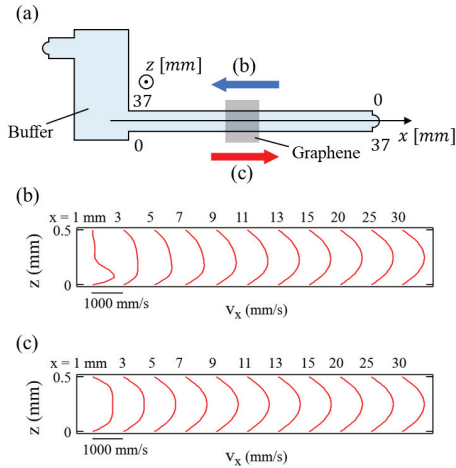


図3 シミュレーションによる速度分布の可視化 (a)バッファ付流路の概略図、(b)乱流・層流、(c)層流

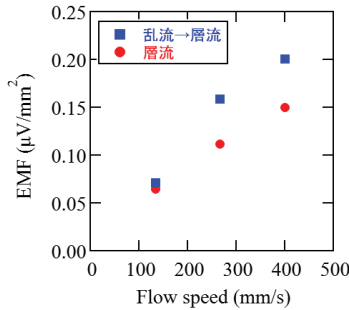


図4 流動の遷移と起電力の流速依存性

次に流入口形状に段差をつくり流れに擾乱を与える流路(Step 流路)を作製し起電力を測定した。図2に示すように、Step 流路では段差のない non-step 流

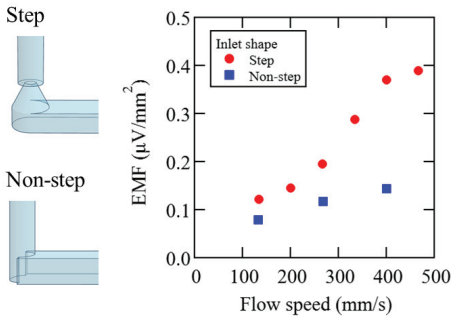


図2 流入口の形状変化による起電力の向上。 Step 流路の方がより強い乱流を生成する。

路よりも起電力が増加した。流路形状やサイズに依らず、流入口形状だけで起電力を増加させることが示され、将来のデバイス設計において重要な要素を見出した成果といえる。

4. 非熱平衡流による発電特性

流れ方向に熱拡散のある非熱平衡流の影響について温水を用いた実験で検証した。温水を用いた場合、室温の水よりも高い起電力が発生し、高温条件においてその効果が顕著に観察された(図5)。非熱平衡流による起電力増加は、低粘性条件による乱流形成と流路内の温度勾配による熱起電力が要因だと考えられる。水温の上昇に伴い水の粘度は減少するため、乱流生成が促進され流動起電力が増加する。一方、流路内では熱が壁面から拡散し水流方向に温度勾配が形成される。このとき温度差が生じたグラフェン両端ではゼーバック効果により熱起電力が発生する。これらの要因は互いに影響を及ぼす。図5において、高い温度帯では起電力の流速依存性はほぼ一定の値であり、流速に対して線形増加する流動起電力と流速に対して減少する熱起電力が競合していることを示していると考えられる。

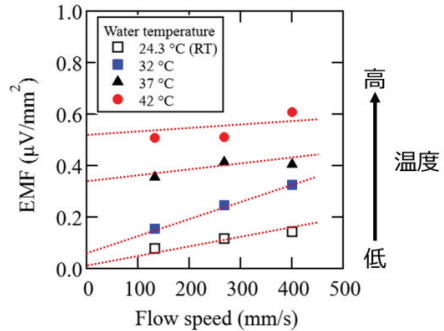


図5 異なる温度帯における起電力の流速依存性

5. まとめ

本論文では、低温排熱利用に適用可能な流水とグラフェンを用いた発電システムについて研究を行った。流動による起電力は乱流・層流遷移によるグラフェンの電子状態変化が重要であることを見出した。また、非熱平衡流が存在する場合には熱起電力と流動起電力の同時発生により高い出力が得られること明らかにした。

文献

- 1) S. S. Kwak et al., ACS Nano (2016), 10, 8, 7297–7302
- 2) K. Kuriya et al., Appl. Phys. Lett. 117, 123905 (2020)

修士学位論文要約（令和5年3月）

強磁性体/絶縁体接合における交換相互作用の 機械学習モデルに関する研究

中村 友哉

指導教員: 白井 正文, 研究指導教員: 辻川 雅人

Study on machine learning model of exchange interaction in ferromagnetic/insulator junction

Yuya NAKAMURA

Supervisor: Masafumi SHIRAI, Research Advisor: Masahito TSUJIKAWA

In this thesis, a machine learning model of exchange interaction at the interface of Heusler alloy $XX'YZ/MgO$ heterojunctions was constructed. For the XX' -terminated junctions, the correlation coefficient was obtained to be 0.49 and 0.52 for the first and third layers from the interface, respectively, while it takes a higher value 0.70 for the second layer. On the other hand, for the YZ -terminated junctions, the correlation coefficient was obtained to be 0.10 for the first layer, while it takes higher values, 0.75 and 0.77, for the second and third layers, respectively. In addition, the importance of the feature variables was calculated by using the prediction model, and the magnetic moment of the bulk plays the most important role in the prediction of the exchange interaction at the interface.

1. はじめに

ホイスラー合金は高スピン偏極率、高キュリー温度などの特性からトンネル磁気抵抗(TMR)素子への応用等、スピントロニクス材料として有望視されてきたが、室温での高いTMR比の発現は実現されていない。その原因の1つとして、強磁性層と絶縁層との界面におけるスピンの熱揺らぎがあげられる⁽¹⁾。したがって、室温で高TMR比を維持するためには、界面でのスピンの熱揺らぎを抑える必要がある。本研究では、熱揺らぎに関連する物性値としてスピン同士の結びつきの強さを表す定数である交換相互作用に着目した。実験や計算データの増加や計算機の計算能力の向上に伴い、近年注目を浴びている分野としてマテリアルズインフォマティクス(MI)がある⁽²⁾。例として、四元ホイスラー合金/酸化物界面において、機械学習を用いて交換スティフネスの予測モデルを構築し、仮想スクリーニングによる高スティフネス定数を持つ合金の探索に成功している⁽³⁾。本研究はこの研究を拡張し、ホイスラー合金 $XX'YZ/MgO$ ヘテロ接合界面における交換相互作用の高精度な機械学習モデルの構築を目的とする。ここで X, X', Y は遷移金属元素、 Z は典型元素を表す。

2. 使用データ

本研究で作成したデータベースには、71種のホイスラー合金/MgO接合に対して第一原理計算した物性値を収録した。本研究で予測する物性値は、 XX' 接合及び YZ 接合の各層毎の交換相互作用である。ホイスラー合金/MgO界面に近い順番で第一層、第二層、第三層と定義し、その構造を図1に示す。なお、機械学習にはLightGBMを用い、表1に示した特徴量を考慮した。

スラー合金/MgO界面に近い順番で第一層、第二層、第三層と定義し、その構造を図1に示す。なお、機械学習にはLightGBMを用い、表1に示した特徴量を考慮した。

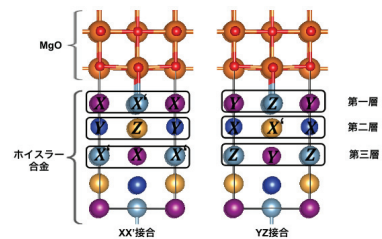


図1 XX' 接合及び YZ 接合の構造

表1 データベースに収録した特徴量

計算番号	イオン半径	熱伝導率
合金名	族番号	電気陰性度
原子番号	価電子数	イオン化エネルギー
原子半径	価電子数の平均	バルクの磁気モーメント

3. 特徴量と交換相互作用の相関

予測対象である交換相互作用と特徴量との相関を調べた。XX'接合・YZ接合両方において、相関係数が0.60程度の特徴量が散見されるに留まり、一般的に「強い相関」とされる0.70を超える特徴量は見られなかった。しかし、第三層に近づくにつれ、相関係数の高い物性値が多くなることがわかった。これより、予測時に精度がそこまで高くないものの、第三層に近づくにつれ精度が高くなることが予想される。

4. 交換相互作用の予測

XX'接合の場合、第一層に関しては、相関係数が0.49、第三層に関しては相関係数が0.52と精度が低くなってしまったが、第二層では0.70と相関係数が高くなり、高い予測精度を実現することができた。図2にXX'接合の第一層における交換相互作用の予測結果を、図3にXX'接合の第二層における交換相互作用の予測結果を示す。

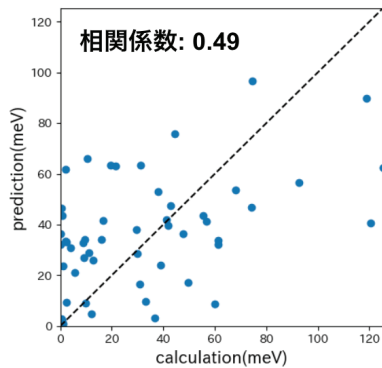


図2 交換相互作用の予測結果(XX'接合第一層)

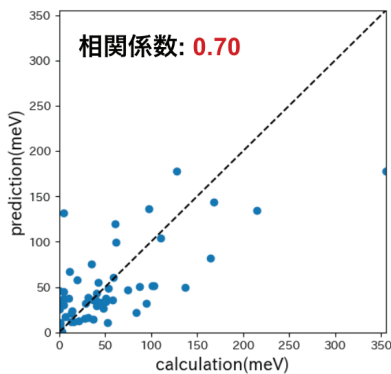


図3 交換相互作用の予測結果(XX'接合第二層)

YZ接合の場合、第一層に関しては、相関係数が0.10と精度が低くなってしまったが、第二層では0.75、第三層では0.77と相関係数が高くなり、高い予測精度を実現することができた。

XX'接合とYZ接合はどちらも第一層の予測精度が低い結果となったが、これは、交換相互作用と相関のある特徴量が第一層では少なく、第二層、第三層では多いことが原因であると考えられる。また、予測精度が

低下する原因としては、「データ量が少ないこと」、「第一層とそれ以外の層のモデルにおいて特徴量の重要度の重みが異なること」の二つが考えられる。

5. 特徴量の重要度

機械学習による交換相互作用の予測において、特徴量がどのように寄与しているかを調べた結果、バルクの磁気モーメントの重要度が最も高くなることが確認できた。反対に、族番号とイオン半径に関しては、予測時に全く参考にしていないことがわかった。

先の結果を受け、重要度の低い特徴量から順に学習データから取り除いていき、予測精度の変化を計測した。各層毎の特徴量の数と予測精度の変化を表したものを図4に示す。第一層の結果を見ると、特徴量の数が減っていくにつれ精度が向上し、特徴量がバルクの磁気モーメントのみの場合、相関係数が0.6まで上昇した。反対に、第二層と第三層は、特徴量の数が減っていくにつれ精度が低下した。このことより、第一層に関しては、バルクの磁気モーメントの重要度の比重が大きいことがわかる。そして、層毎に精度を最大化するためには、第一層とそれ以外の層で個別にモデルを構築する必要があると考察する。

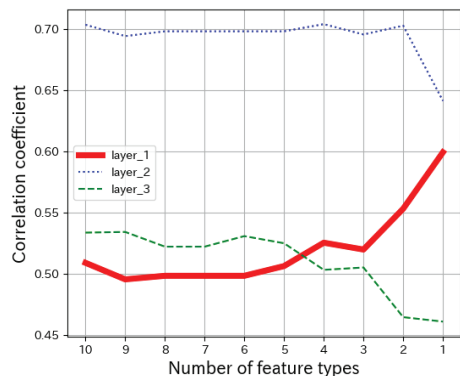


図4 特徴量の個数と各層毎の予測精度の変化

5. まとめ

ホイスラー合金/MgO界面において交換相互作用の予測モデルを構築した。第一層に関しては、精度が低くなってしまったが、XX'接合に関しては第二層の、YZ接合に関しては、第二層、第三層の高精度な予測モデルを構築できた。層毎に精度を最大化するためには、第一層とそれ以外の層で個別にモデルを構築する必要があることが確認できた。

文献

- 1) Y. Miura *et al.*, Phys. Rev. B **83**, 214411 (2011).
- 2) K. Rajan. Materialstoday. **15**, 470 (2012).
- 3) 山吉諒, 修士学位论文(2020).

修士学位論文要約（令和5年3月）

熱延伸法を用いたプローブ型 多機能電気化学デバイスの開発に関する研究

西本 理乃

指導教員：吉信 達夫， 研究指導教員：宮本 浩一郎

Development of Probe-Type Multifunctional Electrochemical Devices
Using Thermal Drawing Method

Rino NISHIMOTO

Supervisor: Tatsuo YOSHINOBU, Research Advisor: Koichiro MIYAMOTO

The brain, which is responsible for directing the internal functions of the body in all vertebrates, requires that the proper ion balance and neurotransmitter function within it are always maintained. In particular, pH and dopamine are important indicators of brain health since any abnormality in their control can cause serious diseases. In this study, we developed a "probe-type multifunctional device" as a technology to monitor these indicators by direct measurement in the brain. For the development of the device, we used fine composite bundle fibers fabricated by the thermal drawing method. This enabled simultaneous measurement of up to 63 points in a small area and high spatial resolution in pH measurement. In addition, by incorporating an electrode made of functional carbon composite material into the composite bundle fiber, a dopamine concentration measurement function was successfully realized.

1. はじめに

全ての脊椎動物において身体の内部機能に指令を発する役割を司る脳は、その内部での適切なイオンバランスや神経伝達物質のはたらきが常に正常に維持される必要がある。特に pH とドーパミンは、制御に異常が発生するとそれぞれ脳虚血¹⁾や精神疾患、パーキンソン病²⁾等を引き起こすため、脳の健康指標として重要である。そこで本研究では、これらを脳内での直接測定によりモニタリングする技術として図1に示す「プローブ型多機能デバイス」を提唱する。pH とドーパミン濃度の測定機能を高い空間分解能にて両搭載した、脳内への挿入を可能にする微小サイズのプローブ型多機能デバイスを開発することを目的とし、将来的には生体にやさしいデバイスとして医療現場での応用を図る。

2. 多点同時 pH 測定の実現

pH 測定機能を有するプローブ型 LAPS デバイスを試作し、その性能を調査した。LAPS が持つ“変調周波数が異なる変調光を複数同時に照射すると、1 枚の基板上で多点同時測定が可能である”という特徴から、最大 64 個の独立変調光を照射できる「光源用バンドルファイバ」を熱延伸法で自作し、デバイスと組み合わせることで 1.5 mm 四方の微小領域において先行研究の 15 点から大幅に増加した 62 点での同時測定が実現した。またデバイスの pH 感度についても先行研究時より改善傾向が見られ、プローブ型多機能デバイスに高空間分解能を持つ多点同時 pH 測定機能を搭載できる可能性を見出した。

3. ドーパミン濃度測定用電極の検討

ドーパミン濃度測定に使用する作用電極の素材として、熱延伸時の扱いやすさ・対ドーパミン感度・長期安定性の観点から機能性カーボン複合材料が有効であることを踏まえ、その一例としてカーボンナノチューブ(CNT)を含有する新規材料「CNT-CPE」の各種評価を行った。熱特性の調査では、熱延伸の際に CNT を多く含むサンプルはそうでないサンプルよりも予想融点が低くなる傾向にあることを突き止めた。対ドーパミン感度とその長期安定性の検証では、CNT 装入率が高いサンプルほどその性能が優れていることを発見した。

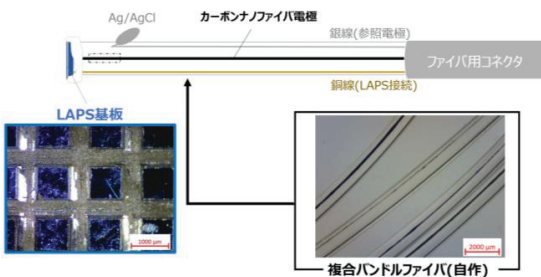


図1 プローブ型多機能デバイスの構成

4. プローブ型多機能デバイスの実装と評価

多点同時 pH 測定に成功したプローブ型 LAPS デバイスに、ドーパミン感度等に優れた性能を持つと明らかになった機能性カーボン複合材料による作用電極と参照電極を付与することで、pH とドーパミン濃度の両方を測定できるプローブ型多機能デバイスを開発した。デバイスに用いる複合バンドルファイバは熱延伸法を用いて自作し、直径 0.8~2.0 mm 程度の細さのファイバを大量に作製することに成功した。これを用いたプローブ型多機能デバイスの検証において、pH 感度は約 52.4 mV/pH、対ドーパミン感度は濃度 200 nM 以上の範囲で $3.46 \times 10^{-5} \text{ A}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{M})$ の値を記録し、高い性能を示した(pH 感度については図2参照)。なお、pH 測定では 2.0 mm 角の LAPS センサ上における 63 点同時測定にも成功した。

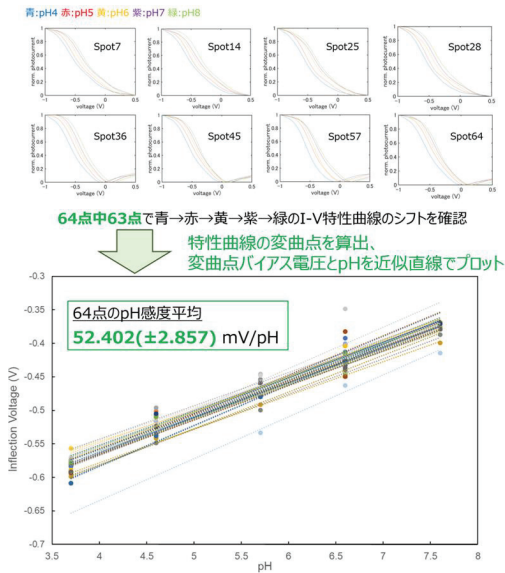


図2 プローブ型多機能デバイスによる 63 点同時 pH 測定機能の検証

5. プローブ型多機能デバイスによる測定の応用例

デバイスに搭載された 2 機能のうち pH 測定について、pH バッファではない実例に対してその値を求めることができるかについて実験を行った。今回は、生体への応用だけでなく建築分野での応用も見据えて硬化前のセメント試料をサンプルとした。セメントとフライアッシュ(コンクリートの劣化を防ぐためにセメントと混ぜられることの多い石炭灰)の比を変えた粉末を純水に溶かした試料液に対して、別途求めたデバイスの pH 感度をもとに 16 点同時測定を行ったところ、その平均値は図3のようにセメント比が高くなるほど強アルカリ性に変化する結果となった。セメントが水

和反応により水酸化カルシウムを発生させることから、この傾向は理論的に正しいと言え、現象を正しく捉えている。市販のメーターによる測定値との差が 0.08~0.37 の範囲に収まった。

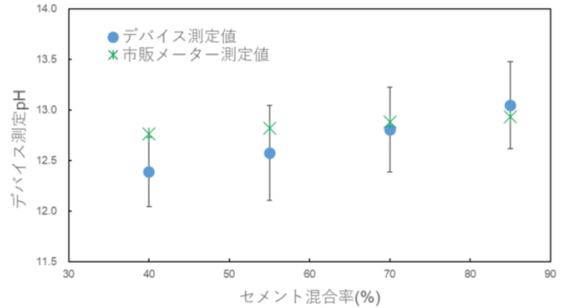


図3 セメント比が異なる液状コンクリートサンプル内における pH 測定結果

6. まとめ

熱延伸法により作製した複合バンドルファイバを用いてプローブ型多機能デバイスを開発し、pH とドーパミン濃度の測定において医療応用が期待できる感度を記録した。光源用バンドルファイバとの組み合わせにより pH 測定では最大 63 点での多点同時測定を達成し、具体例での測定精度も確認できた。ドーパミン濃度測定では 200 nM 以上という制約こそあるが機能性カーボン複合素材による作用電極の有用性を示す結果となった。多機能・微小・高空間分解能の 3 つの特徴を有するデバイスを実現したと言えるが、さらなる小型化やドーパミンに対する感度がより高いカーボン複合素材の応用によって一層の性能向上が期待できる。

文献

- 1) Kaoru Beppu, Takuya Sasaki, Kenji F. Tanaka, Akihiro Yamanaka, Yugo Fukazawa, Ryuichi Shigemoto and Ko Matsui, "Optogenetic countering of glial acidosis suppresses glial glutamate release and ischemic brain damage", Neuron, January 22, 2014
- 2) 田辺三菱製薬 HP、「パーキンソン病はどんな症状があらわれる？発症から受診、診断まで」(https://michi-annai.jp/symptom_parkinson.html)

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの時間を割いてご指導いただいた東北大学学際科学フロンティア研究所 郭媛元助教に心より感謝申し上げます。

修士学位論文要約（令和5年3月）

窒素固定反応のための液面非熱プラズマ生成

藤田 立樹

指導教員：金子 俊郎， 研究指導教員：高島 圭介

Non-thermal Plasma Generation at Liquid Interface for Nitrogen Fixation Ritsuki FUJITA

Supervisor: Toshiro KANEKO, Research Advisor: Keisuke TAKASHIMA

Nitrogen fixing reaction induced by gas-liquid interfacial plasma over high-speed liquid flow was experimentally studied. A gas-liquid interfacial plasma supplying nitrogen atoms to high-speed liquid flow surface was developed using high-frequency discharge and a three-electrode method. A developed liquid sampling method using an air jet enables discussion on reactants generated at the plasma-liquid interface distinguished from gas-dissolved reactants using the velocity difference between the liquid flow and the air flow. Comparison of the measured ammonium ion and the other species at various delay for the air-jet sampling suggests that a significant amount of ammonia may be a plasma-liquid interface reactant. Photographs of plasma discharges into the liquid flow showed interference of the plasma with the liquid flow.

1. はじめに

近年持続可能な窒素固定法として、空気中の窒素をプラズマで化合物窒素に固定するプラズマ窒素固定法が提案されている。この方法は電気をエネルギー源とするため、再生可能エネルギーを利用しやすいという利点がある¹⁾。また、水を水素源とするプラズマ窒素固定において還元態窒素であるアンモニアが生成されると報告されており^{2,3)}、液体の水界面における窒素プラズマによる窒素固定反応の重要性が高まっている。特に窒素原子と水との気液界面反応が指摘されているが、気液界面反応物と気相生成反応物の溶解は区別が困難であった。本研究では、気液界面に安定して窒素原子を供給できる放電プラズマ源開発と、気液界面反応を区別して観測可能なシステムの構築を目的とする。

2. 高速液流型気液界面プラズマ放電装置

実験装置概略図を図1に示す。混相流を横切る放電プラズマ生成の必要から、イオンドリフト依存の放電形態(γモード)を抑制するために、放電周波数を60kHz程度に高め、αモードでの電子電離放電による窒素プラズマ生成を誘導した。αモードでの長ギャップの絶縁破壊を実現するため、容量結合された第3電極(浮遊電極)を導入した。同時にガス(N₂/Ar)導入することで、酸素の少ない環境での活性種の測定に期待した。図2に、本研究で開発したプラズマ気液界面反応物を含む液体のサンプリング法の模式図を示す。本手法では、プラズマ生成位置から空気の噴射口までの距離(図中20cm)で、下流へ流れる液体の移流時間に相当する時刻で、プラズマ放電

と空気噴射のバルブに入力信号の遅延時間操作し、横から空気を20ms程度噴射し、プラズマ気液界面反応物を含む液体を、空間選択的にサンプリングする。この方法により気液界面反応物と気相反応物の区別化を試みた。また、屈折率勾配を可視化するシュリーレン法をパルスLED光源で駆動し、放電後特定時刻の液体の概形を影として撮像しプラズマによる液体の運動を可視化した。

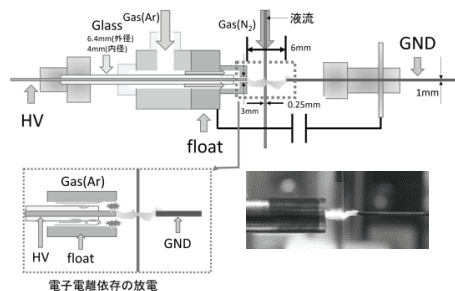


図1 実験放電装置の概略図と放電の写真

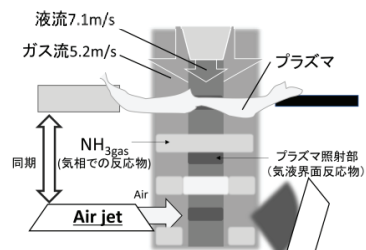


図2 液体サンプリング法の模式図

3. 遅延時間変化による液中活性種計測

図3(a)に空気噴射遅延時間(20ms幅)を変化させたときのアンモニウムイオン(NH₄⁺)の濃度変化を示す。このとき遅延時間が(22.5 ms-42.5 ms)で濃度が最大となった。この遅延時間範囲に、プラズマ気液界面反応物が空気噴射位置に到達する時間 28.5 msが含まれており、プラズマ気液界面反応物の影響が考えられる。その一方で、(2.5 ms-22.5 ms)や 62.5 ms以降では検出限界以下となった。より詳細に遅延時間を操作した結果を図3(b)に示す。28.5 msを含む二つの遅延時間範囲(22.5 ms-42.5 ms)と(26.5 ms-46.5 ms)において高濃度となり、それ以降では徐々に濃度が低下している。28.5 msを含まない遅延時刻では、気相反応物が溶解しながら液体に蓄積することと、38.5 ms以降の気相反応物が液体と共に空気噴射により吹き付けられた影響が考えられる。28.5 msを含む遅延時刻において優位に濃度が高いことから、有意な量のアンモニアが気液界面反応物である可能性が考えられる。

同様の手法で NO₂ の濃度変化を観測し(図4)、NO₂は28.5 msを含む遅延時刻においてのみ検出されることが示された。このことから気相反応物の NO₂生成量への影響はほとんどないと考えられる。また、

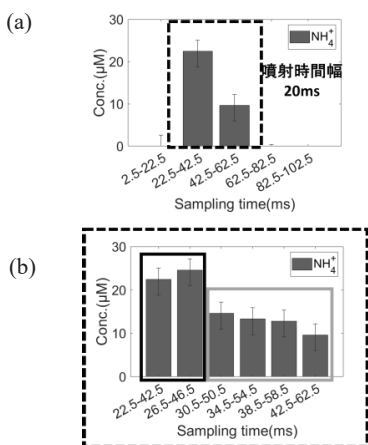


図3 遅延時間((a)0-80ms,(b)20-40ms)を変化させたときのアンモニウムイオンの濃度変化

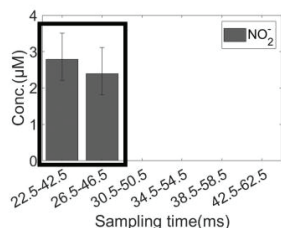


図4 遅延時間を変化させたときの NO₂ の濃度変化

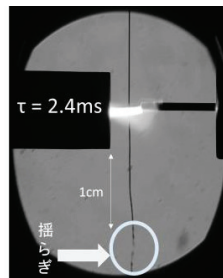


図5 液流へのプラズマ放電の様子

28.5 ms を含む範囲で有意差がなかったことと、30.5 ms 以降に検出されないことから、気液界面反応物は 2ms 未満の範囲(28.5 ms - 30.5 ms)で局在していると考えられる。これは、窒素と水のプラズマ気液界面では NO₂ のほとんどが気液界面で生成されていると考えられ妥当であると同時に、空気噴射による液体サンプリング法の妥当性を担保する結果である。このため、NH₄⁺ は気液界面反応物と気相反応物両方があり、その実験的区別化が本手法で一定程度可能となった。

4. プラズマ放電による液流の様子

シュリーレン法によりプラズマ放電後の液流の様子を撮影した。図5は放電とLED光源発光(5µs)各10回を多重露光し、プラズマ発光と遅延時刻における平均的な液注流の概形を可視化している。放電後に液流に揺らぎが生じ、伝搬の様子が観測され、プラズマによる液流への干渉さらに、遠方では液流を分断した。この揺らぎの伝搬速度は液流よりわずかに速く、液柱流を伝搬する波動が観測できた可能性もある。このプラズマの液流運動への影響は、気相生成物の溶解に影響を及ぼすと考えられる。

5. まとめ

気液界面に安定して窒素原子を供給できる放電プラズマ源開発と、窒素原子の気液界面反応を区別できるシステムの構築を目的とし、高周波・三電極法による高速液流プラズマ生成装置、および気液界面反応物と気相反応物の区別化を、空気噴射サンプルにより実施できる可能性を明らかにした。さらに、気相反応物の溶解に影響を及ぼすプラズマから液流への干渉を観測した。

文献

- 1) W. Wang, B. Patil, S. Heijkers, V. Hessel, and A. Bogaerts: *ChemSusChem*, **10** (2017) 2145.
- 2) T. Haruyama, T. Namise, N. Shimoshimizu, S. Uemura, Y. Takatsuji, M. Hino, R. Yamasaki, T. Kamachi, and M. Kohno: *Green Chem.* **18** (2016) 4536 – 4541.
- 3) Y. Gorbanev, E. Vervloessem, A. Nikiforov, and A. Bogaerts: *ACS Sustain. Chem. Eng.* **8** (2020) 2996–3004.

修士学位論文要約（令和5年3月）

感覚運動制御を担うレザバーニューラルネットワークの構造最適化に関する研究

藤本 ありさ

指導教員：佐藤 茂雄， 研究指導教員：山本 英明

Study on Optimization of Reservoir Neural Network Structure for Sensorimotor Control

Arisa FUJIMOTO

Supervisor: Shigeo SATO, Research Advisor: Hideaki YAMAMOTO

In this study, to eliminate the trade-off between calculation cost and information processing performance of recurrent neural networks (RNNs) and reservoir computing, we proposed a novel method for adjusting the random matrix used in the reservoir layer of reservoir computing processing sensorimotor information based on the mathematical characters of optimized weight matrix of RNN layer. First, we analyzed optimized weight matrix of RNN layer and found that it tended to be more asymmetry compared with the Gaussian random matrix before learning. Next, we generated random matrices possessing various degrees of symmetry and compared the reservoir computing performance using these artificial matrices as the reservoir layer. These simulations revealed that the adjusting the symmetry of the weight matrix to fit network dynamics into the frequency of the output signal is an effective method.

1. 序論

視覚・聴覚情報の認識や運動情報の生成といった感覚運動制御は、哺乳類の脳皮質で行われる基本的な情報処理の1つである。これまで、動物実験や数理モデルを用いた研究により、生体での感覚運動制御のメカニズムの解明が進められてきた[1, 2].

数理モデルの1つであるリカレントニューラルネットワーク(RNN)は、生体の神経細胞のネットワーク構造を模したモデルであり、再帰結合を持つことによって時空間情報の保持に優れている。RNNを用いる情報処理では、一般に、入力層・RNN層・出力層の結合行列をタスクに合わせて最適化し、性能を向上させる。先行研究[1]では、特にRNN層の最適化が複雑な情報処理における性能向上に有効であると報告されているが、RNN層の学習は計算コストが非常に大きい。一方、計算コスト削減の為、RNN層の結合を固定して出力層のみ最適化するレザバー計算も提案されている。しかし、複雑なタスクにおけるレザバー計算の出力性能は、RNN層を最適化したRNNに及ばない。

そこで、本研究は、RNNとレザバー計算に見られる出力性能・計算コストのトレードオフ解消を目的とする。感覚運動制御タスクに合わせて最適化したRNNの結合行列を解析し、最適化による数理的特徴の変化に基づいて高性能・高効率なレザバー計算のレザバー層の設計手法を提案する。

2. リカレントニューラルネットワークの結合行列の数理的解析

はじめに、音声認識・筆記文字生成タスクを行うRNN(図1)を用い、最適化したRNN層の結合行列 W^R の荷重値分布・結合強度・クラスター性・対称性を評価した。このモデルは、式(1)に示す発火頻度モデルニューロンで構成される。

$$\tau \frac{dx_i}{dt} = -x_i + \sum_{j=1}^M W_{ij}^I u_j + \sum_{j=1}^N W_{ij}^R r_j + I_i^{noise} \quad (1)$$

ここで、 τ は時定数、 x_i はニューロン*i*の状態、 $W_{ij}^I \cdot W_{ij}^R$ は入力層・RNN層の結合行列、 u_j は入力信号、 $r_j = \tanh(x_j)$ は発火率、 I_i^{noise} は背景ノイズである。

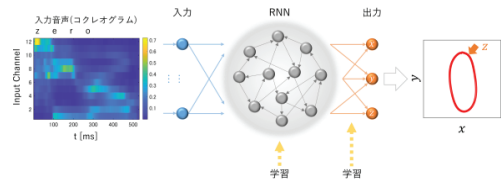


図1 音声認識・筆記文字生成タスクを行うRNN

特に、 W_{ij} 成分と W_{ji} 成分の類似具合から導出される W^R の対称性 α ($\alpha = +1$ の場合に対称行列、 $\alpha = -1$ の場合に反対称行列)について、ガウシアンランダム行列で設定した $\alpha = 0.00$ の W^R が最適化によって $\alpha = -0.49$ の反対称性を帯びることが分かった[3].ここで、 W^R のヤコビアンについて考慮すると、ヤコビア

ンの固有値分布の虚数成分はネットワークダイナミクスの振動周波数に対応していることが分かる(図2)[1, 4].

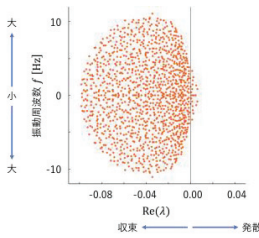


図2 RNN の結合行列のヤコビアン固有値分布

3. 対称性を制御したランダム行列を用いたレザバー計算の性能評価

次に、前章で明らかになった結合行列の対称性変化に着目し、様々な対称性のランダム行列を作成してレザバー層に適用した場合のレザバー計算の性能評価を行った。この結果、 $\alpha = +0.1$ の場合に出力性能が 53.6%で最大となった(図3)。

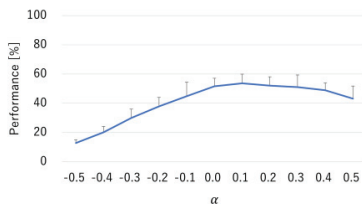


図3 音声認識・筆記文字生成タスクを行うレザバー計算の結合行列の対称性と出力性能の関係

4. ランダム行列の対称性による性能変調のメカニズム解析

入力・出力信号を one-hot ベクトルに変更した簡易モデルを用意し、音声認識・筆記文字生成の性能と結合行列の対称性の関係をそれぞれ調べた。検証のうち、特に筆記文字生成タスク(図4)では、使用する出力ターゲットの速さによって出力性能が高くなる対称性の大きさが異なった(図5)。この結果は、2章で考察したように、レザバー層の結合行列のヤコビアン虚数成分の大きさがネットワークダイナミクスの振動周波数に対応している為と推測される。

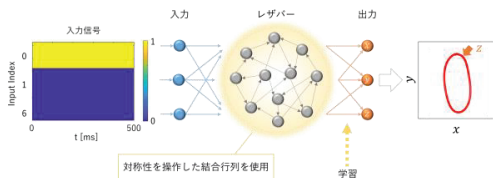


図4 筆記文字生成タスクを行うレザバー計算

さらに、従来ネットワークダイナミクスの変化の速さの調整に用いる各ニューロンの時定数を変更した場

合の性能評価を行ったところ、時定数だけでなく対称性の調整によって出力性能が変化することが分かった(図6)。この傾向は、レザバー計算のハードウェア実装のような時定数の調整が困難な場合における対称性操作の有効性を示唆している。

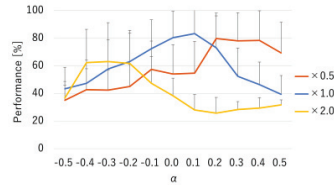


図5 筆記文字生成タスクを行うレザバー計算の結合行列の対称性と出力性能の関係

		r [ms]					
		10	20	50	100	200	500
α	-0.5	33.3	33.3	43.3	70.0	96.0	32.3
	-0.3	33.3	30.3	57.7	92.3	91.0	26.3
	0.0	33.3	31.0	80.3	80.0	36.3	32.7
	0.3	32.0	47.0	52.3	32.3	31.3	32.7
	0.5	25.0	39.3	39.3	30.7	31.0	32.7

出力ターゲット速さ: ×1.0

図6 筆記文字生成タスクにおける時定数及び結合行列の対称性と出力性能[%]の関係

5. 結論

本研究は、RNN とレザバー計算に見られる出力性能・計算コストのトレードオフ解消を目的とし、RNN 層の結合行列の最適化による数理的特徴変化に基づいた高性能・高効率なレザバー計算のレザバー層の設計手法を提案した。第一に、感覚運動制御タスクに合わせて最適化した RNN の結合行列が反対称性を帯びると判明した。続いて、この変化に基づいてレザバー層の結合行列の対称性を変更したところ、ネットワークダイナミクスの振動周波数を出力ターゲットに合わせるように調整することでレザバー計算の出力性能が向上した。今回提案した結合行列の対称性操作は、従来のレザバー計算で行われている時定数やスペクトル半径の調整に加えて有効な手法の1つになることが期待される。

文献

- 1) V. Goudar and D. V. Buonomano, eLife, 7 (2018).
- 2) J. A. Michaels, S. Schaffelhofer, A. Agudelo-Toro and H. Scherberger, PNAS, 117 (2020).
- 3) H. J. Sommers, A. Crisanti, H. Sompolinsky and Y. Stein, Phys. Rev. Lett., 60 (1988).
- 4) D. Sussillo and O. Barak, Neural Comput., 25 (2013).

修士学位論文要約（令和5年3月）

自動分注機構を有するマルチチャンバ構造と 化学イメージセンサを用いた生菌濃度測定

堀江 洋太

指導教員：吉信 達夫， 研究指導教員：宮本 浩一郎

Measurement of Viable Bacteria Concentration Using a Multi-Chamber Structure with
Automated Dispensing Mechanism and a Chemical Image Sensor

Yohta HORIE

Supervisor: Tatsuo YOSHINOBU, Research Advisor: Koichiro MIYAMOTO

Due to the growing consumer awareness of food safety and the internationalization of the food market driven by the technological development in food production and transport in recent years, food testing is conducted in many situations. The conventional method for quantitative measurement of bacterial count is the agar plate culture method, but it requires a long time for testing. Therefore, we focused on the measurement of pH change caused by microbial metabolism using a chemical sensor as an alternative to the agar plate culture method. By combining a chemical sensor with a microfluidic channel with an automated dispensing mechanism, called “multi-chamber structure”, we aimed for highly accurate measurements comparable to the agar plate culture method.

1. はじめに

食品の製造・流通技術の進歩による市場の国際化に伴い、微生物検査の重要性が近年増している。菌数の定量測定では寒天平板培養法が一般的だが、培養に長時間を要するという課題がある。そこで、寒天平板培養法に代わる微生物検査法として、化学センサを用いた微生物の代謝活動によるpH変化の計測に着目した。本研究の検査対象である大腸菌は、酸素が無い場合は嫌氣的醗酵で酸を生成し、酸素がある場合には好氣的呼吸で二酸化炭素を生成するため、溶液内のpH変化を電気信号として検出する化学センサを用いることで大腸菌の有無を判定することができる。

先行研究では、大腸菌懸濁液を自動分注できるように、センサ上にマルチチャンバ構造を有する微小流路構造を形成し大腸菌濃度推定を行った。しかし、自動分注の精度や培養条件、測定条件の影響により、測定精度に課題があった。そこで本研究では、微小流路内の有効チャンバ数の増加、菌数推定の解析モデルの検討を行い、先行研究の課題であった測定精度の向上を図った。大腸菌有無の検出方法として、光学顕微鏡による観察と化学センサによるpH変化測定との2つの方法で行い、それらを寒天平板培養法と比較することで測定

精度の評価を行った。

2. 原理

2.1 自動分注機構

マルチチャンバ構造を有する微小流路は、先行研究を参考に設計、作製した。この流路は溶液と空気の連続注入により各チャンバに溶液を分注することができる。流路構造の変更によって面積使用効率と分注成功率を上昇させ、チャンバ数増加によって有効測定点を増やす改善を行った。



図1 分注機構

2.2 菌濃度推定方法

先行研究では、マルチチャンバ構造に十分に希釈した大腸菌懸濁液を分注したとき、各チャンバには0または1つの菌のみが含まれると仮定していた。1つのチャンバ内に2つ以上の菌が分注された場合を考慮し、 x 個の菌を n 個のチャンバに分注したとき、pH変化が見られるチャンバ数の期待値は、

$$n \times \left(1 - \left(1 - \frac{1}{n}\right)^x\right) \tag{1}$$

であるため、実験で pH 変化が見られたチャンバ数 n' がこれに等しいとおくことにより

$$x = \log_{1-\frac{1}{n}} \left(1 - \frac{n'}{n}\right) \tag{2}$$

と求めることができる。

3. 光学測定

微小流路内培養でも寒天平板培養法に匹敵する精度で濃度推定可能か、光学観察で検証した。ガラス板上に作製したマルチチャンバ構造を有する微小流路に、十分に希釈した大腸菌懸濁液を分注し、一日培養したのち光学顕微鏡で観察し、大腸菌が観測されたチャンバ数をカウントすることで分注時の濃度を求め、寒天平板培養法により求めた濃度と比較した。

128 チャンバ中 127 チャンバで分注に成功し、このうち 75 チャンバで大腸菌が観測された。この結果から、分注されたと考えられる菌数は、

$$\log_{1-\frac{1}{127}} \left(1 - \frac{75}{127}\right) \cong 106 \tag{3}$$

と求まり、推定濃度は 2.83×10^3 cfu/ml となった。寒天平板培養法から求めた濃度は 3.13×10^3 cfu/ml であり、おおむね一致した。希釈倍率の異なる大腸菌懸濁液に対して行った実験でも同様の結果が得られたことから、微小流路を用いて大腸菌懸濁液を分注し、培養後に光学観察することで寒天平板培養法と同程度の精度で菌濃度測定ができると言える。

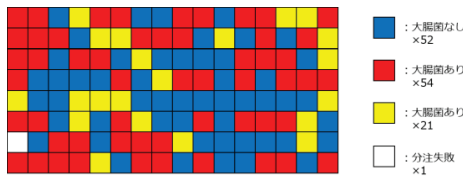


図2 光学観察結果

4. 化学センサを用いた測定

化学センサと微小流路の組み合わせにより、短時間での pH 変化検出と高精度化を狙った。十分に希釈した大腸菌懸濁液を微小流路付きセンサに分注し、 $I-V$ 特性をチャンバごとに測定し、培養前後での $I-V$ 特性曲線の変曲点バイアス電圧

の変化から大腸菌の有無を判別した。

図3のように閾値を定めることで求めた推定濃度は 8.03×10^3 cfu/ml で、寒天平板培養法から求めた濃度は 8.68×10^3 cfu/ml であった。両者はおおむね一致しており、光学観察による生菌濃度測定に続き、化学センサによる生菌濃度測定も寒天平板培養法に匹敵する精度で測定することができた。

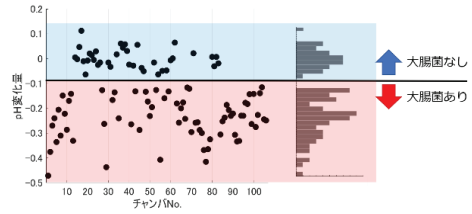


図3 化学センサ測定結果

5. 結論

化学センサを用いた大腸菌生菌数濃度測定精度向上に向けて、有効チャンバ数の増加、菌濃度推定方法の変更を行った。光学観察およびセンサによる大腸菌有無の判定で菌濃度推定を行い、寒天平板培養法と比較・評価を行った。今後は温度制御機構と組み合わせた測定による測定時間の短縮が期待される。

文献

- 1) H, Boukellal, et al, “Simple, robust storage of drops and fluids in a microfluidic device”, Lab on a Chip, Vol.9, 331-338,2009.
- 2) 新井瑠樹, 「マルチチャンバ構造を有する化学イメージセンサの作製と微生物代謝計測への応用」, 東北大学大学院工学研究科, 修士学位論文(2020).

修士学位論文要約（令和5年3月）

ヒータ加熱を援用したホットカソードRFスパッタ法による 酸化物および窒化物薄膜の成膜速度の高速化

宮崎 大輝

指導教員：齊藤 伸

High Rate Deposition of Oxide and Nitride Thin Films by Heater-Assisted Hot Cathode RF Sputtering

Daiki MIYAZAKI

Supervisor: Shin SAITO

High rate deposition of oxide and nitride insulator thin films by RF sputtering is eagerly expected. According to previous reports, the hot cathode method¹⁾ is introduced as one of candidates of this matter. The deposition rate of a powder-form MgO target applying the hot cathode method is faster than that of a flat-form one with the normal cold cathode. However, it is not practical to use a powdered target. In addition, the mechanism of high deposition rate by increasing the temperature of the material has not been clarified yet. Therefore in my Master's thesis, I proposed and developed a novel cathode for the hot cathode method which enables to heat the flat-form target to high temperature. Furthermore, I elucidated the mechanism of high-rate deposition of the hot cathode method.

1. Introduction

The deposition of oxide and nitride insulator thin films is an essential fundamental technology for realizing advanced electronic devices such as semiconductor memory, magnetic recording and spintronics devices. Generally, insulator thin films are deposited by RF, reactive, and DC pulse sputtering methods. Among them, since RF sputtering is superior in terms of composition controllability, high rate deposition for insulator, further high-rate RF sputtering is eagerly expected. According to the previous reports, the hot cathode method is known as one of solutions of this issue for fabrication of a MgO

film. Surprisingly, the deposition rate of a powder-form MgO target applying the hot cathode method is about 30 times faster than that of a flat-form one with the normal cold cathode. However, it is not practical to use powdered material as a target to increase the temperature of the material. In addition, the mechanism of high rate deposition by increasing the temperature of the material has not been clarified yet, although the sputtering rate of the material will change and sublimation will occur at high temperatures. Therefore, in my Master's thesis, developing the hot cathode method, I proposed and realized a novel cathode to heat the flat-form target material to higher temperature. Furthermore, I elucidated the mechanism of high-rate deposition of the hot cathode method by evaluation of the profiles of temperature of the target surface and thickness of the film.

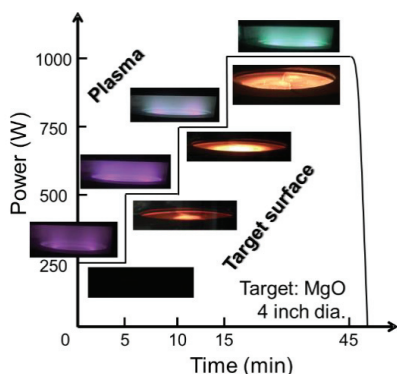


Fig. 1 Process flow of hot cathodic RF sputtering with plasma emission and red-heat state of MgO target just after discharge.

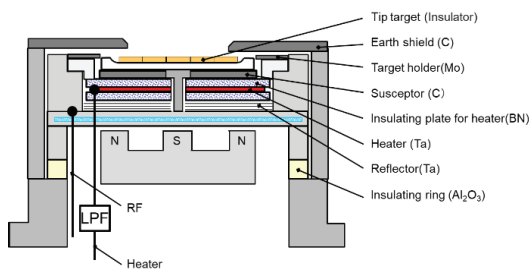


Fig. 2 Schematic of proposed hot cathode with heater.

2. Outline of Hot Cathode Method

Fig. 1 shows plasma states of MgO sputtering during discharge and red-heat states of the target just after discharge by the hot cathode method. In this experiment, disk-shaped high-density MgO with 130 mm ϕ without a Cu backing plate was used as a target. First, the plasma state during discharge shows a gradual change from reddish purple (Ar emission) to green (Mg emission) with increasing power input. This suggests that the amount of Mg atoms sputtered into the space drastically increases as the power input increases, which means that the deposition rate of MgO becomes significantly faster. Next, focusing on the temperature of the target surface, it was confirmed that the red-heat region expanded from the center of the target as the power input increased from 500 W.

3. Proposal and Development of Novel Cathode for High-Rate Sputtering

For further raising the temperature of the target material, I proposed introducing a heater inside the RF cathode with the hot cathode method. Fig. 2 shows a schematic diagram of a novel proposed cathode equipped with the developed heater. The cathode parts were made of Mo with a low coefficient of thermal expansion to prevent deformation due to heating. A low pass filter, which blocks 13.56 MHz of RF, was used to prevent the heater power supply from malfunctioning. Fig. 3 shows the red-heat states and temperature distributions of the target surface depending on the heating methods. In the case of heating by the heater, the target surface showed uniform temperature of around 520 °C. In the case of heating by RF discharge (conventional hot cathode method), the target surface temperature showed 671 °C at the erosion area and 1270 °C at the target center. Finally in the case of heating both with the heater and RF discharge, the temperature became 920 °C and 1420 °C at the erosion and the center, respectively, which are higher than those of the conventional hot cathode method. It is notified that the area of the erosion does not show the highest temperature in the target surface.

4. Mechanism of High-Rate Sputtering at High Temperature

In order to consider whether the deposition mechanism at high temperature is sublimation or sputtering, temperature distribution and film thickness distribution are compared. Fig. 4 shows (a) temperature for each position on the target normalized

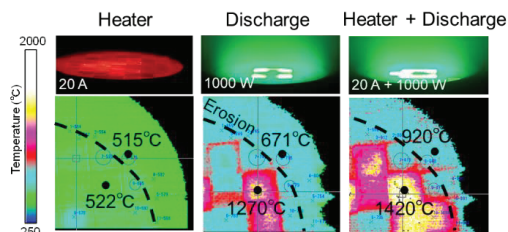


Fig. 3 Changes in target surface temperature due to different heating methods.

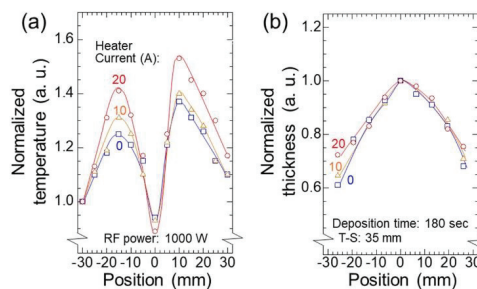


Fig. 4 (a) Temperature profile on the target normalized by that at the position of -30 mm and (b) thickness profile of the film normalized by that at the center of the substrate.

by that at the position of -30 mm and (b) thickness for each position of the film normalized by that at the center of the substrate. Comparing the temperature and film thickness profiles, the temperature profile is Bimodal-like, and enhanced with increasing the heater current. On the other hand, the film thickness profile is Gaussian-like. These results strongly suggest that the dominant factor of high deposition rate at high temperature is raising the sputtering yield of materials rather than sublimation. It was confirmed that the averaged deposition rate in 52 mm ϕ was 10 times faster than that of the conventional cold cathode.

5. Conclusion

In my Master's thesis, I proposed and developed a novel RF sputtering cathode with a heater for the hot cathode RF sputtering method which enables to heat the flat-form MgO target material to high and uniform temperature of around 520 °C. During 1000 W discharge with the heater, the temperature at the erosion became 920 °C, so that the deposition rate was 10 times faster than that of the conventional cold cathode sputtering. This result is brought by raising the sputtering yield of materials rather than sublimation.

References

- 1) M. Terauchi, et al.: *J. SID*, **16/12**, 1195 (2008).

修士学位論文要約（令和5年3月）

ジョセフソン伝送線路を用いた物理リザーバーに関する基礎的研究

渡邊 紘基

指導教員：佐藤 茂雄， 研究指導教員：山本 英明

A Basic Study on Physical Reservoir Computing using Josephson Transmission Line

Kohki WATANABE

Supervisor: Shigeo SATO, Research Advisor: Hideaki YAMAMOTO

Reservoir computing is a machine learning framework that can be used to link high-dimensional dynamics of arbitrary physical systems to information processing with relatively low computational costs. In this study, physical reservoir computing was implemented using a superconducting device called the Josephson Transmission Line (JTL). The performance of the JTL reservoir was investigated through practical tasks such as waveform classification and image recognition. Simulation results show that the JTL reservoir with proper circuit parameters can classify waveforms and images with accuracies of 95.0% and 80.0%, respectively. It has been confirmed that the proposed superconducting circuit has potential to be practically applied to reservoir computing.

1. はじめに

リザーバー計算 (Reservoir Computing: RC) はニューラルネットワークを用いた機械学習手法のひとつである。RC は他の方式に比べ学習効率が良く、比較的少ないニューロンでネットワークを構成できる利点がある。これらの利点から、AI技術の社会実装にRCが応用できるのではないかと期待されている。RC で扱うネットワークの一部は再帰的な結合をもっている。この部分はリザーバーと呼ばれ、学習時にも荷重値は固定される。この特徴を利用すると、リザーバーのニューロンは物理素子で置換できる。物理素子で構成するリザーバーは物理リザーバーと呼ばれ、スピン素子やフォトニクス回路などで構成することができる。我々は、ジョセフソン伝送線路 (Josephson Transmission Line: JTL) を用いたリザーバー計算の方式に注目した。JTL は高速かつ低電力で動作できる特徴がある。本研究では、JTL リザーバーの有用性を調査するため、波形分類と画像分類の実装を行った。

2. ジョセフソン伝送線路

JTL はジョセフソン接合 (Josephson Junction: JJ) を鎖状に繋げたものである。JJ は接合に流れ込む電流の大きさに応じて状態が変化する。接合に流れる電流が臨界電流 I_c よりも大きな場合、JJ は抵抗素子として振る舞う。 I_c よりも小さな場合、JJ は超伝導体として振る舞う。次に JTL の動作について説明する。図1のように JTL に電圧パルスを印加する。電圧パルスは抵抗を介して入力されるため、電流パルスに変換される。電流パルスが JTL に流れ込むと、左端の JJ

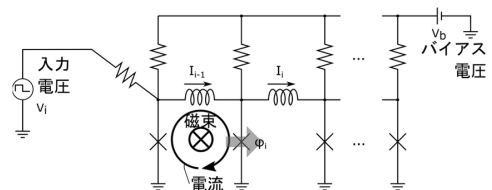


図1 ジョセフソン伝送線路 (JTL) の等価回路

は一瞬、抵抗状態にスイッチする。このとき、左から2番目の JJ に電流が流れ込むようになるため、2接合ループ内に量子化された磁束が閉じ込められる。左端の接合が抵抗状態にスイッチした直後、左から2番目の JJ に流れ込む電流が増加するため、左から2番目の JJ も一瞬、抵抗状態にスイッチする。このように JTL 上の JJ が左端から順に次々にスイッチすることで、量子化磁束が JTL 上を伝搬する。本研究では、JTL のパラメータとしてループインダクタンス²⁾と McCumber 係数 β_c ³⁾に着目した。

3. リザーバー回路のシミュレーション

まずは波形分類のシミュレーション方法について説明する。リザーバー回路として、81 個の JJ で JTL を構成した。今回はのこぎり波と矩形波の分類を行った。学習とテストで入力する波形の順序を変更し、シミュレーションを行った。入力波形はリザーバー回路内のランダムなノードに入力された。リザーバー回路のシミュレーションには JoSIM を用いた。

画像分類も波形分類と同様のリザーバー回路でシミュレーションを行った。学習データとして「0」から「9」

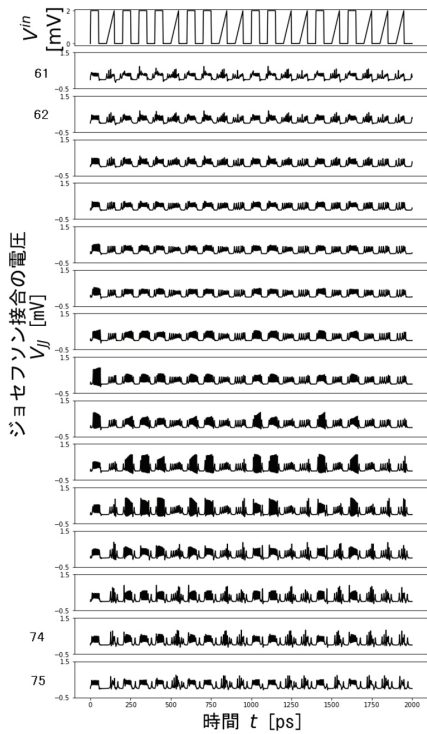


図 2 入力電圧 V^{in} と一部の接合電圧 V_{JJ} の変化

の数字に対応する 5×4 の画像を用意した。テストには 1 ピクセルだけ反転させた画像を用いた。画像は横方向を時間に、縦方向を空間に分解リザバーに入力された。縦方向は 5 ピクセルあるため、画像は 5 つの電圧源を用いてリザバーに入力された。

4. 波形分類の結果

学習波形をリザバー回路に入力すると、接合電圧 V_{JJ} は図 2 のように変化した。矩形波が入力されたときに電圧パルスが多く発生するような結果となった。学習時の接合電圧からリッジ回帰を用いて、読み出し重み W^{out} を (1) 式のように算出した。 \hat{Y} は理想的な出力値の時系列データで、のこぎり波が入力されたときに 0、矩形波が入力されたときに 1 を出力するように設定されている。 λ は任意定数で今回は 1 とした。

$$W^{\text{out}} = (V_{JJ}^T V_{JJ} + \lambda I)^{-1} V_{JJ}^T \hat{Y} \quad (1)$$

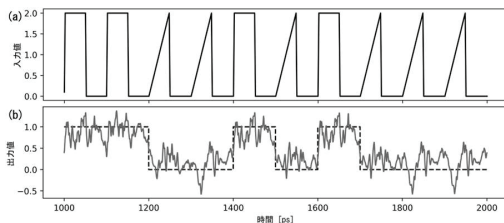


図 3 波形分類の結果 (a) 入力波形 (b) 出力値

算出した W^{out} を用いてテスト波形の分類を行った結果が図 3 である。出力値が 0.5 を超えた場合は 1 に、それ以下であれば 0 になるように変換し、各時刻の分類結果を導出した。 L と β_C の大きさを変えると、電圧パルスの形状が変化した。パラメータをうまく調整すると、分類精度は 95.0% まで大きくなった。

5. 画像分類の結果

画像分類でも同様に読み出し重みをリッジ回帰により計算し、テスト画像の分類を行った。 L と β_C の値を変えた時の正答率の変化を図 4 に示す。 β_C が大きくなると、接合電圧が大きく上昇するようになる。そのため、JJ の非線形性をうまく活用できるようになり、分類精度が向上する。 β_C が 1 以上のときに特に精度が良くなり、最大で 80.0% の正答率が得られた。

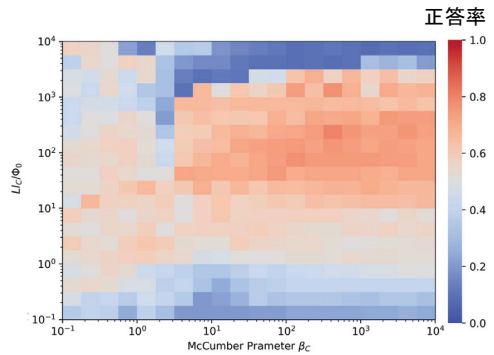


図 4 L と β_C を変えた時の正答率の変化

6. まとめ

本研究により、JTL を用いた物理リザバーが実用的な時系列分類タスクに応用可能なことが示された。今後は、実装に向けた出力回路のシミュレーションに取り組む必要がある。

謝辞

電気通信大学の水柿義直教授には、リザバー回路のシミュレーションに関して、多くのご助言・ご提案を頂きました。感謝申し上げます。

文献

- 1) G. E. Rowlands, M.-H. Nguyen, G. J. Ribeill, A. P. Wagner, L. C. Govia, W. A. Barbosa, D. J. Gauthier and T. A. Ohki: “Reservoir computing with superconducting electronics”, *arXiv preprint arXiv:2103.02522* (2021).
- 2) B. Dimov, V. Todorov, V. Mladenov and F. H. Uhlmann: “Optimal signal propagation speed of a Josephson transmission line”, *Superconductor Science and Technology*, **17**, 6, p. 819 (2004).
- 3) D. McCumber: “Effect of ac impedance on dc voltage-current characteristics of superconductor weak-link junctions”, *Journal of Applied Physics*, **39**, 7, pp. 3113–3118 (1968).

修士学位論文要約（令和5年3月）

慣性センサを用いたニューラルネットワークによる 歩行中の体重心位置推定に関する研究

渡邊 駿典

指導教員：渡邊 高志

A Study on Estimation of the Center of Mass Position During Walking Using Inertial Sensors with Neural Network

Toshinori WATANABE

Supervisor: Takashi WATANABE

The center of mass (CoM) position during walking can provide useful information for gait assessment. This study aimed to develop a CoM position estimation method for clinical settings, and an ANN approach based on inertial measurement units (IMUs) was investigated. First, input signal combination and low-pass filtering for IMU signals were examined by intra-subject cross-validation. Based on the results, inter-subject generalized models were designed. The CoM trajectory estimated by long short-term memory network (LSTM) with IMU signals as the input showed good agreement with the reference trajectory. In addition, the possibility of reducing IMU was examined. The results showed the feasibility of estimation with a small number of IMUs but suggested that a single IMU would not provide sufficient information for CoM estimation.

1. はじめに

歩行中の体重心位置はバランス能力や代謝エネルギーなどとの関係が報告されており [1], リハビリテーションにおける運動機能評価の指標としての利用が期待される。体重心位置推定には光学式モーションキャプチャや床反力計を用いるのが一般的であるが、こうした機器は臨床現場への導入が困難である。本研究グループの先行研究では慣性センサに基づく体重心位置推定方法が開発されたが、左右方向の推定精度が課題であった [2]。近年ではニューラルネットワークを用いた方法も提案されたが、慣性センサを用いたものはいずれも歩行評価への応用が十分に想定されていないものであった [3,4]。そこで本研究では、臨床現場で使用可能な体重心位置推定方法の構築を目的とし、慣性センサとニューラルネットワークを用いた方法について検討した。

2. ニューラルネットワークを用いた体重心位置推定方法

本研究では、両足部、両下腿部、両大腿部、体幹上部に装着した計7個の慣性センサで計測した3軸加速度・3軸角速度信号を用いて体重心位置を推定するニューラルネットワークを設計した。ネットワークは順伝播型ニューラルネットワーク (FFNN) と長・短期記憶ニューラルネットワーク (LSTM) の2種類を用いた。ネットワークの入力は1時刻の慣性センサ信号、出力は3次元体重心位置座標である。ただし、LSTM については1歩行周期のデータを系列データとして推定した。

3. 入力信号の選択と事前処理に関する検討

4人の健常男性を被験者として歩行計測実験を行い、慣性センサと光学式モーションキャプチャによる同時計測を行った。通常歩行に加え、片麻痺模擬歩行、高齢者模擬歩行、障害物横断歩行についても計測を行った。同一被験者内での5分割交差検証を行い、入力信号の組み合わせと、信号の事前処理として適用するローパスフィルタの遮断周波数について検討した。その結果、入力信号は3軸加速度・角速度をすべて使用する場合に最も推定精度が高かった。また、加速度信号に対する遮断周波数を低くすると推定精度が改善する傾向が見られた。センサの姿勢に関する情報を持つ重力加速度成分は比較的周波数の低い成分であり、ローパスフィルタの適用によりこれが強調されたことが推定精度の向上につながった可能性がある。一方、角速度信号にローパスフィルタを適用しても大きな効果は得られなかった。最終的に、3軸加速度・角速度をすべて入力として使い、加速度には3 Hz、角速度には10 Hzの遮断周波数をもつローパスフィルタを適用することとした。

4. 被験者間の一般化に関する検討

6人の健常男性で追加の歩行計測実験を行い、合計10人のデータを用いて被験者間の一般化モデルを作成した。Leave-One-Subject-Out 交差検証を行い、2種類の入力 (信号入力・ベクトル入力) と2種類のモデル (FFNN・LSTM) について比較を行った。

表 1: 各モデル・入力に対する RMSE [cm]

モデル	入力	左右	前後	鉛直
FFNN	信号	1.750	6.507	0.502
	ベクトル	1.989	11.917	0.622
LSTM	信号	1.455	2.834	1.897
	ベクトル	1.787	3.051	0.590

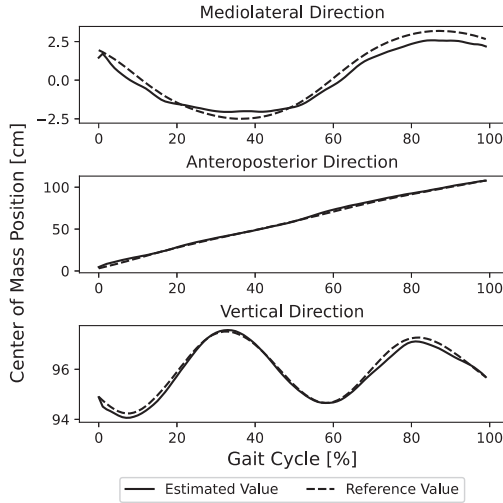


図 1: 推定結果の例 (信号・LSTM)

先述の結果より姿勢情報の重要性が示唆されたため、セグメントの向きを表す方向ベクトルである姿勢ベクトルを新たな入力として検討に加えた。

各入力、モデルにおける RMSE を表 1 に示す。これより、信号を入力とする LSTM が最も高い推定精度を示した。姿勢情報しか持たない姿勢ベクトルに比べて、加速度信号と角速度信号はセグメントの回転や平行移動に関する情報も内包していることが推定に有利に働いた可能性がある。また、LSTM のような時系列関係を考慮したモデリングが有効であることが示唆された。信号を入力とする LSTM による推定結果の例 (sub1 通常歩行) を図 1 に示す。推定結果は光学モーションキャプチャで推定された参照波形と概ね一致し、学習データに含まれない被験者に対しても推定が可能であることが確認された。また、片麻痺模擬歩行や高齢者模擬歩行に対しても推定を行い、異常歩行への適用可能性が確認された。

5. センサ数の削減可能性の検討

臨床現場での利便性を考え、推定に使用するセンサ数の削減可能性を検討した。センサ数を 7 個から 1 個まで、様々な組み合わせで LSTM の学習・テストを行った。その結果、センサ数を削減したことによる RMSE の増加は小さく、最大で左右方向 1.3 mm、前後方向 3.7 mm、鉛直方向 0.8 mm の増加であった。また、複数のセンサの信号を入

力に使用している場合、センサの組み合わせによる RMSE の差は小さかった。目的に応じて使用するセンサの個数と配置を柔軟に選択できる可能性があると考えられた。例えば、膝関節角度と体重重心位置を同時に計測したい場合、下腿部と大腿部にセンサを装着することでこれを実現できる。

単一センサによる推定結果では、障害物横断歩行の鉛直方向 RMSE について、右下肢に装着したセンサを入力としている場合に RMSE が小さい傾向が見られた。障害物横断歩行では、右足を先行肢として障害物をまたぐように指示しており、その際に右足を高く上げる特徴的な運動が生じる。左下肢や体幹に装着した単一センサの信号を入力とした場合の推定結果では、このタイミングで大きな誤差が確認された。したがって、単一センサでは一部のセグメントの大きな運動に関する情報を捉えることができないと考えられるため、複数のセンサを用いることが望ましいと考えられる。

6. まとめ

本研究では、慣性センサを用いて体重重心位置を推定するためのニューラルネットワークについて検討し、加速度・角速度信号を入力とする LSTM ネットワークにより良好な推定結果が得られた。また、少数の慣性センサによる推定の実現可能性が確認されたが、単一センサでは推定に十分な情報が得られないため、複数のセンサを使用することが望ましいと考えられた。

文献

- [1] Luigi Tesio and Viviana Rota. The Motion of Body Center of Mass During Walking: A Review Oriented to Clinical Applications. *Frontiers in Neurology*, Vol. 10, 2019.
- [2] Yuho Takeda and Takashi Watanabe. A Feasibility Test of Evaluation of Gait Movement by Using Center of Mass Estimation with Inertial Sensors. *IFMBE Proceedings*, Vol. 76, pp. 718–726, 2020.
- [3] Elie Chebel and Burcu Tunc. Deep neural network approach for estimating the three-dimensional human center of mass using joint angles. *Journal of Biomechanics*, Vol. 126, 2021.
- [4] Xinwei Li, Bingze He, Zhipeng Deng, Yixi Chen, Duojin Wang, Yuanjie Fan, Hao Su, and Hongliu Yu. A Center of Mass Estimation and Control Strategy for Body-Weight-Support Treadmill Training. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 29, pp. 2388–2398, 2021.

修士学位論文要約（令和5年3月）

エアモビリティ駆動システム用回転機に関する研究

朝雛 えみり

指導教員：中村 健二

A Study of Rotating Machines for Air Mobility Drive System

Emiri ASAHINA

Supervisor: Kenji NAKAMURA

In recent years, the development of electric equipment with high power density has been strongly required to realize air mobility. Electric machines are no exception, and there are demands for these to increase torque density and power density. The output is expressed as the product of the motor's torque and angular velocity. Therefore, less torque is needed to produce the same output as a faster rotation speed. Furthermore, considering that torque is positively correlated with the size of motors, higher speed contributes to the downsizing and lighter of motors. Moreover, there are demands for gears that can operate at high speeds are also required as motors increase in speed. This study focuses material of SR motor's coils for decreasing weight and increasing torque density, and aluminum is used as the coil material. The winding space factor can be increased by using aluminum. As for the magnetic gears, they succeeded in operating at an unprecedentedly high rotational speed of 80,000 rpm.

1. はじめに

脱炭素社会に向け、様々な分野で電動化が推進されている。これは航空機も例外ではなく、2050年までに、2005年比で二酸化炭素排出量を50%削減するという目標を掲げており、航空機の電動化は必須な状況にある⁽¹⁾。また、いわゆる「空の移動革命」に伴い、ドローンから電動航空機まで様々な機体サイズの次世代航空移動体が誕生している。これらは機体サイズに関わらず、全ての要素が軽量、高性能かつ高信頼性であることが要求される。特にモータはシステム全体に占める重量の割合が大きく、軽量化と高出力化が必須である。この要求を満たすため、モータの鉄心等に軽量な材質⁽²⁾を用いることや、高速回転⁽¹⁾が検討されている。本研究では、信頼性と高速回転を両立可能なスイッチトリラクタンス(SR)モータ、磁気ギャに注目した。SRモータは、軽量かつ形状自由度が高いアルミニウム製のコイルを用いることで、軽量化と高出力化の両立を目指す。また80,000rpmで動作可能な超高速磁気ギャについても設計・試作を行ったので報告する。

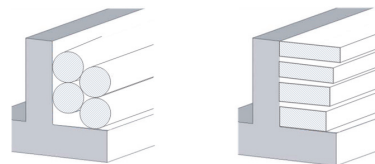
2. アルミコイルを適用したSRモータの基礎特性

図1に、従来の一般的な銅コイルの巻線配置と、本稿で着目したアルミコイルの巻線配置を示す。アルミニウムは銅と比べ、柔らかいことから、同図のように巻線の断面積を一定に保ちつつ、アスペクト比を1ターン毎に変えることができる。これによって、デッドスペースを極限まで減らし、巻線の占積率を向上させ、トルク

を増大させることができる。しかし、電気伝導率が銅の約0.6倍であることから、銅損の増大による効率の低下が懸念される。本稿では、図2のSRモータを対象に3次元有限要素法(3D-FEM)による電磁界解析を用いて、アルミコイルをSRモータに適用した場合の特性を算定した。なお、3D-FEMには、JSOL製のJMAG Designer Ver 20.1を用いて、アルミコイルの占積率を50%~90%と変化させた。

図3に重量出力密度の比較を示す。この図より、アルミコイルを用いることでモータが軽量になり、かつ同一電流密度におけるトルクが増大したことから、重量出力密度が大幅に向上し、1kW/kgを上回ったことが了解される。

図4に、銅損の計算値を示す。図4より、占積率70%までは銅コイルと比べて、アルミコイルの銅損が大きいものに対して、占積率が70%を超えると小さくなるのがわかる。これはコイル断面積の増大による抵抗減少効果、電気伝導率の低さによる抵抗増加分を上回ったためである。つまり、アルミコイルの使用において最も懸念される銅損の増大は、占積率を70%超まで向上させることで解決できる。



(a) 従来の銅コイル (b) 提案するアルミコイル
図1 銅コイルとアルミコイルの比較

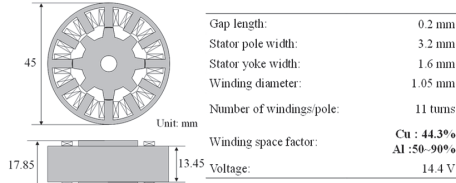


図2 12/8 SRモータの諸元

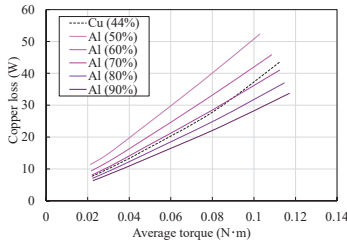


図3 出力密度の計算値

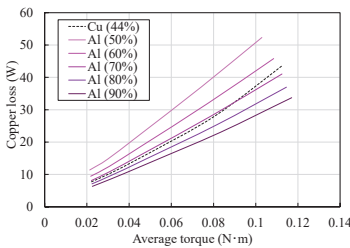


図4 銅損の計算値

3. 超高速磁気ギヤの試作試験結果

図5に試作した磁束変調型磁気ギヤの諸元および設計目標を示す。本磁気ギヤのギヤ比は6.667であり、入力軸は内側回転子(Ir)、出力軸はポールピース(Pp)である。また、入力側の最高回転数を80,000 rpmとした。

図6に試作した超高速磁気ギヤの外観を示す。ポールピースホルダやケースなどは、CFRP(炭素繊維強化プラスチック)で製作した。

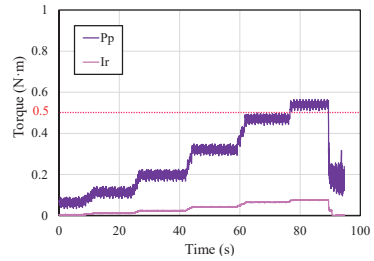
図7に設計した磁気ギヤの特性を示す。図7(a)から、入出力トルクが徐々に増加しており、所望のギヤ比を実現していることがわかる。また、90秒付近で脱調が確認され、この時のトルクは低速側で約0.57 N·mであり、目標トルク0.5 N·mを達成していることが了解される。加えて、図7(b)より80,000 rpm時でも効率85%を達成したことがわかる。

図8に設計した磁気ギヤの損失内訳を示す。全損失は122.0Wであり、ベアリング損が113.3Wなのに対し、鉄損と磁石渦電流損の和が8.67Wであった。

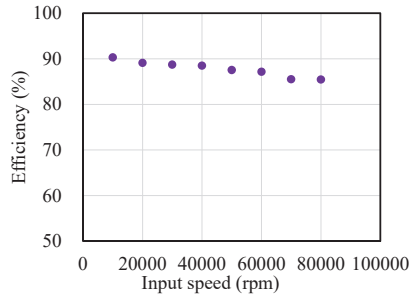


(a) インナーロータ (b) ポールピース (c) 磁気ギヤ

図5 設計した磁束変調型磁気ギヤの外観



(a) 入出力トルク特性



(b) 効率対速度特性

図6 設計した磁気ギヤの特性

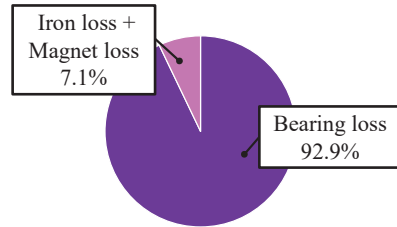


図7 設計した磁気ギヤの損失内訳

4. まとめ

本論文では、エアモビリティへの実現に向け、SRモータの高出力密度化について解析から検討を行った。その結果、SRモータは従来比2倍の出力密度を達成した。また超高速磁気ギヤについてFEMによる最適化の後、実験による評価を行った。実験結果より、80,000rpm時でも効率が85%を達成することができた。

今後は、アルミコイルを適用したSRモータの実機評価を、超高速磁気ギヤに関してはベアリング損の評価を行う予定である。

文献

- 1) J. Z. Bird, "A Review of Electric Aircraft Drivetrain Motor Technology," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 2, pp. 1-8, (2022).
- 2) Y. Yamada, M. Irie, S. Nakata, "Development of Motors for Air Mobility," *The 2019 Annual Meeting of the Institute of Electrical Engineers of Japan*, S1-9, pp. 25-28 (2022).

修士学位論文要約（令和 5 年 3 月）

高 SNR・高速グローバルシャッタ CMOS イメージセンサと流体濃度分布計測応用に関する研究

及川 哲

指導教員：中村健二

A Study on High SNR High Speed Global Shutter CMOS Image Sensors and Applications for Fluid Concentration Distribution Measurements

Tetsu OIKAWA

Supervisor: Kenji NAKAMURA

A demand for sensing technology using CMOS image sensor is highly increased for not only viewing purpose but also analytical applications in various fields such as automobile, security, industry, machine-vision, medical field and so on. In particular, visualization of concentration distribution of dynamically moving gases or liquids by non-invasive/non-destructive manner is one of the promising technologies and required in variety of fields. In this study, a global shutter high signal-to-noise ration (SNR) and high frame rate CMOS image sensor (CIS) for in situ fluid concentration distribution measurements using absorption imaging are presented. The developed prototype CIS with 22.4 μm pitch pixel exhibited 69.7 dB maximum SNR, 123 dB dynamic range and 1000 fps maximum frame rate and successfully captured images of dynamic movements of NO_2 gas concentration distribution in the vacuum chamber for 300 mm diameter wafers.

1. はじめに

製造業における材料ガス、薬液の可視化や農作物の非破壊検査、ヘルスケア分野における非侵襲の血液モニタリング等、動きのある流体の濃度分布を高精度に可視化する技術の創出が望まれている。光の吸収を用いた定量分析には従来高い SNR を持つ単体の受光素子がいわれてきたが分布情報を取得することはできない。一方で従来のイメージセンサは高い空間解像度を持っているが、SNR が低く、高精度な濃度測定には適していない。また、高速で移動する流体を歪み無く撮像するには高いフレームレートや全画素同時に露光を行うグローバルシャッタ (GS) 方式、様々な物質に対応するには広い波長範囲において高い感度を有することが求められる。

本研究では高フレームレート・GS、広光波長帯域かつ各画素で単体の分析器並みの SNR が得られるイメージセンサの開発を目的とする。

2. プロトタイプチップの設計

図 1 に設計したプロトタイプチップの回路図を示す。画素は 2 段の横型オーバーフロー蓄積容量 (LOFIC)²⁾、電圧保持式アナログメモリ、高紫外耐光性・高光波長帯域フォトダイオードから成る。LOFIC を 2 段構成とすることで 70 dB の最高 SNR、信号切替点での十分な SNR を確保できるように設計した。同様にアナログメモリにおいてもサンプリング時のノイズを低減するために可能な限

り大きな容量で設計した。これらの容量素子には高い容量密度と低リーク電流特性な Si トレンチキャパシタを用いており、画素に高密度に容量素子を集積している。図 2 にチップ写真を示す。開発したイメージセンサは 22.4 μm ピッチ、 $140\text{H} \times 140\text{V}$ の画素アレイを有しており、0.18 μm 1 層ポリシリコン 5 層メタルの CMOS プロセステクノロジーによって製造された。

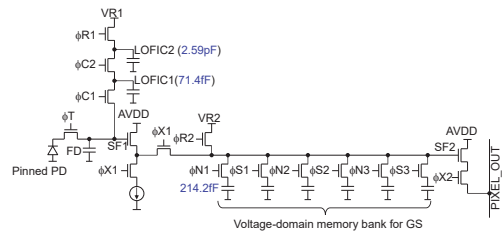


図 1 設計チップの回路図

4.8mm

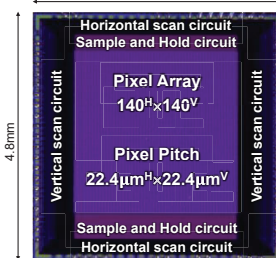


図 2 設計チップの写真

3. 測定結果

図3、図4に光電変換及びSNR特性を示す。感度の異なる3つの信号により123 dBの広いダイナミックレンジ性能を実現した。また、S3の飽和近傍において27.8 Meの飽和電子数と69.7 dBのSNRを達成した。SNR特性には各吸光度及び吸収率の条件においてそれを検出するために必要なSNRも同時に示しているが、開発したセンサにおいてはおよそ0.1%の吸光が検出可能であることがわかる。

次に開発したセンサを用いた半導体製造チャンバー内の材料ガスの可視化実験について示す。半導体製造においては微細化が進んだ現代では原子層レベルの均一な成膜やエッチングが求められるが実際に反応が生じるチャンバー内の様子を直接観測することはできていない。チャンバー内ガス濃度分布を可視化することで供給ガスのウェハ面内均一性やガス切替時の過渡状態と歩留まりとの因果関係を特定することで製造技術の向上や次世代製造装置の開発への貢献が期待される。図5に測定系を示す。測定系は開発したセンサチップ、テレセントリックレンズ、6つの観測用の窓がある真空チャンバー、LED光源、ガス供給系から成る。本実験においてはノズルから供給されるNO₂ガスのイメージングを行った。なおNO₂は405 nm付近に大きな吸収波長帯が存在し、光源の波長はそれに合わせてある。撮像したNO₂のガス濃度分布を示す。チャンバー内圧力が667 Pa、供給ガスの流量が40 sccmの条件においてガスがArからNO₂に切り替わる過渡状態を1000 fps動作で撮像した。ノズルからガスが噴出され、拡散していく様子を明瞭に可視化することに成功した。

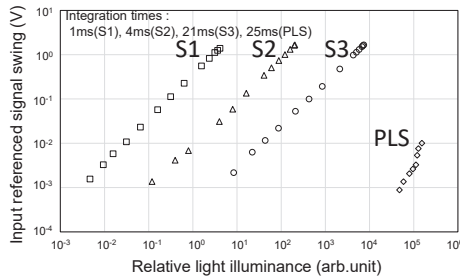


図3 光電変換特性

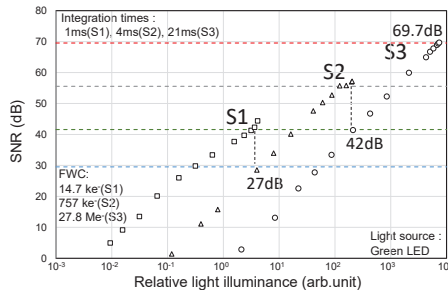


図4 SNR特性

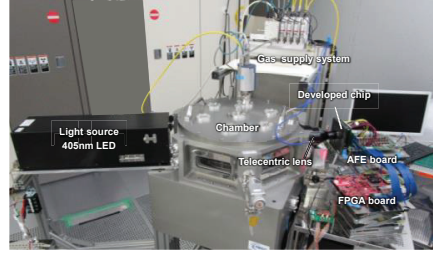


図5 チャンバー内ガス濃度分布測定系

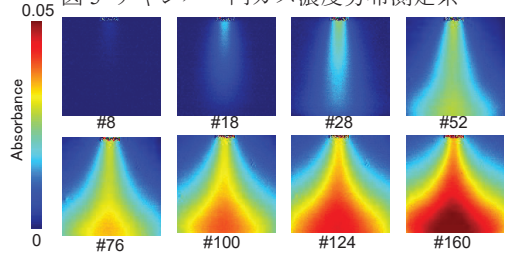
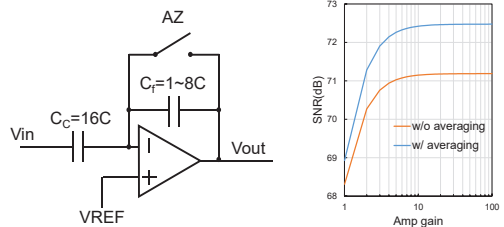


図6 撮像したNO₂ガス濃度分布

4. 読み出しノイズの低減

設計したチップはおおよそ目標を満たすものであったが飽和電子数に対してSNRが小さいという課題が明らかになった。これはLOFICの容量値が大きく、回路初段の変換ゲインが低いために入力換算ノイズの読み出しノイズが大きいことが原因である。これを低減するために列ゲイン可変アンプを導入した改良版チップの設計を行った。図7にアンプの概要を示す。(a)は回路図、(b)はゲインと最高SNRの関係を描素内の平均化の有無でそれぞれ示している。設計したアンプは最大16倍のゲインが得られ、最高72.5 dBのSNRが得られる見込みである。



(a)回路図

(b)ゲインと最高SNRの関係
図7 列アンプ概要

5. まとめ

最高SNR69.7 dB、1000 fpsのCISを開発し、それによるチャンバー内ガスの可視化に成功した。本技術は半導体製造を始めとした様々な分野における測定機器への応用が期待される。

文献

1) T. Oikawa, *et al.*, *IEEE TED*, vol.69, no. 6, pp. 2965-2972(June 2022)
 2) S. Sugawa, *et al.*, In the Digest of Technical Paper of the *IEEE ISSCC*, pp. 352-353(Feb 2005)

修士学位論文要約（令和5年3月）

磁気回路解析の高精度化のための 動的ヒステリシスモデルおよび磁気特性測定手法に関する研究

川口 正隆

指導教員：中村 健二， 研究指導教員：羽根 吉紀

A Study of Dynamic Hysteresis Model and Magnetic Characteristic Measurement Method for High-Accuracy Magnetic Circuit Analysis

Masataka KAWAGUCHI

Supervisor: Kenji NAKAMURA, Research Advisor: Yoshiki HANE

The classical eddy current loss estimated by the FEM was compared with the ones obtained by the magnetic circuit model that incorporates Cauer-equivalent circuit theory using various candidate definitions of the ladder circuit parameter to verify the validity of the parameters of the ladder circuit, which express the classical eddy current loss in the magnetic circuit model based on the Cauer's equivalent circuit theory. In addition, the validity of the magnetic-properties measurement system for ring cores using a myRIO for waveform control was verified. The measurement results with waveform control are compared to those without waveform control, conventional, to evaluate the measurement accuracy.

1. はじめに

近年、省エネルギーの観点から、高効率な電気機器の開発が望まれている。電気機器のさらなる高効率化のためには、磁気ヒステリシスを定量的に算定可能な手法の確立が必要不可欠である。

上述の課題に対して、先行研究では、直流ヒステリシスを表現可能な現象論モデルの一つであるプレイモデル、並びに表皮効果の影響を考慮可能なCauer回路を取り入れた磁気回路モデルを提案し、PWM励磁時のマイナーループを含む磁気ヒステリシスを高精度に算定可能であることを明らかにした¹⁾。本稿では、本手法を他の様々な励磁条件下に適用することを目的として、渦電流損を表現する磁気回路素子のパラメータ同定法について検討を行った。

一方で、上述の磁気回路モデルを用いて解析を行うためには、鉄心材料の磁気特性データの高精度な測定が必要となる。この課題に対して、先行研究では、磁束正弦波条件を満たすための磁束波形制御機構を有する磁気特性測定システムが提案されている²⁾。本稿では、より安価かつ簡便な測定システムの開発を目的として、myRIOを用いたリングコア用磁気特性測定システムを構築するとともに、提案システムの測定精度について検討を行った。

2. 渦電流損を表現する磁気回路素子のパラメータ同定法の確立

図1に、前章で述べた磁気回路モデルを示す。本モデルでは、直流ヒステリシスはプレイモデル、渦電流

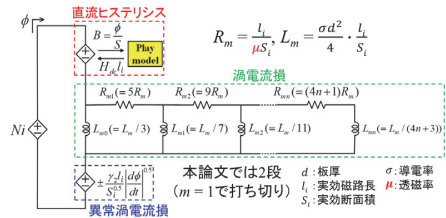


図1 プレイモデルとCauer回路を取り入れた磁気回路モデル

損はCauer回路と等価な磁気回路素子、異常渦電流損は従属電源によって、それぞれ表現する。

本章では、渦電流損を表現する素子のパラメータの一つである、透磁率 μ の同定法について検討を行った。ここでは、有限要素法(FEM)を用いて鋼板一枚のモデルを解析することによって得られた渦電流損による磁界を真値として、次に示す連立方程式を解くことにより μ を求めた。

図2に、磁気回路モデルおよびFEMによって得ら

$$H_{eddy} I_{sh} = L_{m0} \frac{d(\phi - \phi_1)}{dt} \quad (1)$$

$$H_{eddy} I_{sh} = \phi_1 R_{m1} + L_{m1} \frac{d\phi_1}{dt} \quad (2)$$

れた、ヒステリシスループのうち渦電流損による成分の計算結果の比較を示す。同図より、提案手法を用いることで、正弦波励磁下においても渦電流損の高精度な算定が可能であることが分かる。

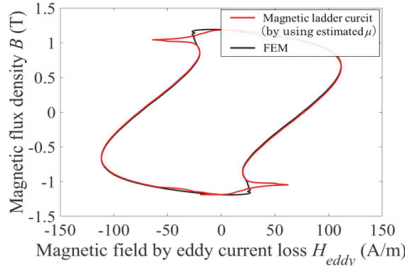


図2 磁気回路モデルとFEMによるヒステリシスループの渦電流損成分の計算結果の比較

3. myRIO を用いたリングコア用磁気特性測定システムの構築

本章では、National Instruments 社製の myRIO を磁束波形制御用のデバイスとして用いることで、先行研究と比較してより安価かつ簡便な磁気特性測定システムについて検討を行った。図3に、構築したリングコア用磁気特性測定システムを示す。以下では、無方向性電磁鋼板(35A300)のリングコアを試料に用いて、提案システムの妥当性を検証した。

図4(a), (b)に、波形制御時および非制御時における、励磁電圧、励磁電流、サーチコイルの各種波形の比較を示す。同図より、波形制御を行うことにより、サーチコイル電圧波形の歪みを大幅に抑制可能であることが分かる。

図5に、周波数 $f = 5 \text{ Hz}$ の正弦波励磁下における制御時・非制御時の最大磁束密度-磁束密度波形歪み率特性の比較を示す。なお、磁束密度波形はサーチコイル電圧波形の積分によって求められる。同図より、特に高磁束密度領域において、制御時には歪み率が大幅に低下しており、特に $B_m = 1.8 \text{ T}$ に着目すると、非制御時には 29.8% であるのに対して、制御時には 0.3% まで低下した。

4. まとめ

本稿では、プレイモデルと Cauer 回路を取り入れた磁気回路モデルのさらなる高精度化を目的として、種々の検討を行った。まず、磁気回路素

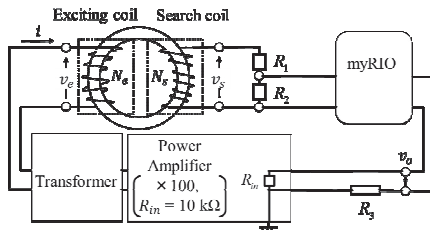
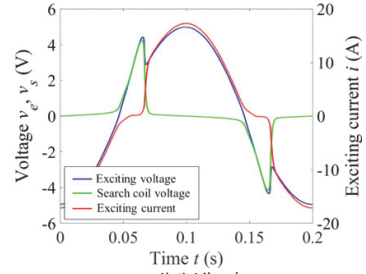
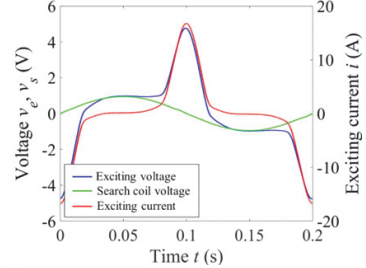


図3 myRIO を用いたリングコア用磁気特性測定システムの概略図



(a)非制御時



(b)制御時

図4 $f = 5 \text{ Hz}$, $B_m = 1.8 \text{ T}$ における各種波形

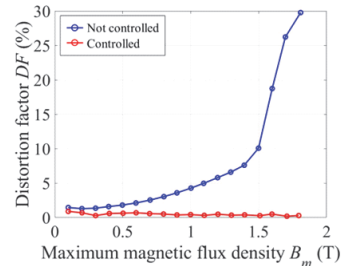


図5 最大磁束密度-磁束密度波形歪み率特性 ($f = 5 \text{ Hz}$)

子のパラメータ μ の同定法については、FEM によって得られた渦電流損による磁界から μ を求めることにより、正弦波励磁下においてもヒステリシスループを高精度に算定可能であることを明らかにした。また、myRIO を用いた安価かつ簡便なリングコア用磁気特性測定システムを構築するとともに、提案システムの妥当性について検証した結果、比較的高精度に測定可能であることを明らかにした。

文献

- 1) Y. Hane and K. Nakamura, "Dynamic Hysteresis Modeling Taking Skin Effect Into Account for Magnetic Circuit Analysis and Validation for Various Core Materials," IEEE Trans. Magn., Vol. 58, No. 4, Art. no. 7300412 (2022)
- 2) S. Aihara, H. Shimoji, and T. Todaka, "Acceleration technique of flux waveform control with FPGA", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.502, Art. No. 166371 (2020)

修士学位論文要約（令和5年3月）

顔映像を用いた非接触式血中酸素飽和度測定法

佐々木 颯馬

指導教員：中村 健二 研究指導教員：杉田 典大

Non-Contact Measurement of Blood Oxygen Saturation Using Facial Video
Soma SASAKI

Supervisor: Kenji NAKAMURA, Research Advisor: Norihiro SUGITA

Continuous measurement of percutaneous oxygen saturation (SpO_2) enables early detection of diseases that cause hypoxemia and monitoring patients' conditions in the medical field. The value of SpO_2 can be obtained continuously with a pulse oximeter, but it requires the sensor to be in contact with the skin during the measurement. Therefore, there is a need for a method to measure SpO_2 without skin contact. Several studies on non-contact measurement of SpO_2 have been conducted using skin video images. However, in these studies, SpO_2 values were estimated using a linear regression model that required true values obtained using a contact-type pulse oximeter. In this study, we proposed new methods for non-contact SpO_2 measurement that do not require true values and conducted experiments to evaluate their estimation accuracy. The experimental results showed that the proposed methods could estimate SpO_2 with a lower RMSE and a higher correlation compared to the conventional method. In addition, the RMSEs of the proposed methods were within 4% even in a room with normal ambient light.

1. はじめに

経皮的動脈血酸素飽和度 (SpO_2) を連続的に測定することで、低酸素血症を引き起こす疾患の早期発見が可能となる。一般的に SpO_2 はパルスオキシメータを利用して測定可能であるが、測定中にセンサを皮膚に接触させる必要があるため、肌の弱い新生児や入院患者の SpO_2 を長時間にわたってモニタリングすると、皮膚の炎症や強いストレスを引き起こす危険性がある。これに対して、本研究では、接触式のセンサで得られる値（以下、参照値）を必要としない SpO_2 の非接触測定手法を確立することを目的としている。

2. 映像を用いた血中酸素飽和度測定の従来手法

皮膚の映像を用いて SpO_2 を非接触で測定する手法については、いくつかの先行研究がなされている。Shao らは赤色光と近赤外光の顔に対する反射光強度の比を用いて SpO_2 を非接触で測定した¹⁾。Mishra らは偏光フィルタを用いて単一光源を2つの成分に分離し、それらの比を用いて SpO_2 を非接触で測定した²⁾。また、近赤外光を用いずに、可視光のみで SpO_2 の非接触測定を行う研究もいくつかなされている³⁾⁴⁾⁵⁾。しかし、これらの研究では、接触式のパルスオキシメータから得られた参照値を用いた線形回帰を行うことで SpO_2 を推定しているため、被験者あるいは被験者群ごとにそのモデルを作成する必要がある。したがって、顔映像のみから非接触で SpO_2 を測定す

るために、参照値を利用することなく SpO_2 の絶対値推定を行う手法の確立が必要であると考えた。

3. 参照値補正を必要としない非接触式血中酸素飽和度測定の提案

参照値による補正を用いずに非接触で SpO_2 を推定する2つの手法を提案する。1つ目の手法（提案法1）は、ピクセルの平均輝度値の自然対数をとった後に心拍成分のみを抜き出すバンドパスフィルタをかけることで、非脈動成分（DC成分）の除去を試みている。この手法により、ヘモグロビン量とは無関係な顔への入射光や影の影響を抑制することができると考えられる。2つ目の手法（提案法2）は、異なる波長の光で照らした顔映像に対して主成分分析を適用することにより、共通成分の抽出を試みている。この手法により、浅層の脈動成分や顔の動きの影響などのノイズを分離することができると考えられる。

4. 提案法の精度検証実験

本研究では、従来の方¹⁾で求めた SpO_2 の推定値と、3つの提案法（提案法1及び、主成分分析の適用方法がそれぞれ異なる提案法2aと提案法2b）で求めた SpO_2 の推定値について、参照値との二乗平均平方根誤差（RMSE）もしくは相関係数を比較することで評価した。ここで、本研究におけるRMSEの目標値を4%以内とした。

実験環境は図1に示したとおりである。安静座位状態の被験者の顔を3つのリング型LEDで同時に照らし、40 cm離れた位置のマルチスペクトルカメラで撮影を行った。撮影中、指先にはパルスオキシメータを装着し、SpO₂の参照値を取得した。

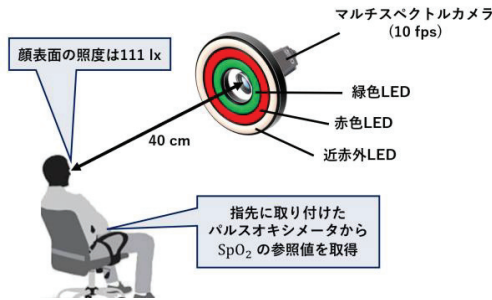


図1 実験環境

実験は、暗室(環境光なし)と蛍光灯下(環境光あり)のそれぞれで行った。暗室における実験の被験者は23.7±1.0歳の男女15名(男性14名、女性1名)であり、蛍光灯下における実験の被験者は23.6±1.0歳の男女20名(男性19名、女性1名)である。1被験者につき3回の測定を行い、1回あたりの測定時間は120秒間とした。SpO₂を低下させる目的で、測定中に呼吸を停止するよう被験者に指示をした。

各手法における環境光の有無によるRMSEの比較結果を図2に、相関係数の比較結果を図3にそれぞれ示す。

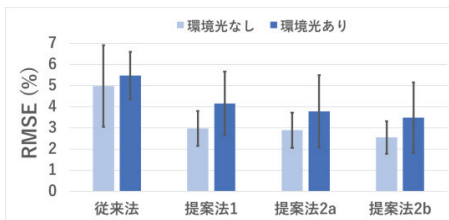


図2 各手法における環境光の有無によるRMSEの比較

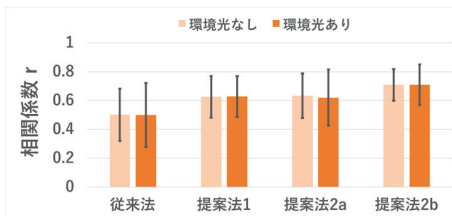


図3 各手法における環境光の有無による相関係数の比較

図2より、従来法と比べて提案法はRMSEが低下していることがわかる。暗室という理想的な条件下において、最も精度の良い手法である提案法2bのRMSEは2.55%となっている。また、環境光がない場合と比べて、ある場合は、全ての手法でRMSEが1%ほど増加しているものの、提案法2aと2bにおいてはRMSEが4%以内を達成していることがわかる。さらに、図3より、従来法と比べて提案法は相関係数が高いが、相関係数自体は比較的に環境光の影響を受けにくいことがわかる。

5. まとめ

本研究では、参照値を必要としないSpO₂の非接触測定手法の確立を目的として、新たな3つの手法を提案した。

また、3つの提案法で求めたSpO₂の推定値の精度を従来法と比較する実験を実施し、各手法における精度比較を行ったところ、従来法と比べて提案法ではRMSEが低下し、相関係数は高くなった。また、環境光の有無による比較を行ったところ、提案法2aと2bについては環境光下であってもRMSEが4%以内であり、参照値との間に強い正の相関がみられた。これらのことから、参照値を利用することなくSpO₂の絶対値を推定できる可能性が示された。

文献

- Shao, Dangdang, et al. "Noncontact monitoring of blood oxygen saturation using camera and dual-wavelength imaging system." *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 63.6 (2015): pp. 1091-1098.
- Mishra, Deepak, et al. "Blood oxygen saturation measurement using polarization-dependent optical sectioning." *IEEE Sensors Journal* 17.12 (2017): pp. 3900-3908.
- Guazzi, Alessandro R., et al. "Non-contact measurement of oxygen saturation with an RGB camera." *Biomedical optics express* 6.9 (2015): pp. 3320-3338.
- Wei, Bing, et al. "Analysis and improvement of non-contact SpO₂ extraction using an RGB webcam." *Biomedical Optics Express* 12.8 (2021): pp. 5227-5245.
- Kim, Na Hye, et al. "Non-contact oxygen saturation measurement using YCgCr color space with an RGB camera." *Sensors* 21.18 (2021): pp. 6120.

修士学位論文要約（令和 5 年 3 月）

小型 EV 用アキシアルギャップ型 SR モータの運転領域拡大に関する研究

中澤 貫太

指導教員：中村 健二

A Study of Expanding the Operating Range of Axial-Flux type SR Motor for Compact EV

Kanta NAKAZAWA

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、内燃機関自動車が排出する CO₂ による地球温暖化や、化石燃料の枯渇可能性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ドライブ方式が提案されている。この方式は、ホイール内部にモータを直接格納し、モータの動力をギヤやシャフトを介さず伝達する。これにより車内空間の拡大や伝達機構省略による機械損の低減、各輪独立制御による走行性能の向上が期待される。一方、駆動用のモータには機械的な外乱や高温環境下における駆動にも耐えう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方式に適するモータの一つとして、スイッチトリラクタンス (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、堅牢で安価である⁽¹⁾。また、永久磁石が不要であることから、励磁を行わないときに逆起電力が生じないため、電気的な安全性も高い。

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アルギャップ型スイッチトリラクタンスモータ (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、走行試験にも成功をした。一方で、従来のモータ制御手法では、高速回転時における出力トルクが顕著に低下することが明らかとなった。

そこで本研究では、高速回転時におけるトルクを向上させ、車両としての運転領域を拡大する SR モータの制御手法について検討を行った。

2. AFSRM の運転領域拡大に適した制御法に関する検討

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 (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、出力トルクが常に一定に追従できるよう、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 0 A に減衰するよう励磁終了角を推定する。これにより各相で生じる負トルクの影響を最小限としている。一方で、通電区間が固定されているため高速回転時では、励磁時間が不足し、所望のトルクの発生に必要な電流が立ち上がらず、トルクが低下するという課題が明らかとなった。そこで本論文では、回転速度やトルク

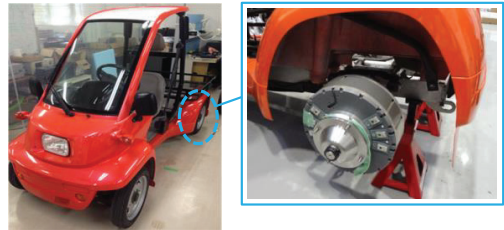


図 1 インホイール AFSRM 搭載の小型 EV

222 mm	Exciting voltage:	72 V
	Gap length:	0.3 mm
	Winding turns / pole:	99 turns
	Winding space factor:	62%
	Weight:	14.4 kg
	Weight including case:	32.3 kg
	Core material:	35A300

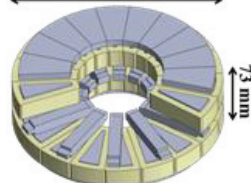


図 2 試作 AFSRM の基本構成

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法を提案する。

図3に提案する制御法の模式図を示す。同図に示すように、提案手法では励磁区間を3つのSectionに分け制御を行う。まず、Section Iでは $\theta = \theta_e$ において相トルクが $1/2T^*$ に到達できるように、(1)式に基づいて励磁開始角 θ_b を算出し、励磁を開始する。

$$\theta_b = \theta_e - \omega \cdot t = \theta_e - \frac{\omega \phi(\theta, \tau)}{V_{DC}} \quad (1)$$

(1)式からわかるように、励磁開始角の算出に回転速度とトルク指令値を用いることで、通電区間を柔軟に調整する。次いで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、前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、所望の角度 θ_e において所望の電流値以下となるよう、励磁終了角は回転数に応じて、(2)式より算出する。

$$\theta_e(t) = \omega \cdot \Delta t + \theta(t) = \frac{\omega \cdot \{ \phi(t) - \phi_e \}}{V_{DC}} + \theta(t) \quad (2)$$

さらにトルク制御法についても改良を行った。従来では、トルク指令値に対し瞬時トルクが常に一定となるよう制御が行われていた。しかし、通電区間を可変としてもなお、トルクが追従できない領域が存在することが明らかとなった。そのため高速・高負荷領域では周期平均トルクが指令値に追従できるよう制御を行う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模式図を示す。アクセルからのトルク指令値を T^* 、合計トルクの最小値を T_{lower} 、これらの差分を $\Delta T = T^* - T_{lower}$ と定義する。また、 ΔT の不足を表す面積を S_1 とする。周期平均で合計トルクが指令値へ追従するには、本来のトルク指令値よりも過剰にトルクが出力されるよう励磁を行い、過剰分の面積 S_2 が S_1 と一致す

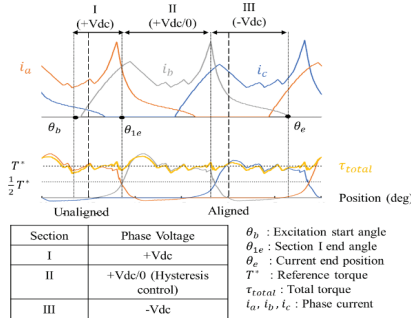


図3 提案制御手法の模式図

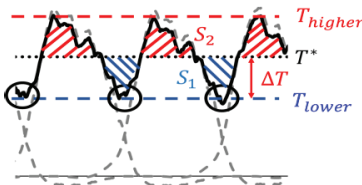


図4 平均トルク制御の模式図

ればよい。本検討では、合計トルク波形が三角波となっていることに着目し、 T_{higher} を(3)式のように定義する。

$$T_{higher} = T^* + \Delta T = 2 \times T^* - T_{lower} \quad (3)$$

このように、モータ制御におけるトルクの目標値 T_{higher} を、アクセルからのトルク指令値 T^* よりも高く設定することで、平均的に指令値への追従を実現する。

図5にIPTDCと提案制御手法を適用した場合の小型EVの加速特性のシミュレーション結果を示す。従来のIPTDCと比べ、提案制御手法では高速域においても加速力を維持できるため、45秒時点ではIPTDCの約1.5倍の速度に達することが明らかとなった。

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。図6に従来手法と提案手法を用いた場合の実測した速度対トルク特性の比較を示す。図6より実測においても提案制御手法を用いることでトルク特性が向上し、特に700rpmでは最大トルクが約2.5倍向上することが明らかとなった。

4. まとめ

以上、本研究では小型EV用AFSRMの運転領域拡大に適した制御法について検討を行った。従来制御手法であるIPTDCと比べて、特に高速域でトルクが著しく向上し、運転領域が大幅に拡大されることがシミュレーションおよび実証実験で明らかとなった。

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)

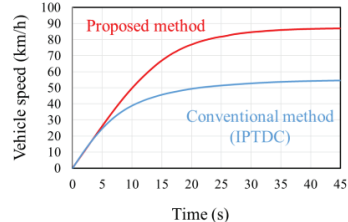


図5 対象小型EVの加速特性

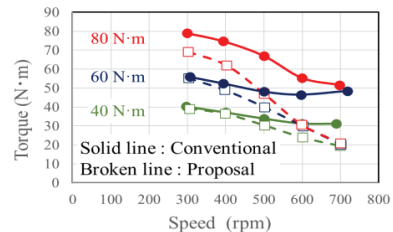


図6 速度対トルク特性の比較

修士学位論文要約（令和 5 年 3 月）

高感度・広ダイナミックレンジ軟 X 線 CMOS イメージセンサと その低ノイズ・高効率信号読み出しに関する研究

原田 将真

指導教員：中村 健二

A Study on High Sensitivity Wide Dynamic Range Soft X-ray CMOS Image Sensors and Low Noise High Efficiency Signal Readout Thereof

Shoma HARADA

Supervisor: Kenji NAKAMURA

This paper presents a backside illumination (BSI) pixel structure for high sensitivity wide dynamic range soft X-ray CMOS image sensor (CIS). A BSI pixel structure with 45- μm thick substrate and thin p+ pinning layer was developed. The prototype CIS chip with the developed pixel structure exhibited over 80% quantum efficiency (QE) under short penetration length lights. A wide dynamic range (WDR) of 128 dB with single-exposure global shutter (GS) operation was achieved. In addition, low noise high efficiency signal readout technology was discussed.

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。一方でこのような分析技術の実現には高輝度な軟 X 線に対応可能なイメージセンサの開発が不可欠である。分析において高い空間分解能と時間分解能を得るには、イメージセンサには広いダイナミックレンジ、高い解像度、高いフレームレート、グローバルシャッター動作等の性能が要求される。また、高輝度光源の利点を活かすには軟 X 線に対する高い感度や高い放射耐性が求められる。

本研究では、NanoTerasu での実用化に向けた、広ダイナミックレンジ、高解像度、高フレームレートを両立する高感度、高放射耐性の軟 X 線 CMOS イメージセンサ(CIS)の創出を目的とする。

2. 軟 X 線検出 CMOS イメージセンサの設計・試作・評価

開発したイメージセンサの画素回路図を図 1 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。回路の後段部には信号保持用のアナログメモリを配置し、グローバルシャッター動作を可能としている。また、LOFIC 容量やアナログメモリ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。

図 2 に開発した裏面照射イメージセンサの試作プロセスフローを示す。基板工程と配線工程の後、ウェハ裏面処理工程において基板を薄化する。このとき、裏面から入射した軟 X 線が表面に形成された素子層へ透過する割合を抑えることで十分な放射耐性を確保するため、基板の厚さは一般的な裏面照射イメージセンサより厚い 45 μm とした。その後低エネルギーのイオン注入によってピンニング層の形成を行う。ピンニング層の不純物濃度ピークよりも浅い位置で発生した光電子については、表面側の電荷蓄積部まで輸送されずピンニング層にて再結合し、感度の低下につながる。そのため、軟 X 線が基板内で光電変換される深さ(侵入長)よりも浅い位置に濃度ピークを持つようなピンニング層の形成が望ましい。軟 X 線の侵入長は 130eV において最も短くなり、40nm である。図 3 に 1keV の低エネルギーイオン注入で形成したピンニング層の不純物濃度プロファイルを示す。約 0.3nm の深さに濃度ピークを持つ急峻なピンニング層の形成に成功した。イオン注入後は、レーザーアニールを用いて不純物の拡散や熱負荷を抑えながら活性化を行った。

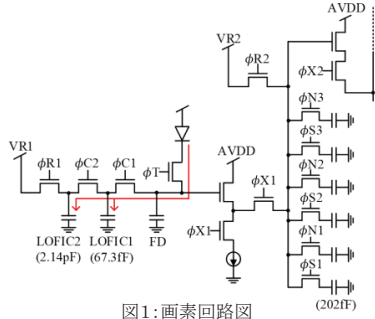


図1:画素回路図

- 基板工程
- 配線工程
- ウェハ裏面処理工程
 - ウェハ薄化~45μm
 - 低エネルギーイオン注入
 - レーザーアニール

図2:プロセスフロー

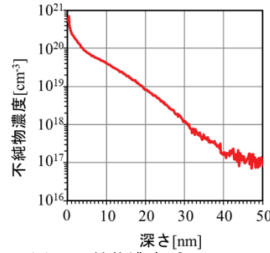


図3:不純物濃度プロファイル

図4に開発したプロトタイプのチップ写真を示す。製造には1-Poly 5-Metal 0.18μm CMOS プロセスを用いた。

光電変換特性を図5に示す。低照度用 S1 信号で 89μV/e、中照度用 S2 信号で 2.4μV/e、高照度用 S3 信号で 75nV/e、の電荷電圧変換ゲインが得られ、単一露光・線形応答にて飽和電子数 23.3Me-とダイナミックレンジ 128dB を達成した。

図6に開発したセンサの量子効率を可視光・紫外光を用いて測定した結果を示す。比較対象として、10keV のイオン注入でピンニング層の形成を行った従来のチップでの測定結果を併せて示す。従来の条件では入射光の侵入長が短くなるに依り量子効率の低下が確認された。また、我々の研究グループで実際に軟 X 線を用いて測定されたデータを同図に示しているが、概ね傾向が一致し、侵入長を指標とした可視光と紫外光による量子効率評価の妥当性が確認された。一方で 1keV のイオン注入で試作したセンサでは侵入長 10nm から 2.6μm の入射光の全領域において 80% 以上の内部量子効率を達成した。

3. 低ノイズ・高効率信号読み出し技術の開発

開発した CIS の更なる性能向上に向け、低ノイズ・高効率信号読み出し画素技術の開発を行った。2段 LOFIC 画素ではトランジスタのオン抵抗に起因する熱ノイズが S2、S3 信号に重畳し、信号つなぎ目の SNR が低下することが課題となっていた。熱ノイズ低減の手法として信号レベルよりも大きな容量でリセットレベルを電荷電圧変換する駆動方式やオン抵抗の低減を提案し、試作したプロトタイプチップにて実証した。

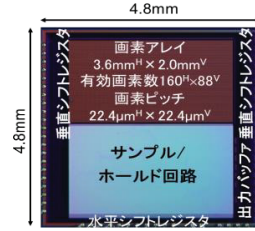


図4:チップ写真

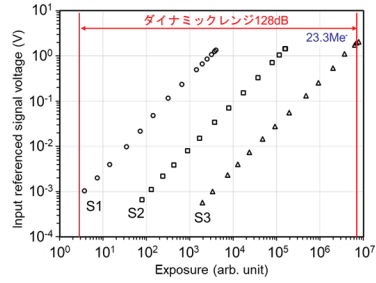


図5:光電変換特性

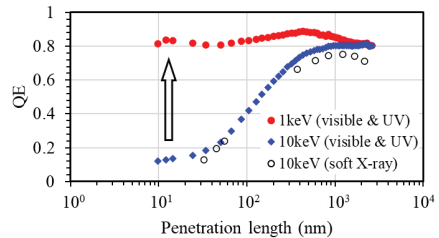


図6:量子効率と入射光の侵入長の関係

また、従来のイメージセンサでは感度の異なる複数の信号を撮像時の照度に関わらず全て出力し、フレームレート低下や消費電力増加の要因となっていた。そこで、照度に応じて必要な信号を選択的に読み出す画素回路技術の開発を行い、新たに原理検証用のプロトタイプチップを設計した。

4. まとめ

2段 LOFIC、45μm 厚の裏面照射フォトダイオード、急峻なピンニング層を有するプロトタイプ CIS の設計・試作・評価を行った。開発した CIS は 128dB の広ダイナミックレンジと、侵入長 40nm 以下の光に対する 80% 以上の高い量子効率を達成した。また、今後の更なる発展に向け、低ノイズ読み出し技術の提案・実証、高効率信号読み出し画素技術の開発および原理検証用チップの設計を行った。

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 5 年 3 月）

高 SNR・広ダイナミックレンジ CMOS イメージセンサの 3 次元高集積構造と非破壊光量判定機能に関する研究

堀江 駿斗

指導教員：中村 健二

A Study on 3D Highly Integrated Structure and Non-destructive Light Intensity Determination Function of High SNR Wide Dynamic Range CMOS Image Sensors

Hayato HORIE

Supervisor: Kenji NAKAMURA

We have developed CMOS image sensors that combine high signal-to-noise ratio (SNR), a wide discriminative light range (wide dynamic range), and highly integrated pixels that can contribute to improving the capability of image sensing to support a safe and secure sustainable society. By combining the two-stage lateral overflow integration capacitor (LOFIC) technology that achieves high saturation performance for both high SNR and wide dynamic range, and the three-dimensional stacking technology and highly integrated pixel structure for highly integrated pixels, we have achieved the prospect of achieving a high saturation performance higher than that of conventional highest performance high saturation sensors while achieving approximately eight times higher pixel integration. Furthermore, a highly efficient signal readout technology that reduces the number of output signals by two-thirds through non-destructive light intensity determination has been developed.

1. はじめに

近年, Society5.0, SDGs といった社会目標が提唱されており, CIS を用いたセンシング技術では, 車載、製造業、農業、医療など, 幅広い分野への応用が期待されている. それぞれの分野で共通して求められる性能としては, ノイズの少ない正確な撮像、明暗差が激しい被写体の撮像、高解像度・小型化がある. ノイズの少ない正確な撮像には信号と雑音の比である SNR の向上, 明暗差が激しい被写体の撮像には露光可能な光の範囲を示すダイナミックレンジの拡大, 高解像度・小型化には集積度の高い画素が求められる. ダイナミックレンジ拡大・SNR 向上には暗時ノイズの低減と飽和電子数の増大によるアプローチがあり, 2 段 LOFIC 方式は画素内に大きさの異なる容量素子を二つ追加することで, フォトダイオードから溢れた光電荷を容量に蓄積させ飽和電子数を高めつつ, 感度の異なる複数の信号を読み出すことで WDR を実現しつつ信号切り替え点で高い SNR を実現する. しかし, 2 段 LOFIC 方式は容量素子の搭載による画素サイズ拡大と出力信号数増加という課題があり, センサの小型化に向けた画素サイズ縮小や高解像度化に向けた低消費電力・出力信号数増加抑制との間にトレードオフがある. 本論文の目的は, 高 SNR・広ダイナミックレンジ・高集積画素を両立する CIS の創出である.

2. 3 次元高集積画素構造を適用した高 SNR・広ダ

イナミックレンジセンサ

従来の 2 段 LOFIC センサでは大きな容量である LOFIC2 の画素占有率が大きいことが課題であった. そこで, 異なるプロセス技術で製造したチップを積層できる 3 次元積層技術を用いて, LOFIC2 を別チップに搭載し画素ごとに集積したセンサ A を開発する. 図 1 に 2 段 LOFIC 画素回路と積層イメージ図を示す. 開発の第一ステップとして LOFIC2 のみを搭載しないセンサチップを試作し, 第二ステップとして, センサチップと LOFIC2 を搭載した容量チップを接続し, 裏面照射型の三次元積層センサを試作する. また, 容量チップには粗面トレンチ型 SiN 膜キャパシタ技術を適用する. これは, 深いトレンチ構造, 粗面ポリ Si による表面積の 3 次元的拡大により, 従来の低リーク容量素子に対して 50 倍程度の高容量密度を実現する技術である. また, 積層時のリーク電流許容値を算出し, 粗面トレンチ型 SiN 膜キャパシタがリーク電流許容値を満たすことを確認した. さらに, FD 容量低減技術を適用し, 低ノイズ化による高 SNR・広ダイナミックレンジ性能の向上も行う. 積層可能な最大容量を積層時は最高 SNR71dB, DR135dB となる見込みを得た.

3 次元積層チップのベースとなるセンサチップを試作し, 図 2 のように明暗差がある撮像対象を単一露光で明瞭に撮像できることを確認した. また, 光電変換特性においては良好な線形性が得られることを確認した. 従来の画素ピッチ $16\mu\text{m}$ の 2 段 LOFIC センサと同等

の高 SNR、WDR 性能を、画素ピッチ $5.6\mu\text{m}$ で達成する見込みが得た。

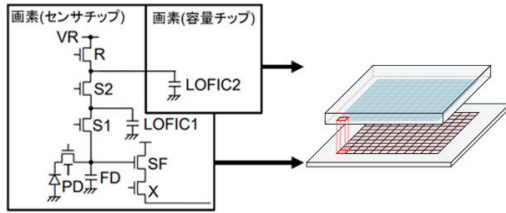


図1:2 段 LOFIC 画素回路と積層イメージ図



(a)高感度 S1 信号 (b)高飽和 S2 信号

図 2:センサチップでの撮影画像

3. 非破壊光量判定機能を搭載した高 SNR・広ダイナミックレンジセンサ

従来の 2 段 LOFIC センサでは感度の異なる 3 つの信号を全画素で照度に関係なく全て読み出していたため、出力信号数が多いという課題があった。そこで、非破壊光量判定機能による出力信号数の削減を目指し、ペア型共用画素と列判定回路の導入を適用したセンサ B を開発する。非破壊光量判定は、画素内の信号を保持したまま列判定回路にて LOFIC1 へのオーバーフロー信号電圧と判定電圧の比較を行い、その結果から光量に応じた適切な信号のみを読み出すという動作になる。従って、非破壊光量判定時の出力結果としては図 3 のようになり、オーバーフロー信号が小さい低照度時は S1 信号と S2 信号のみを読み出し、大きい高照度時は S2 信号と S3 信号のみを読み出す。非破壊光量判定機能により、出力信号数を削減し、多画素化において課題であった高効率な信号読み出しを実現する。

ペア型共用画素は、出力信号読み出し経路とオーバーフロー信号読み出し経路が異なり、オーバーフロー信号が S1 信号に混ざらず S1/S2 信号切替点 SNR を高く保ちやすいという特徴がある。さらに、電荷蓄積部以外の回路素子を複数画素で共有できるため、トランジスタ数を削減し、画素サイズ拡大抑制に効果がある。さらに、この新規画素ではセンサ A で用いた要素技術との両立が可能で、センサ B ではそれらの技術も適用する。その他の新たな要素技術として、トレンチ構造により 3 次元的に表面積を拡大し容量素子の高集積化を行う画素内トレンチキャパシタ技術、転送ゲート T を垂直方向に形成することでシリコン基板の深い領域からも電荷転送が可能になる

Vertical Transfer Gate 技術、リセット電圧と信号読み出し基準電圧を分けることで高照度下における微小な信号変化を読み出す Dual VR 技術を導入した。さらなる高集積化に適した構造、高照度領域での高精度な信号読み出しの実現を目指す。センサ B において積層可能な最大容量を積層した時は最高 SNR71dB、ダイナミックレンジ 136dB となり、センサ A と同等の最高 SNR・広ダイナミックレンジ性能を実現しつつ、センサ A での課題であった S2/S3 信号切替点 SNR がセンサ A の 22.0dB から 34.8dB へ向上する見込みを得た。

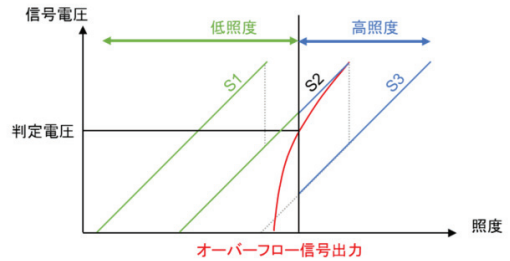


図 3:非破壊光量判定時の出力結果

4. 結論

本研究では、高 SNR・広ダイナミックレンジ・高集積画素の両立する CMOS イメージセンサの設計・試作を行い、センサ A では画素ピッチ $5.6\mu\text{m}$ で積層後の最高 SNR71dB、ダイナミックレンジ 135dB を達成する見込みを得た。センサ B では画素ピッチ $5.6\mu\text{m}$ で最高 SNR71dB、ダイナミックレンジ 136dB を達成しつつ、信号切り替え点でのより高い SNR、画素高集積化に適した画素回路・画素構造・読み出し動作を実現できる見込みを得た。

以上から、高 SNR・広ダイナミックレンジ・高集積画素を両立する CIS を提案した。本研究におけるさらなる高性能化に向けた技術は、今後の車載、生体認証、製造業・農業、医療等のセンシング技術に有用であり、安心・安全な社会の構築に寄与することがおおいに期待される。

文献

- 1) Y. Fujihara, M. Murata, S. Nakayama, R. Kuroda and S. Sugawa, "An Over 120 dB Single Exposure Wide Dynamic Range CMOS Image Sensor With Two-Stage Lateral Overflow Integration Capacitor," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 68, no. 1, pp. 152-157, Jan. 2021, doi: 10.1109/TED.2020.3038621.
- 2) K. Saito et al., "High capacitance density highly reliable textured deep trench SiN capacitors toward 3D integration." Japanese Journal of Applied Physics 60.SB (2021): SBBC06. doi: 10.35848/1347-4065/abec5f.

修士学位論文要約（令和5年3月）

LLG 方程式に基づく磁気ヒステリシスの算定精度向上に関する研究

渡部 樹

指導教員：中村 健二， 研究指導教員：羽根 吉紀

A Study of Calculation Accuracy Improvement of Magnetic Hysteresis based on LLG Equation

Itsuki WATANABE

Supervisor: Kenji NAKAMURA, Research Advisor: Yoshiki HANE

Quantitative analysis of iron loss taking magnetic hysteresis behavior into account is essential to development of high-efficiency electrical machines. In a previous study, a magnetic circuit model incorporating the play model, which is a phenomenological model of DC hysteresis, and the Cauer circuit elements that can represent the frequency characteristic of complex permeability, was proposed. This model can perform fast and accurate analysis of magnetic hysteresis. However, the derivation of play model generally requires measured data of a large number of DC hysteresis loops with different maximum flux densities. In previous research, the derivation method of play model by calculating a lot of hysteresis loops using simplified Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) equation with the minimum necessary measured data was proposed. This paper discusses the calculation accuracy of the LLG equation with a low coercive force permanent magnet used in a variable flux memory motor.

1. はじめに

近年，地球環境保全および省エネルギーの観点から，高効率な電気機器の開発が望まれている。電気機器のさらなる損失低減のためには，磁気ヒステリシスを含む鉄損を定量的に算定可能な手法の確立が必要不可欠である。

上述の課題に対して，先行研究では，直流ヒステリシスを表現可能なモデルの一つであるプレイモデル¹⁾，並びに複素透磁率の周波数特性を表現可能な Cauer 回路²⁾と等価な磁気回路素子を取り入れた磁気回路モデルを提案し³⁾，電磁鋼板のヒステリシスループを高精度に算定可能であることを明らかにした。また，一般にプレイモデルの導出には，最大磁束密度が異なる多数の直流ヒステリシスループ群の実測データが必要だが，簡略化の仮定を取り入れた Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式⁴⁾を用いてループ群を算定することで，必要最小限の実測データからプレイモデルを導出できることを見出した⁵⁾。

本稿では，可変磁束メモリモータに用いられる低保磁力永久磁石を考察対象に用いて，LLG 方程式の計算精度に関して検討を行ったので報告する。

2. 簡略化の仮定を取り入れた LLG 方程式の原理

LLG 方程式による磁化分布の解析では，解析領域を複数の要素に分割して各要素に磁化ベクトル \mathbf{M}_i を割り当て，これらの挙動を次に示す LLG 方程式で解くことで，磁性体内の磁化分布を求めることが

できる。

$$\frac{d\mathbf{m}_i}{dt} = -\gamma |(\mathbf{m}_i \times \mathbf{H}_{eff}) + \alpha (\mathbf{m}_i \times \frac{d\mathbf{m}_i}{dt}) \quad (i = 1 \sim n) \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_{eff} = \mathbf{H}_{app} - \frac{1}{M_s} \frac{\partial}{\partial \mathbf{m}_i} (E_{ani} + E_{ela}) \quad (2)$$

$$E_{ani} = \frac{\hbar_{ani} M_s}{2} (a_1^2 a_2^2 + a_2^2 a_3^2 + a_3^2 a_1^2) \quad (3)$$

$$E_{ela} = \sum_{j=1}^n b_{2j} \overline{m}^{-2j} \quad (4)$$

図1に，文献4)における LLG 方程式のパラメータ $\overline{h_{ani}}$ ， b_{2j} とヒステリシスループの形状の対応関係を示す。 $\overline{h_{ani}}$ は保磁力に比例するパラメータであり， b_{2j} は第1象限の上昇曲線の非線形性を表現するパラメータである。

図2に，電磁鋼板の直流ヒステリシスループの実測値と LLG 方程式を用いた計算値の比較を示す。ここでは， $B_m = 1.2 \text{ T}$ のヒステリシスループ

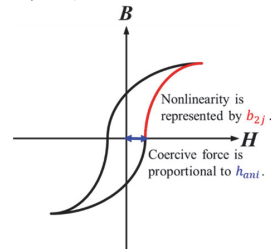


図1 LLG 方程式のパラメータとヒステリシスループの形状の関係

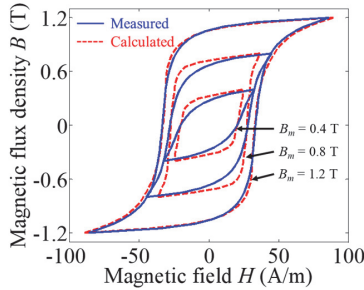


図2 電磁鋼板のヒステリシスループの計算値と実測値の比較

の実測値より $\overline{h_{ani}}$, b_2 を求めた。同図より、実測値と計算値が比較的良好に一致していることが了解される。

3. 可変磁束メモリモータに用いる永久磁石のヒステリシス解析

近年、高効率かつ可変速特性に優れた可変磁束メモリモータが電気自動車用モータとして注目されている。しかしながら、低保磁力永久磁石の磁気ヒステリシスまで考慮したメモリモータの動解析は、ほとんど報告されていない。そこで本稿では、LLG 方程式による永久磁石のヒステリシスループの計算精度について検証を行った。

図 3(a)に、永久磁石のヒステリシスループの実測値と LLG 方程式による計算値の比較を示す。ここでは、 $B_m = 1.25$ T のヒステリシスループの実測値より $\overline{h_{ani}}$, b_2 を求めた。同図より、 $B_m = 1.25$ T については、実測値と計算値が比較的良好に一致している一方で、 $B_m = 1.0$, 0.75 T については、実測値と計算値が大きく異なっており、特に保磁力の誤差が大きいことがわかる。

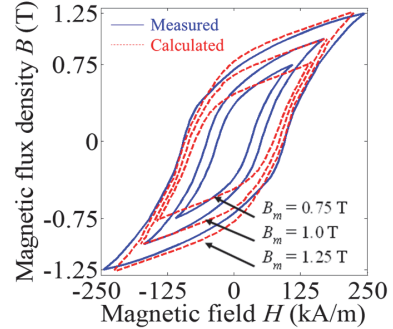
そこで、保磁力の計算値と実測値の比 $g(B_m)$ を求めた後、各 B_m のヒステリシスループを計算する際に、次式に示すように保磁力に比例するパラメータ $\overline{h_{ani}}$ に乗ずることで補正を行った。

$$\overline{h_{ani}}'(B_m) = g(B_m) \times \overline{h_{ani}} \quad (5)$$

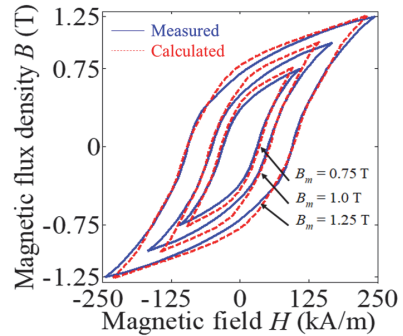
図 3(b)に、 $\overline{h_{ani}}'$ を用いて計算したヒステリシスループを示す。同図より、保磁力の計算精度が向上することで、ヒステリシスループ全体が良好に一致するようになった。

4. まとめ

本稿では、可変磁束メモリモータに用いられる低保磁力永久磁石を考察対象として、LLG 方程式による磁気ヒステリシスの計算精度について検討を行った。その結果、 B_m ごとに保磁力に比例するパラメータ $\overline{h_{ani}}$ の補正を行うことにより、永久磁石の場合においてもヒステリシスループを精度良く算定可能であることが明らかになった。



(a) 非補正時



(b) 補正時

図3 低保磁力永久磁石のヒステリシスループの計算値と実測値の比較

文献

- 1) S. Bobbio, G. Miano, C. Serpico, and C. Visone: "Models of Magnetic Hysteresis Based on Play and Stop Hysteresis", *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 33, No. 6, pp. 4417-4426 (1997).
- 2) Y. Shindo and O. Noro, "Simple Circuit Simulation Models for the Eddy Current in Magnetic Sheets and Wires", *IEEJ Trans. FM*, Vol. 13 4, No. 4, pp. 173 181 (2014).
- 3) Y. Hane and K. Nakamura: "Dynamic Hysteresis Modeling Taking Skin Effect into Account for Magnetic Circuit Analysis and Validation for Various Core Materials", *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 58, No. 4, 7300412 (2022).
- 4) 古屋・藤崎・上原・清水・大島・村上・高橋: 「高周波駆動における電磁鋼板の鉄損評価解析」, 電学研資, SA-13-6, RM-13-6 (2013).
- 5) H. Tanaka, K. Nakamura, and O. Ichinokura, "Magnetic Circuit Model combined with Play Model Obtained from Landau Lifshitz Gilbert Equation", *Journal of Physics: Conf. Series*, Vol. 903, 012047 (2017).

修士学位論文要約（令和5年3月）

全セル同時駆動型近接容量センサとその応用に関する研究

渡部 吉祥

指導教員：中村 健二

A Study on Proximity Capacitance Sensors of Simultaneous Driving Cell Type and Applications Thereof

Yoshiaki WATANABE

Supervisor: Kenji NAKAMURA

Proximity capacitance sensors, which measure the capacitance generated between electrodes in proximity, are used in a wide variety of applications. In this study, a proximity capacitance sensor technology with simultaneous operation of all cells was developed. A 1D proximity capacitance sensor with simultaneous all-cell drive was developed. This sensor can operate at high speed by reducing the number of cells and demonstrated its high performance in small capacitance difference measurement. Also, a global shutter proximity capacitance image sensor was developed that can detect capacitance in all pixels simultaneously and have obtained the prospect of realizing high-speed capacitance imaging. The technology is expected to be applied as a highly efficient measurement device in a wide range of fields such as manufacturing, medicine, life science, information security, and mobile devices, and is expected to make a significant contribution to the development of each field.

1. 序論

静電容量は絶縁された2つの導体の間に、どれくらいの電荷が蓄えられるかを表す量である。近接した電極同士の間に発生する静電容量を測定する近接容量センサは、多様な用途への利用が進んでいる。私が所属する研究グループにおいても高精度近接容量イメージセンサの開発を行ってきた^{1),2)}。本研究グループで開発された先行研究センサは容量・電圧変換型の容量検出方式を導入しており、印加する入力パルスの振幅を対象容量に合わせて変えることで測定容量値のダイナミックレンジを広くしている。また、ノイズキャンセル技術を導入することにより、高精度な容量検出を実現している。先行研究ではzFオーダーの微小な容量の検出を達成している。一方、先行研究センサはローリングシャッタ方式を採用しているため、振幅の大きな入力パルスを毎行ごとに印加する必要がある。振幅の大きな入力パルスのセリングのために数十μsのセリング期間を設ける必要があるため、画素駆動期間の増加を招いている。フレームレートを向上させる方法は主に2つ考えられる。1つはセル数を絞り、1次元の容量センサとすることで、全セル同時に容量検出を行うことである。もう1つは、グローバルシャッタ方式を導入した近接容量イメージセンサを開発することにより、全画素同時に容量検出を行うことである。本研究では、全セル同時駆動型近接容量センサの開発による近接容量センサのさらなる高性能化を目的とする。具体的には、セル数を

絞ることで高速動作が可能な全セル同時駆動の1次元近接容量センサの開発及び少ないチャンネル数で使用可能な特定用途への応用と、全画素同時に容量検出可能なグローバルシャッタ近接容量イメージセンサの開発による容量撮像高速化を目指す。

2. 全セル同時駆動型近接容量センサの要素技術

図1に容量検出回路図と動作パルス図^{1),2)}を示す。

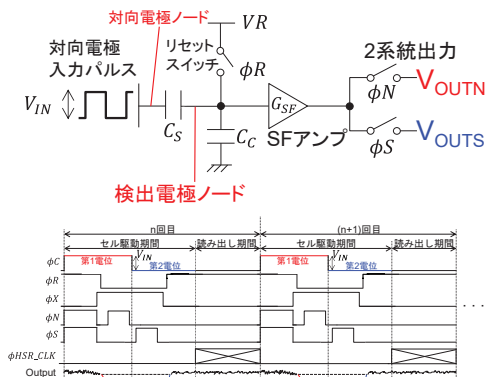


図1 容量検出回路と動作パルス図

始めに対向電極を第1電位に固定し、検出電極をリセットする。ここからリセットトランジスタを遮断領域とすると、検出電極ノードに熱ノイズが取り込まれる。この時の電位をVOUTNとして読み出す。続いて検出電極を第

2 電位に変化させると、 C_C と C_S に応じて検出電極の電位も変化する。これを V_{OUTS} として読み出す。 V_{OUTN} は熱ノイズや SF の閾値ばらつきを含み、 V_{OUTS} はこれに加えて信号成分を含んでおり、これらの差分を取ることによってノイズ成分を除去することができる。最終的な出力は以下の式(1)で表される。

$$V_{OUT} = V_{OUTN} - V_{OUTS} = \frac{C_S}{C_C + C_S} \cdot V_{IN} \cdot G_{SF} \quad (1)$$

このノイズキャンセル(NC)動作により高精度な容量検出を実現する。

3. 近接容量検出技術を用いた微小容量差計測

1 次元近接容量センサの開発及び少ないチャンネル数で使用可能な特定用途への応用として微小容量差計測に取り組んだ。ガス圧力計測や液面計、バッテリーの膨張検知など様々な用途で高精度な微小容量差計測が求められている。高精度微小容量差計測のための近接容量センサの設計・試作ならびに測定を行った。入出力特性において良好な線形性と、ノイズキャンセル技術と複数回平均化により動作速度を高速に保ちつつノイズが低減された測定結果を得ることができた。これにより、高精度な容量検出と高速動作を両立可能であることを示した。また、微小容量差計測のための最適なシステムパラメータについて計算を行った。微小容量変化 ΔC_S に対する微小出力差 ΔV_{OUT} の値を最大化するためには、検出電極-対向電極間距離は可能な限り小さく設計することが望ましく、基準容量 C_{S0} と検出電極寄生容量 C_C は可能な限り近い値となるように設計することが望ましいことが明らかになった。

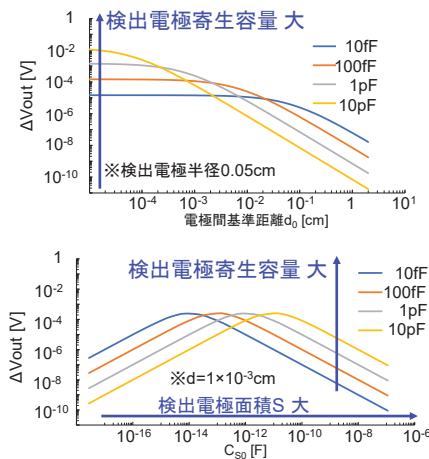


図2 微小容量差計測における最適なシステムパラメータ

また、微小容量差計測実証実験を行い基準容量 3.4fF に対して 1%以下の微小容量変化の検出を達成した。

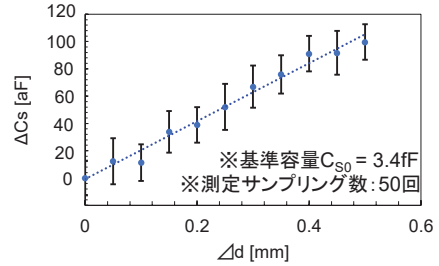


図2 微小容量差計測実験結果

さらに、MCC 技術と Dual VR 信号読み出し技術を搭載したチップを設計し、それを用いることで微小容量変化に対する SNR の向上が見込まれる。

4. 全画素同時駆動による容量撮像高速化

全画素同時に容量検出可能なグローバルシャッタ近接容量イメージセンサの開発による容量撮像高速化にも取り組んだ。グローバルシャッタ近接容量イメージセンサを設計し、画素共有や高容量密度 Si トレンチキャパシタ³⁾を用いることで解像度を高く保ちつつ、200 fps という高フレームレートを実現する見込みを得た。また、広ダイナミックレンジ動作により、100 dB 以上の容量検出のダイナミックレンジを実現する見込みを得た。また、画素ビニングによるバースト撮像では連続5コマで約10000 fps 以上の超高速撮像を実現する見込みを得た。本センサは先行研究では報告されていないフレームレート 100 fps 以上、画素面積 100 μm^2 以下、画素数 10 万画素以上、ダイナミックレンジ 100 dB 以上の4つすべてを同時に達成する見込みがあり、対象物を高解像度・高精度・高速にイメージングすることに有用である見込みを得た。

5. 結論

本研究では、全セル同時駆動型近接容量センサの開発を行った。セル数を絞ることで高速動作が可能な全セル同時駆動の1次元近接容量センサを開発し、少ないチャンネル数で使用可能な特定用途への応用としてガス圧力計測などに適用可能な高精度微小容量差計測に取り組み、その実証と今後の更なる高精度化の見込みを得た。また、全画素同時に容量検出可能なグローバルシャッタ近接容量イメージセンサを開発し、容量撮像高速化を実現する見込みを得た。本研究の技術は、幅広い分野において、高効率な測定機器としての応用が期待される。

文献

- 1) M.Yamamoto, et al., IEEE IEDM, pp.660-663, 2018.
- 2) Y.Sugama, et al., MDPI Sensors, Vol.24, No.7, 2022.
- 3) M.Suzuki, et al., MDPI Sensors, Vol.20, No.4, 2020.

修士学位論文要約（令和5年3月）

スパースイジングモデルベース
量子アニーリングシミュレーションのための
直接マッピングアーキテクチャ

大間 祐太

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

Direct Mapping Architecture for Sparse-Ising-Model-Based
Quantum Annealing Simulation

Yuta OHMA

Supervisor: Masanori HARIYAMA,

Research Advisor: Hasitha Muthumala WAIDYASOORIYA

Quantum annealing is a probabilistic approximation method to find the global optimum of a combinatorial optimization problem. Since the number of qubits in quantum annealers is limited, it is difficult to use those to solve large-scale real-world problems. Therefore, quantum annealing simulation based on Ising model using digital computers is necessary. Highly sparse Ising models require significantly low amount of computations while allowing parallel operations among mutually independent operations. One the other hand, sparsity is not the same and connections among spins are highly irregular for different problems. Therefore, it is very difficult to design a hardware architecture that allows highly parallel operations. In this research, we represent the spins and connections as OpenCL kernels and channels respectively. Since channels can detect data arrivals, the proposed architecture automatically schedules the operations to perform with a high degree of parallelism. We implemented the proposed accelerator on FPGA and confirmed the correct behavior.

1. 緒言

近年、より大規模な組合せ最適化問題を解く機会が増えているが、組合せ最適化問題を汎用的に解く量子アニーラーは現行のものでは大規模な問題を解く事は困難である。従って、電子計算機を用いてシミュレートする”量子アニーリングシミュレーション”を使用する必要がある。

量子アニーリングシミュレーションでは組合せ最適化問題をイジングモデル¹⁾と呼ばれる、スピンとスピン同士の結合による磁性体の性質を表す統計力学上のモデルとして表現して計算を行う。イジングモデルはデンスイジングモデルとスパースイジングモデルの二つに分かれる。スパースイジングモデルとは相互作用のあるスピン間の相互作用のみを考えるものであり、スピン間の結合数が少ないモデルである。

スパースイジングモデルに対する処理は並列性は高いが処理の規則性が低く、並列実行のための制御が非常に複雑になり、効率のいいハードウェアの設計は難しい。本研究では、処理間のデータの流れを認識することで、依存関係のない処理を自動的に並列に行えるようにスケジューリン

グできる新しい設計方針に基づいたアーキテクチャを提案する。

2. 直接マッピングアーキテクチャとプロトタイプの実装評価

各スピンを独立に動作させる事で高い並列性を引き出すアーキテクチャを実現すべく、FPGAを用いたハードウェア設計を提案する。回路設計において、各スピンを演算部、スピン間結合をデータパスとして実装する(図 1)²⁾。回路設計はOpenCLで行い、演算部はkernel、データパスはchannelと記述した。各カーネルはユーザーの指示なしに独立に動作する。チャンネルによるデータ送受信において、受信処理時にデータがチャンネルに存在しなかった場合、カーネルの動作は一時停止される。これにより、複雑な並列処理の制御を実行できるようになった。

以上の構成でFPGA(Intel Stratix 10 GX)に実装した。使用したグラフは乱数を用いて生成された80スピンの重み付き無向グラフである。結果、結合率2.50%のそれに対してロジック使用率が81%となり、大規模な問題に対応する必要性があることが分かった。

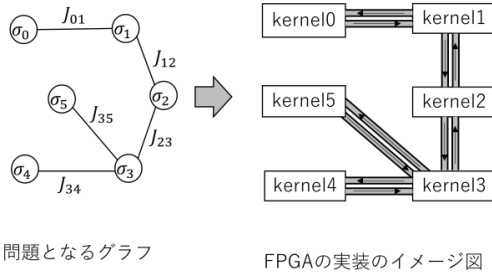


図1 FPGAによる問題モデルの直接マッピング

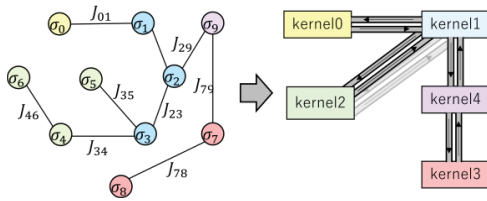


図2 大規模化に対応する構成の模式図

3. 大規模化の構想とアーキテクチャの自動生成

複数のスピンを1つのカーネルへ割り当て、1カーネル内で複数のスピンの計算を行うことで大規模化する手法(図2)を考える。従って、計算回数の減少やモデルの簡略化は行わない。

また、コンパイル命令等一部操作を除けば実際に組合せ最適化問題のモデルを与えられてからカスタムアーキテクチャの生成を自動で行う環境を構築した。

4. カスタムアーキテクチャの実装結果と評価

上記の構成に対し、スピンの数 200,400(結合率各およそ 1%)のグラフを割り当て数を変更しながら実装した。その結果が表1である。大規模化への対応は出来たが、未だ実用的な問題を扱える規模には至っていない事が判明した。また、先行研究³⁾と比較しても処理時間は比較的良好であるが、改善の余地があることが分かった。

また、スピンの割り当て方法をスピン番号順に割り当てていた方法から、なるべく互いに結合しているスピン同士を同カーネルに割り当てる方法へ変更し実装した(表2)。なお、表2中では前者をランダム、後者をクラスタとした。スピンの数は200である。結果から割り当て方法が使用面積・処理時間に大きな影響を与えることが確認できた。この変化は、同時処理の実行が不可能なスピンを同カーネルに割り当てたことにより並列度が上昇したことに起因すると考えられる。

5. 結言

大規模なスパースイジングモデルの組合せ最適化問題を高速に解くための量子アニーリング

表1 大規模化後の実装結果

スピンの数	グループ サイズ	ロジック 使用率[%]	処理時間 [ms]
200	8	87	1.46
	10	43	1.35
	13	40	1.10
400	10	83	4.10
	20	85	4.98
	30	95	10.69
	40	failed	

表2 割り当て方法による実装結果の違い

グループ サイズ	方法	ロジック 使用率[%]	処理時間 [ms]
10	ランダム	43	1.35
10	クラスタ	88	0.78
13	ランダム	40	1.10
13	クラスタ	84	0.62

シミュレーションを行う、直接マッピング方式のFPGAアクセラレータアーキテクチャの基本構成を述べた。今後の展望として、使用面積の削減による大規模化、スピンのカーネルへの割り当て方法の最適化、複数FPGAの使用による大規模化への対応、実空間繰り込み群等によるスピンの減少による問題の簡略化等が挙げられる。

文献

- 1) T. Kadowaki and H. Nishimori, "Quantum annealing in the transverse Ising model", Phys. Rev. E, Stat.Phys.Plasmas Fluids Relat. Interdiscip. Top., vol.58, no.5, pp.5355-5363, Nov.1998
- 2) 大間祐太, ウィッヂヤスーリヤ ハシタ ムトゥマラ, 張山昌論, "スパースイジングモデルのための量子アニーリングアクセラレータの設計", 信学技報, vol.122, no.60, RECONF2022-10, pp.45-47, Jun.2022
- 3) Hasitha Muthumala Waidyasooria, Masanori Hariyama, "Highly-Parallel FPGA Accelerator for Simulated Quantum Annealing", EMERGING TOPICS IN COMPUTING, Vol.9, No.4, pp.2019-2029, Oct-Dec.2021

修士学位論文要約（令和5年3月）

虹彩および眼周囲画像を用いた個人認証に関する研究

川上 庄慶

指導教員：青木 孝文

Person Authentication Using Iris and Periocular Images

Shokei KAWAKAMI

Supervisor: Takafumi AOKI

Multimodal biometrics, which is person authentication using multiple biometric traits, is highly reliable and convenient person authentication compared to unimodal biometrics. This paper proposes a multimodal biometric method using iris and periocular recognition. The proposed method extracts iris and periocular features from a single image using Convolutional Neural Network (CNN). We combine iris and periocular recognition by fusing matching scores calculated from each feature. Through a set of experiments using periocular image databases, we demonstrate that the proposed method exhibits higher recognition accuracy than conventional methods.

1. はじめに

高いセキュリティが要求される出入国管理や電子決済を円滑に行うために、信頼性と利便性を兼ね備えた個人認証技術が必要とされている。そのような個人認証技術の一つに生体認証がある。生体認証とは、人の身体的・行動的特徴（以下、生体特徴）を用いた個人認証技術である。例として、顔認証や虹彩認証などがあり、これらはそれぞれ異なる性質を持つ。虹彩認証や指紋認証は、識別性能が高いため信頼性に優れるが、センサとの接触を伴ったり特定の動作を必要としたりするため、利便性に劣る。一方で、顔認証や歩容認証は、非拘束な状態で利用できるため利便性に優れるが、識別性能が低いため信頼性に劣る。単一の生体特徴を用いて信頼性と利便性を両立した認証を行うことは困難である。本論文では、複数の生体特徴を有する目周辺の領域に着目し、信頼性に優れる虹彩認証と利便性に優れる眼周囲認証を組み合わせた生体認証手法を提案する¹⁾。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) を用いて虹彩画像および眼周囲画像から特徴を抽出し、それぞれの特徴量から算出される照合スコアを統合することで、虹彩認証と眼周囲認証を組み合わせる。虹彩の特徴抽出および照合においては、オクルージョンの影響を抑制するために、虹彩画像を小領域に分割し、各小領域から特徴を抽出する。また、CNN にアテンション機構を導入したり、虹彩および眼周囲の変動を再現するデータ拡張を

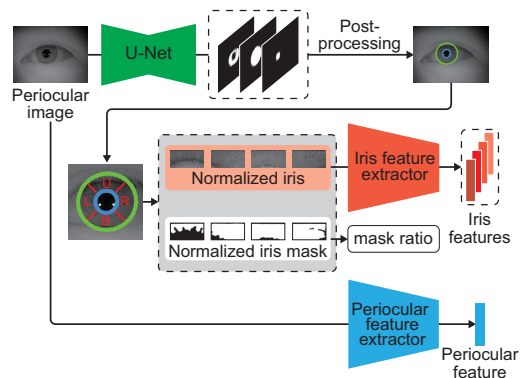


図1 提案手法の概要

適用したりすることで、認証精度を向上させる。眼周囲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. 虹彩および眼周囲画像を用いた個人認証

提案手法の概要を図1に示す。提案手法では、CNNを用いて虹彩および眼周囲画像から個別に特徴を抽出し、それぞれの特徴量から算出される照合スコアを統合することで、虹彩認証と眼周囲認証を組み合わせる。まず、U-Net²⁾を用いて眼周囲画像から虹彩に関する3つのマスク画像を生成し、輪郭抽出と楕円あてはめの後処理を施すことで虹彩領域を表す楕円パラメータを推定する。次に、推定した楕円に基づいて、虹彩を4つの小領域に分割し、各

表1 提案手法における各モダリティの認証精度

Modality	EER [%]	
	Thousand DB	Distance DB
Iris	0.879	6.846
Periocular	0.858	1.586
Iris and periocular	0.366	1.128

小領域を矩形に正規化する。最後に、虹彩特徴抽出器と眼周囲特徴抽出器を用いて、小領域に分割された虹彩画像と眼周囲画像のそれぞれから特徴量を求める。虹彩特徴抽出器および眼周囲特徴抽出器として、SE-ResNet-18³⁾を用いる。CNNの学習時には、虹彩および眼周囲の変動を再現するデータ拡張を用いる。また、虹彩画像に含まれるまつ毛やまぶたといった非虹彩領域の影響を減らすために、虹彩画像に占める非虹彩領域の割合（マスク比率）に基づいて学習データを選別する。認証時は、虹彩と眼周囲のそれぞれから特徴を抽出して照合スコアを求め、これらを統合することで最終的な照合スコアを算出する。ただし、虹彩の照合では、小領域ごとに照合スコアを算出し、マスク比率に基づいた重みづけを行うことによって、オクルージョンの影響を抑制した照合スコアを算出する。

3. 公開データセットを用いた性能評価実験

本実験では、CASIA-Iris-Thousand (Thousand DB), CASIA-Iris-Distance (Distance DB), CASIA-Iris-Mobile-V1.0 (M1-S3 DB)¹⁾の3つのデータベースを用いて、認証精度の評価を行う。評価指標として、本人拒否率と他人受入率が一致するときのエラー率である Equal Error Rate (EER) を用いる。EERは、値が小さいほど認証精度が高いことを表す。提案手法における各モダリティの認証精度を表1に示す。表1より、虹彩と眼周囲を組み合わせて認証を行うことで、認証精度が大幅に向上することがわかる。次に、Distance DB および M1-S3 DB を用いた提案手法と従来手法の認証精度の比較を表2および表3に示す。両データベースにおいて、提案手法は従来手法より高い認証精度を達成している。

4. まとめ

本論文では、信頼性と利便性を両立した個人認証を実現するために、虹彩認証と眼周囲認証を組み合わせた生体認証手法を提案した。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示した。今後の展望として、虹彩認証と眼周囲認証を

表2 Distance DB を用いた認証精度の比較

Method	Modality	EER [%]
OSIRIS ⁴⁾	Iris	17.13
UniNet ⁵⁾	Iris	5.54
AttNet ⁶⁾	Periocular	14.27
UniNet+AttNet ⁷⁾	Iris and periocular	2.29
Proposed	Iris and periocular	1.13

表3 M1-S3 DB を用いた認証精度の比較

Method	Modality	EER [%]
Maxout CNNs ⁸⁾	Iris	1.88
	Periocular	1.89
	Iris and periocular	0.60
Proposed	Iris	1.47
	Periocular	1.25
	Iris and periocular	0.57

組み合わせたワークスルー認証システムの実現が挙げられる。

文献

- 1) S. Kawakami, H. Kawai, K. Ito, T. Aoki, Y. Yasumura, M. Fujio, Y. Kaga, and T. 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) N. Othman, B. Dorizzi, and S. Garcia-Salicetti, "OSIRIS: An open source iris recognition software," Pattern Recognition Letters, vol.82, no.2, pp.124-131, Oct. 2016.
- 5) Z. Zhao and A. Kumar, "Towards more accurate iris recognition using deeply learned spatially corresponding features," Proc. Int'l Conf. Computer Vision, pp.3829-3838, Oct. 2017.
- 6) Z. Zhao and A. Kumar, "Improving periocular recognition by explicit attention to critical regions in deep neural network," IEEE Trans. Information Forensics and Security, vol.13, no.12, pp.2937-2952, Dec. 2018.
- 7) K. Wang and A. Kumar, "Periocular-assisted multi-feature collaboration for dynamic iris recognition," IEEE Trans. Information Forensics and Security, pp.866-879, Sept. 2021.
- 8) Q. Zhang, H. Li, and Z. Sun, "Deep feature fusion for iris and periocular biometrics on mobile devices," IEEE Trans. Information Forensics and Security, vol.13, no.11, pp.2897-2912, Nov. 2018.

¹<http://biometrics.idealtest.org>

修士学位論文要約（令和 5 年 3 月）

LPWA を用いた IoT 機器のための 移動エージェントフレームワークに関する研究

坂本 和也

指導教員：長谷川 剛， 学位論文指導教員：北形 元

Research on Mobile Agent Framework for IoT Devices over LPWA

Kazuya SAKAMOTO

Supervisor: Go HASEGAWA, Research Advisor: Gen KITAGATA

In networks using LPWA and small-scale IoT devices, it is important to suppress communication traffic due to the slow communication speed of LPWA. In the field of WSNs, a communication traffic reduction method using mobile agents has been proposed for the suppression of communication traffic in networks with IoT devices. However, these studies have not shown concrete implementations of mobile agents in small-scale IoT devices. Moreover, studies aiming at implementing mobile agents in small-scale IoT devices do not discuss the communication traffic generated by the movement of mobile agents and message communication. Therefore, this paper proposes a mobile agent framework for IoT devices using LPWA. The proposed framework gives a concrete implementation for small-scale IoT devices by reducing memory consumption. Furthermore, the amount of communication generated by the agents is reduced by introducing a compression method that takes their respective characteristics into account during agent movement and message communication. Experimental implementation of the data collection application showed that the proposed framework can reduce the sensor data collection time by 21.4%~43.7%, confirming the effectiveness of the proposed framework.

1. はじめに

屋外の環境情報の観測などにおいて、低消費電力と長距離通信を兼ね備えた通信方式である LPWA (Low Power Wide Area) と、小規模な IoT (Internet of Things) 機器を利用したネットワークは広く活用されている[1]。LPWA を用いることで、広域なネットワークが構成可能となるが、通信速度は Wi-Fi や Bluetooth 等の他の無線通信方式と比較して遅い。そのため、ネットワークを流れる通信量が増加すると、通信速度の遅さが顕著な問題となる。

そこで、WSN (Wireless Sensor Network) の分野では、移動エージェントを用いて、ネットワークの経路上でデータ処理を行うことで通信量を削減する研究が存在する[2]。しかし、[2]の研究は、シミュレーションによる評価のみであり、メモリの制約がある小規模な IoT 機器で稼働する具体的な移動エージェントの実装は示されていない。また、小規模な IoT 機器向けの移動エージェントミドルウェアの研究[3]では、具体的な IoT 機器への実装を示しているが、LPWA のような通信速度の遅い通信方式は想定されておらず、エージェントの移動やエージェント間の通信に伴う通信量については議論されていない。

そこで、本論文では、エージェントの移動やエージェント間通信に伴う通信量の削減と、IoT 機器への具

体的な実装を可能にする移動エージェントフレームワーク (以降、提案フレームワークと表記) する。

2. LPWA を用いた IoT 機器のための移動エージェントフレームワーク

提案フレームワークは、IoT 機器上で移動エージェントを動作させるための実行環境と、その上で稼働する移動エージェントから成る。また、PC で動作する既存の移動エージェントフレームワーク[4]と同様にルール型の移動エージェントを想定する。提案フレームワークでは、エージェントの機能を選定して構成することで、実装におけるメモリ消費量を削減する。さらに、LPWA の利用を想定し、エージェントの移動とエージェント間通信のデータサイズを削減するため、それぞれ移動エージェントの省サイズ化とエージェント間通信メッセージの省サイズ化を行う。

2.1. 移動エージェントの省サイズ化

エージェント記述では同じ単語が複数回使用されることが多い。そこで、エージェント記述の単語をインデックス番号に置き換えることで、送信するデータサイズを削減する。図 1 に、移動エージェントの省サイズ化を行う例を示す。エージェント記述の単語を抽出し、インデックス番号と単語の対応表である辞書を作成したのち、インデックス番号でエージェント記述を置き換える。エージェントの移動の際には置き換えた

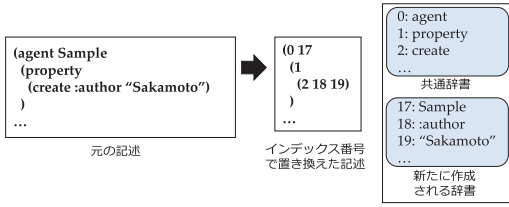


図1 移動エージェントの省サイズ化を行う例

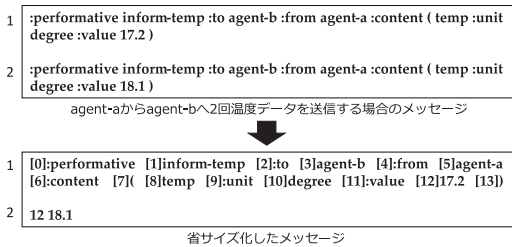


図2 エージェント間通信メッセージの省サイズ化を行う例

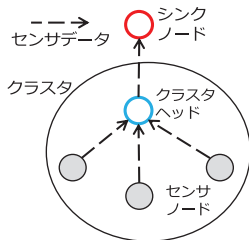


図3 データ収集アプリケーションの概要

記述と辞書を送信することで、データサイズを削減する。また、使用頻度の高い単語は共通辞書として、あらかじめ各フレームワークに内蔵することで、送信する辞書のサイズを削減する。

2.2. エージェント間通信メッセージの省サイズ化

エージェント間のメッセージ通信では、同じ種類のメッセージは、含まれる単語やその順序が変わらないことが多い。そこで、直前に送信したメッセージと比較して、差分のある部分のみを送信することで、送信するデータサイズを削減する。図2に温度データを2回送信する際のエージェント間通信メッセージの省サイズ化の例を示す。省サイズ化したメッセージでは、差分である「18.1」と、その位置を表す「12」のみを送信することで送信データサイズを削減する。

3. データ収集アプリケーションを用いた実験・評価

提案フレームワークを用いて、クラスタを利用したデータ収集アプリケーションを実装した。図3に、アプリケーションの概要を示す。アプリケーションはクラスタリングを用いてセンサノードからデータ収集を行い、シンクノードに集約する。また、本実装ではIoT機器としてESP-WROOM-32、通信モジュールとしてIM920sL、センサモジュールとしてENV-III Unitを使用した。

表1 クラスタヘッドがクラスタ内のセンサノードからセンサデータを収集する時間

	省サイズ化を行う場合 (s)	省サイズ化を行わない場合 (s)
ノード数が5の場合	0.9	1.6
ノード数が10の場合	2.2	2.8
ノード数が15の場合	3.3	4.2

提案フレームワークにおける移動エージェントの省サイズ化とエージェント間通信メッセージの省サイズ化の効果により、センサデータの収集時間を短縮できることを示すため、クラスタヘッドがクラスタ内のセンサノードから1回分のセンサデータを収集するのに要する時間を計測した。表1に、計測結果を示す。ノード数が5, 10, 15のいずれの場合においても、省サイズ化を行うことによりセンサデータの収集時間を短縮できることを確認した。表1の結果より、ノード数が5の場合で約43.7%、ノード数が10の場合で約21.4%、ノード数が15の場合で約21.4%削減できたことが分かる。センサデータの収集時間の短縮は、より短い間隔でのデータ収集や、単位時間あたりに収集できるデータ数の向上につながる。

4. まとめ

本論文では、LPWAを用いたIoT機器のための移動エージェントフレームワークを提案した。提案フレームワークは、搭載するエージェントの機能を制限することでメモリ消費量を削減した。また、LPWA通信を想定し、エージェントの移動とエージェント間通信を行う際のデータサイズを削減した。LPWAと移動エージェントを用いたデータ収集アプリケーションにおいて、提案フレームワークを用いることにより、センサデータの収集時間を21.4% ~ 43.7%短縮できることを示し、提案フレームワークの有効性を確認した。

文献

- 1) “LPWA が拓く地域の IoT 社会:KDDI における LPWA の活用事例,”<https://www.dekya.or.jp/info/2019/01/seminar/5499/>. (Accessed on 2022/11/15)
- 2) J.-G. Cao, “A data fusion routing algorithm in wireless sensor network based on mobile agent,” in *Proceedings of 2013 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, vol. 01, pp. 1-4, July 2013.
- 3) C.-L. Fok, G.-C. Roman, and C. Lu, “Agilla: A mobile agent middleware for self-adaptive wireless sensor networks,” *ACM Transactions on Autonomous Adaptive Systems*, vol. 4, July 2009.
- 4) 原英樹, “DASH ユーザマニュアル,” <https://uchiya.web.nitech.ac.jp/idea/html/index.html>. (Accessed on 11/15/2022).

修士学位論文要約（令和5年3月）

畳み込みニューラルネットワークを用いた指紋認証の高性能化に関する研究

流石 凧彩

指導教員：青木 孝文

Performance Improvement of Fingerprint Recognition Using Convolutional Neural Network

Nagisa SASUGA

Supervisor: Takafumi AOKI

In this paper, we propose a fingerprint recognition method using multi-task Convolutional Neural Network (CNN) with multiple attention mechanisms. Multi-task CNN based on ResNet-34 extracts fixed-length fingerprint representations which include texture and minutia information. We introduce multiple attention mechanisms, which are effective in image recognition tasks, to multi-task CNN to improve its performance with little increase in the number of parameters. Through experiments of performance evaluation using FVC 2004 DB1, we demonstrate the effectiveness of our method.

1. はじめに

指紋認証は、鍵やパスワードを用いる個人認証に比べて利便性が高いことや、指紋撮像センサが安価で小型化可能であることから、様々な場面で利用されている。一般的な指紋認証では、マニューシャと呼ばれる指紋特徴点の情報を用いて指紋画像間の照合が行われる。マニューシャを正しく検出できれば正確な認証が可能である一方で、低品質な指紋画像に対しては認証精度が低下する。そこで、畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network: CNN) を用いた手法が提案されている¹⁾。CNNを用いた手法では、指紋画像から、テクスチャ、マニューシャ、周波数の情報に由来する固定長の指紋特徴を抽出できる。一方で、CNNを用いた既存手法には、認証精度向上のために追加したモジュールにより重みパラメータ数が増加するという問題がある。重みパラメータ数が増加すると、計算量や計算時間が増加したり、使用できるハードウェアが限定されたりする可能性がある。本論文では、重みパラメータ数の増加を抑えつつ認証精度を向上させるために、指紋認証用 CNN にアテンション機構を導入する²⁾。アテンション機構とは、CNNの特定の層で得られる特徴マップにおいて注目すべき領域を強調する仕組みである。アテンション機構をCNNに導入することにより、重みパラメータ数の増加を抑えつつ画像分類精度を高められることが確認されている^{3) 4)}。公開指紋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. 畳み込みニューラルネットワークを用いた指紋認証

アテンション機構を組み込んだCNNを用いて、照合に使用する指紋特徴を抽出する。指紋特徴の抽出に用いるネットワークの概要を図1に示す。Spatial Transformer Networks⁵⁾を用いて指紋画像の回転を補正し、それをMulti-task CNNに入力する。Multi-task CNNでは、テクスチャ特徴とマニューシャ特徴の抽出、およびマニューシャマップの生成が行われる。マニューシャマップとは、マニューシャの位置と角度を表現したヒートマップである。同一のネットワークを用いて特徴抽出とマニューシャマップ生成を行うことで、マニューシャ情報に由来する特徴ベクトルを抽出する。テクスチャ特徴とマニューシャ特徴を結合した特徴ベクトルから、最終的に512次元のベクトルである指紋特徴を抽出する。Multi-task CNNはResNet-34に基づいて設計されている。各ResBlock群に対して図1のように番号を割り当て、以降では“グループ1”のように記載する。提案手法では、シンプルなCNNを用いて行ったアテンション機構に関する基礎実験の結果に基づき、Multi-task CNNのグループ1にTriplet Attention Module (TA)³⁾を、グループ2, 3, 4にGated Channel Transformation (GCT)⁴⁾を導入する。

3. 公開データセットを用いた性能評価実験

公開データセットを用いた性能評価実験を通して、既存手法と提案手法の認証精度を比較する。CNNの

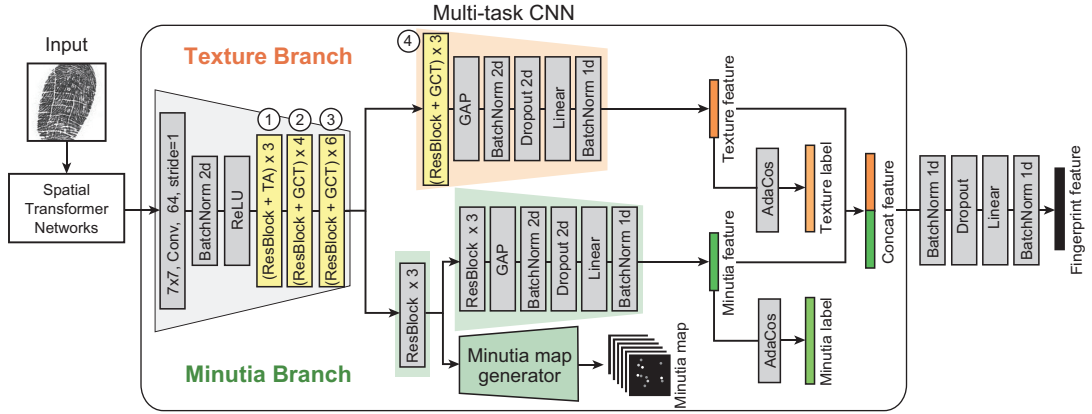


図1 指紋特徴の抽出に用いるネットワーク

表1 既存手法と提案手法の認識精度の比較

Method	EER [%]	# of params [M]
Takahashi et al. ¹⁾	1.41	185.32
Multi-task CNN	0.532	90.66
Multi-task CNN + TA 1 + GCT 234	0.254	90.69

学習には, Multi-sensor Optical and Latent Fingerprint ⁶⁾ の DB1, DB2, DB3 および NIST Special Database の 301 ⁷⁾, 302 ⁸⁾ に含まれる合計 15,673 枚を使用する. 評価には, Fingerprint Verification Competition (FVC) 2004 の DB1 ⁹⁾ に含まれる 800 枚を使用する. 学習時には, データ拡張として Random Noise, Random Contrast, Random Morphology, Random Distortion をそれぞれ 50% の確率で学習データに適用する. 損失関数には AdaCos を用いる. 性能評価指標には, 他人受入率と本人拒否率が一致するときのエラー率である Equal Error Rate (EER) を使用する. EER は値が小さいほど性能が高いことを示す指標である. 表 1 に, FVC 2004 DB1 に対する既存手法と提案手法の認証精度を示す. アテンション機構を導入する前の Multi-task CNN でも既存手法の認証精度を上回っているが, アテンション機構を導入することで更に認証精度が向上している. また, アテンション機構の導入による重みパラメータ数の増加は僅かである. この結果より, CNN の適した位置に適した種類のアテンション機構を組み合わせることで導入することにより, 指紋認証の性能を高めることができると考えられる.

4. まとめ

本論文では, アテンション機構を組み込んだ CNN を用いる指紋認証手法を提案した. 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示した. 今後の展望として, 指紋取得時の環境の変化に依存しない頑健な指紋認証や, 新生児指紋画像にも使用できる指紋認証の実現が挙げられる.

文献

- 1) A. Takahashi et al., "Fingerprint feature extraction by combining texture, minutiae, and frequency spectrum using multi-task CNN," Proc. IEEE Int'l Joint Conf. Biometrics, pp.1–8, Sept. 2020.
- 2) N. Sasuga et al., "Fingerprint feature extraction using cnn with multiple attention mechanisms," Proc. IEEE Int'l Joint Conf. Biometrics, pp.1–8, Oct. 2022.
- 3) D. Misra et al., "Rotate to attend: Convolutional triplet attention module," Proc. IEEE Winter Conf. Applications of Computer Vision, pp.3138–3147, 2021.
- 4) Z. Yang et al., "Gated channel transformation for visual recognition," Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.11791–11800, 2020.
- 5) M. Jaderberg et al., "Spatial transformer networks," Proc. Int'l Conf. Neural Information Processing Systems, vol.2, pp.2017–2025, Dec. 2015.
- 6) A. Sankaran et al., "Multisensor optical and latent fingerprint database," IEEE Access, vol.3, pp.653–665, Apr. 2015.
- 7) G. Fiumara et al., "NIST special database 301: Nail to nail fingerprint challenge dry run," NIST Technical Note, pp.1–16, July 2018.
- 8) G. Fiumara et al., "NIST special database 302: Nail to nail fingerprint challenge," NIST Technical Note, pp.1–15, Aug. 2018.
- 9) D. Maio et al., "FVC2004: Third fingerprint verification competition," Proc. Int'l Conf. Biometric Authentication, pp.1–7, 2004.

修士学位論文要約（令和5年3月）

購買行動予測のための機械学習ベース
マルチエージェントシミュレーション

庄司 航太

指導教員：張山 昌論

Machine-Learning-Based Multi-Agent Simulation
for Purchasing Behavior Prediction

Kota SHOJI

Supervisor: Masanori HARIYAMA

The rapid development and spread of Internet tools such as SNS in recent years has greatly influenced and complicated people’s purchasing behavior. In addition to media promotions and word of mouth of people around them, reviews on SNS of favorite influencers and many other people are directly related to their own purchasing intentions. Multi-agent simulation is often used to simulate complex human decision-making in purchasing behavior. However, it is a very time-consuming task to create a highly expressive simulation model. In this study, we aim to realize more efficient implementation of a highly expressive simulation model by incorporating machine learning into multi-agent simulation.

1. はじめに

近年, YouTube や Twitter, Instagram, TikTok に代表されるような各種インターネットツールが急速に発展・普及し, 情報発信を目的としたツールとして利用されることが多くなっている. その結果, 以前までは口コミやメディアによる宣伝から得られる商品に関する情報が人々の購買意欲につながっていたが, インターネットツールを通じたコミュニケーションや影響力の強いインフルエンサーの発信の影響が大きくなってきている.

複雑化した人々の購買行動をシミュレーションするための手法の一つとしてマルチエージェントシミュレーション (MAS) が挙げられる. 本研究では映画市場を対象として, インターネット及び現実世界の2つのシミュレーション空間上で映画作品及び消費者のエージェントを定義することで購買行動予測の評価を行う.

一方で, MAS モデルを作成する過程においてハイパーパラメータが多く, 複雑で高い表現力の MAS モデル作成は難しい. そこで, 表現力の高い機械学習を応用し MAS モデル作成の効率化を目指す.

2. MAS モデルと機械学習モデル

前述のように, シミュレーションはインターネット及び現実世界の2つの空間で行われ, エージェントには映画作品及び3種類のエージェント (ネットユーザー, ネットフォロワー, 一般消費者) を定義する (図1). ネットユーザーはインターネット上で

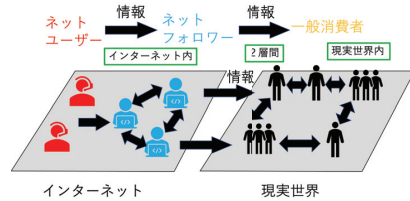


図1. MAS モデルの環境設定

積極的に情報を拡散する役割を担う. ネットフォロワーはインターネット上での情報の収集・拡散及び現実世界への情報の伝達を担う. また, 一般消費者はインターネットから情報を獲得し周囲の一般消費者と共有する. 以降, 単に「消費者エージェント」という場合はネットフォロワー及び一般消費者を指すこととする.

本研究では, 購買行動予測を行うにあたり先行研究¹⁾を参考にしている. シミュレーション中, 消費者エージェントは式(1)に従って, 宣伝やインターネットを含む周囲の消費者から作品に関する情報を蓄積する.

$$I(a, k) = I(a, k - 1) + \{\delta_P(a, k)P(a, k)m_P + \delta_G(a, k)G(a)m_G + \delta_C(a, k)C(a)m_C\} \times E \tag{1}$$

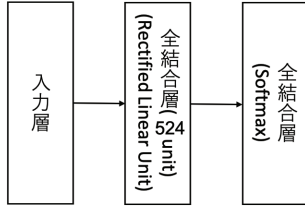


図 2. ニューラルネットワークの構成

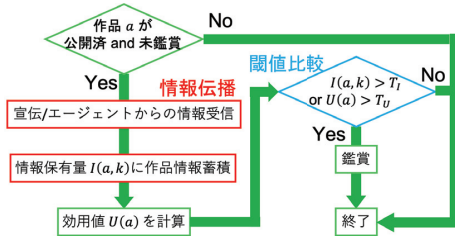


図 3. 鑑賞意思決定フロー

式 (1) において, a は映画作品, k はシミュレーションステップを表しており, P, G, C を伴うものは宣伝やエージェントからの情報受信に関わる量を表す. また, 消費者は作品から式 (2) のような効用値を得る. ここで, $W(g)$ は作品のジャンル g に対する選好度を表す.

$$U(a) = 0.66 \cdot R^2(a) \cdot W(g) \quad (2)$$

情報保有量 I 及び効用値 U をそれぞれ後述の閾値と比較することで作品を鑑賞するかどうか決定する.

機械学習モデルを図 2 に示す. 本研究では, ニューラルネットワークを利用し, 各作品に対する鑑賞確率を出力させる. なお, 購買データの収集は困難であるため学習時にはダミーデータを用いることとする. ネットワークから得られた鑑賞確率 $P_{NN}(a)$ を用いることで情報保有量 I 及び効用値 U と比較される閾値をそれぞれ式 (3), (4) のように定義する. ただし, δ, γ は Rojers の普及モデル²⁾ を参考としており, V は消費者の累計作品鑑賞回数を表している.

$$T_I^{NN} = (1 - P_{NN}) \cdot 35 + 30 \quad (3)$$

$$T_U^{NN} = \{(1 - P_{NN}) \cdot \delta + \gamma\} \cdot \frac{1}{0.99^V} \quad (4)$$

3. シミュレーションと評価

シミュレーションでは図 3 に示すように, 前述の情報保有量及び効用値を更新しながら閾値との比較を行い鑑賞意思決定を行う. これを各消費者エージェントについて毎ステップ行うことでシミュレーションが完了する.

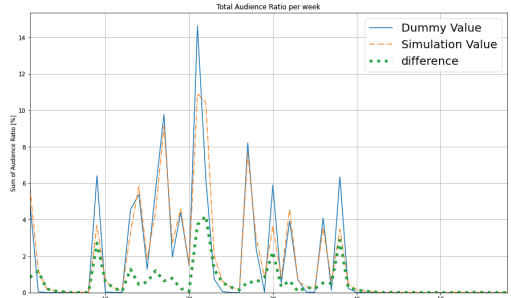


図 4. 各週の動員数比合計の遷移

シミュレーション結果について, 式 (5) で表される各作品の動員数比を週毎に合計したものの遷移をダミーデータと比較する (図 4).

$$\text{動員数比} = \frac{\text{作品の週毎に集計した動員数}}{\text{全作品の全期間の動員数合計}} \quad (5)$$

図 4 を見ると, 購買行動の全体的な傾向を掴めていることがわかる. 一方で, 誤差が目立っており特に動員数比のピーク付近で顕著になっていることがわかる. ダミーデータでは MAS のような情報量の蓄積が考慮されておらず, 鑑賞行動を取る消費者の大部分が上映直後に作品を鑑賞する傾向にあることが原因であると考えられる.

4. まとめ

本研究では, 映画市場における購買行動の MAS モデルを構築し, シミュレーションを通じて購買行動予測に関して評価を行った. また, MAS モデル構築に際して機械学習を利用することでより効率的な MAS モデル構築を目指した. 購買行動予測の観点からは, 全体的な傾向を掴めた一方で誤差も目立つ結果となった. 機械学習利用の観点からは, MAS モデル構築への応用には成功したが, SHAP などの説明可能 AI³⁾ によって機械学習モデルを高品質化させることでより効率的な機械学習応用を期待することができる.

文献

- 1) 上村亮介, 増田浩通, 新井健. "消費者購買行動のマルチエージェントモデル 映画市場を事例として", 日本経営工学会論文誌, vol.57, No.5, pp.451-469, 2006.
- 2) 大澤豊. "マーケティングと消費者行動", 有斐閣, 2002.
- 3) 恵木正史, "XAI (eXplainable AI) 技術の研究動向", 日本セキュリティ・マネジメント学会誌, vol.34, No.1 pp.20-27. 2020.

修士学位論文要約（令和5年3月）

深層学習を用いた画像対応付けと3次元復元への応用に関する研究

星 秀平

指導教員：青木 孝文

Image Correspondence Using Deep Learning and Its Application to 3D Reconstruction

Shuhei HOSHI

Supervisor: Takafumi AOKI

In this paper, we propose a robust and accurate image correspondence method by combining SuperPoint + SuperGlue (SP+SG) and Hierarchical Local feature matching with TRansformers (HLoFTR). The proposed method finds corresponding points on regions with rich texture by SP+SG and those with poor texture by HLoFTR since SP+SG exhibits high localization accuracy of image correspondence and HLoFTR exhibits high robustness against poor texture regions. The proposed method can be used for image correspondence in SfM to not only improve the estimation accuracy of camera parameters in SfM, but also to improve the reconstruction accuracy and expand the reconstruction area in MVS. Through experiments on 3D reconstruction, we demonstrate the effectiveness of the proposed method in SfM.

1. はじめに

画像対応付けは、コンピュータビジョンにおいて必要不可欠な基本処理の1つである。複数枚の画像を高精度に対応付けることができれば、Structure from Motion (SfM) により、各視点のカメラパラメータを推定するとともに、疎な3次元点群を復元することができる。SfMでは、画像対応付け手法として、視点が異なる画像間に対応付けすることができる Scale-Invariant Feature Transform (SIFT)¹⁾ が一般的に用いられている。SIFTには、テクスチャが乏しかったり、明るさが大きく変化していたりすると、特徴点の位置決め精度が低下したり、そもそも特徴点を検出されない問題がある。これらの問題を解決するために、深層学習を用いた手法が提案されている。特徴点検出手法 SuperPoint (SP)²⁾ と特徴点マッチング手法 SuperGlue (SG)³⁾ とを組み合わせることで、SIFTより高精度に画像間に対応付けられる。一方で、SP+SGでは、SIFTと同様にテクスチャが乏しい領域に対応付けられない。Local Feature matching with TRansformers (LoFTR)⁴⁾ はテクスチャの乏しい領域に対応付けできるが、対応点の位置決め精度が低い。本論文では、LoFTRに階層構造を追加した Hierarchical LoFTR (HLoFTR) と SP+SG の対応付け結果を組み合わせることで、画像のテクスチャに依存しない高精度な画像対応付け手法を提案する⁵⁾。

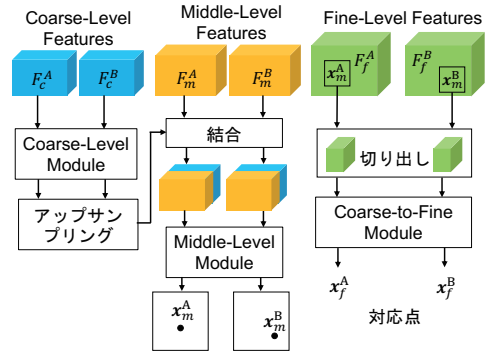


図1 HLoFTRの概要

提案手法を SfM の画像対応付けに使用することで、カメラパラメータの推定精度を改善するとともに、多視点ステレオの3次元復元精度を改善し、その復元範囲を拡大する。公開データセットを用いた精度評価実験を通して、SfMと多視点ステレオにおける提案手法の有効性を示す。

2. 深層学習を用いた画像対応付け

HLoFTRの概要を図1に示す。LoFTRでは、特徴抽出器を用いて解像度の異なる2種類の特徴を抽出するが、HLoFTRでは3種類の特徴を抽出するように変更する。新たに追加した特徴を Middle-

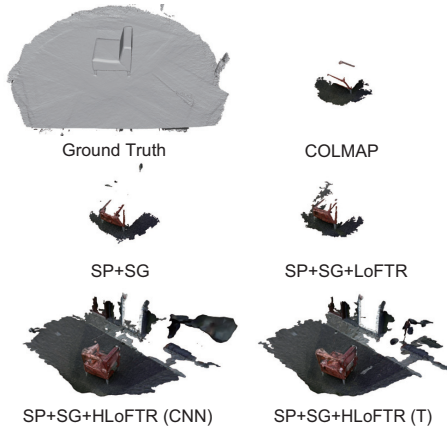


図2 MVSの復元結果

Level Features とし、Middle-Level Features の入力先として新たに Middle-Level Module を追加する。Middle-Level Module には、Coarse-Level Module 内の Transformer で出力された特徴をアップサンリングして Middle-Level Features と結合したものを入力する。これによって画像の大局的特徴と局所の特徴を捉えた対応付けが可能である。さらに、提案手法では、HLoFTR と SP+SG の対応点を組み合わせることで対応点の位置決め精度とテクスチャの乏しい領域に対する対応点の探索性能を向上させる。また、本論文では、提案手法を3次元復元のパイプラインである COLMAP⁶⁾ に組み込む。COLMAP の3次元復元は、SfM によるカメラパラメータ推定と MVS による密な形状復元で構成されるが、SfM の画像対応付けを提案手法で置き換えることで、MVS の復元精度を向上し、復元範囲を拡大させる。

3. 精度評価実験

精度評価実験では、COLMAP の多視点3次元復元の処理フローの内、SfM の画像対応付けを置き換えたときの復元精度を評価する。データセットには、Redwood3dscan¹⁾⁷⁾ の“chair (01193)”を使用する。物体を撮影した動画を一定間隔でサンプリングして得られた画像フレームを入力画像とする。画像サイズは、640×480 画素で、画像枚数は87枚である。HLoFTR については、特徴抽出に LoFTR と同様に改良した ResNet-18⁸⁾ を使用したモデル (HLoFTR (CNN)) と MatchFormer⁹⁾ で提案されている特徴抽出器を使用したモデル (HLoFTR (T)) を比較する。HLoFTR の学習には、ScanNet データセット¹⁰⁾ を

使用した。

復元結果を図2に示す。Ground Truth は、データセットより提供されている物体の3Dモデルであり、提案手法は、SP+SG+HLoFTR (CNN) 及び SP+SG+HLoFTR (T) である。図2を比較すると、提案手法が特に広い範囲を復元できていることがわかる。これは、提案手法では、画像全体から高精度な対応点が得られたことで、高精度なカメラパラメータを SfM で推定できたためと考えられる。以上より、SfM の画像対応付けを変更しただけで、MVS の復元結果を高精度化し、復元範囲を拡大できることが確認できた。

4. まとめ

本論文では、画像のテクスチャに依存しない高精度な画像対応付け手法を提案した。精度評価実験を通して、提案手法の有効性と提案手法を3次元復元に応用することの有効性を示した。今後の展望として、リアルタイムでの対応付けに向けた高速化手法の検討が挙げられる。

文献

- 1) D.G. Lowe, “Distinctive image features from scale-invariant keypoints,” *Int’l J. Computer Vision*, vol.60, no.2, pp.91–110, Nov. 2004.
- 2) D. DeTone et al., “SuperPoint: Self-supervised interest point detection and description,” *Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pp.224–236, June 2018.
- 3) P.-E. Sarlin et al., “SuperGlue: Learning feature matching with graph neural networks,” *Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.4938–4947, June 2020.
- 4) J. Sun et al., “LoFTR: Detector-free local feature matching with transformers,” *Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.8922–8931, June 2021.
- 5) 星秀平ほか, “機械学習を用いた画像対応付けと Structure from Motion の高精度化,” 電子情報通信学会技術報告, vol.122, no.181, pp.19–24, Sept. 2022.
- 6) J.L. Schönberger et al., “Structure-from-motion revisited,” *Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.4104–4113, June 2016.
- 7) S. Choi et al., “A large dataset of object scans,” *CoRR*, vol.abs/1602.02481, pp.1–7, 2016.
- 8) K. He et al., “Deep residual learning for image recognition,” *Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.770–778, June 2016.
- 9) Q. Wang et al., “MatchFormer: Interleaving attention in transformers for feature matching,” *CoRR*, vol.abs/2203.09645, pp.1–12, 2022.
- 10) A. Dai et al., “ScanNet: Richly-annotated 3D reconstructions of indoor scenes,” *Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.5828–5839, June 2017.

¹⁾<http://redwood-data.org/3dscan/>

修士学位論文要約（令和5年3月）

画像認識に基づくプランクトンモニタリングに関する研究

吉田 凌太郎

指導教員：青木 孝文

Plankton Monitoring Based on Image Recognition

Ryotaro Yoshida

Supervisor: Takafumi AOKI

Aquatic ecosystem plays an essential role in providing food and water for organisms. Plankton monitoring (PM), a survey of species composition and abundance of plankton, is important for observing and preserving the aquatic ecosystem. Since manual classification and counting of plankton species requires expertise, time, and effort, automatic PM based on image recognition has attracted much attention. However, the methods proposed so far have not achieved sufficient performance. This paper proposes an efficient method of plankton image recognition using CNN (Convolutional Neural Network) based on hierarchical classification of plankton species. The effectiveness of the proposed method is demonstrated through experimental evaluation using a newly developed plankton image dataset with hierarchical species labels.

1. はじめに

水圏生態系は、食料や水の供給など、生物にとって重要な役割を果たしている。水圏生態系の変動観測と保全のために、食物連鎖の最下層に位置するプランクトンの種類と個体数を計測するプランクトンモニタリングが行われている¹⁾。一般に、専門家が光学顕微鏡を用いて種類判別と個体計数を行っているため、専門知識と時間が必要となる。そのため、画像認識および機械学習を用いてプランクトンモニタリングを自動化することが検討されている。

機械学習モデルの学習および評価のためにプランクトン画像データセット²⁾が公開されているが、多くの場合、画像の品質が低く、各画像に1種類のラベルしか付与されていない場合がほとんどである。また、プランクトン群集画像からプランクトンを正確に検出する手法はこれまでに十分に検討されていない。プランクトン画像を分類するために、畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network: CNN) を用いた手法²⁾も提案されているが、外見が類似するプランクトンの識別において必ずしも十分な性能を発揮できていない。

以上の問題を解決するために、本論文では、プランクトンの生物学的な分類階級を考慮したプランクトン画像の分類手法を提案する。プランクトンは、分類学において定められている生物グループの階層的な位置である分類階級に基づいて階層的に命名されてい

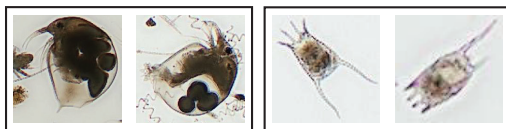


図1 データセットに含まれるプランクトン画像の例

る。プランクトンの見た目に基づいて命名されている場合が多いため、分類階級を考慮することで分類精度が向上すると考えられる。そこで、本研究では、プランクトンの分類階級を考慮したCNNモデルを考案するとともに、新たに5つの分類階級ラベルが付与されたプランクトン画像データセットを共同研究者（東北大学大学院生命科学研究所の占部城太郎教授らの研究グループ）とともに構築し学習データとして活用することで、高精度なプランクトン画像の分類を実現した。

提案手法では、物体検出で広く用いられているFaster R-CNN³⁾を用いてプランクトン群集画像からプランクトンを検出し、階層的なアテンション機構を持つMulti-Level Attention Branch Network (MLABN)⁴⁾により分類階級に基づくラベルを用いてプランクトン画像を分類する。構築したデータセットを用いた性能評価実験を通して、プランクトンモニタリングにおける提案手法の有効性を実証した。

2. プラクトン画像データセット

本データセットは、プラクトン群集画像 297 枚およびプラクトン画像 35,820 枚で構成されており、76 種のプラクトンを含む。国内の 30 の湖沼およびダム湖で採取されたサンプルを、光学顕微鏡を用いて撮影して、プラクトン群集画像を取得している。プラクトン群集画像に写る各プラクトンに対して、検出枠および綱、目、科、属、種の 5 つの階級のラベルを付与している。図 1 に本データセットに含まれるプラクトン画像の例を示す。枠内のプラクトンの属におけるラベルは共通しており、見た目が類似していることが分かる。

3. 画像認識に基づくプラクトンモニタリング手法

提案手法では、プラクトン群集画像からプラクトンを検出するために Faster R-CNN³⁾ を用いる。検出したプラクトンを分類するために、分類に有効な領域に注目させる仕組みであるアテンション機構を持つ Attention Branch Network (ABN)⁵⁾ を基本として、これを階層化した Multi-Level ABN (MLABN) を提案する。図 2 に MLABN のネットワークアーキテクチャを示す。MLABN では、分類階級の数に応じて分岐されたネットワークにより、上位階級から順にプラクトン画像进行分类する。各階級のネットワークの入力特徴マップとアテンションマップを掛け合わせ、それを下の階級のネットワークに入力するという処理を繰り返し、最終的に種のラベルを推定する。上位階級に応じてプラクトンの特定の部位に注目させて分類することで、分類精度を向上させる。

4. 構築したデータセットを用いた性能評価実験

まず、検出について、1 段階構成の FCOS⁶⁾ と 2 段階構成の Faster R-CNN のプラクトンの検出精度（検出率）を比較する。表 1 に各手法の検出精度を示す。2 段階検出器である Faster R-CNN を用いることで、プラクトンを網羅的に検出できることがわかる。

次に、分類について、既存手法である ABN⁵⁾ と目、科、属、種の 4 つの階級のラベルを推定する MLABN (提案手法) のプラクトン画像分類精度を比較する。分類精度の評価指標としては推定結果の正解率を示す Accuracy を用いる。表 2 に示すように、提案する MLABN を用いることで、Accuracy が向上した。階層的なアテンション機構を持つ MLABN を用いることで、適切なプラクトンの部位に注目して分類できたと考えられる。

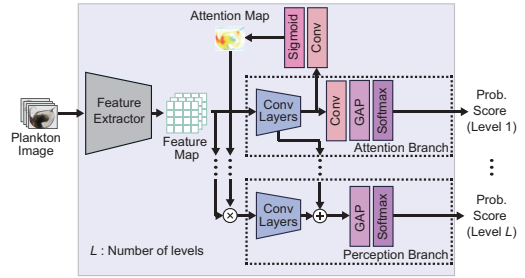


図 2 MLABN のネットワークアーキテクチャ

表 1 各手法の検出精度

Method	検出率 [%]
FCOS ⁶⁾	80.1
Faster R-CNN ³⁾	93.2

表 2 各手法の分類精度

Method	Accuracy [%]
ABN ⁵⁾	90.5
MLABN (4 levels)	91.8

5. まとめ

本論文では、分類階級に基づく 5 つのラベルが付与されたプラクトン画像データセットを構築し、画像認識に基づくプラクトンモニタリング手法を提案した。構築したデータセットを用いた性能評価実験を通して、提案手法の有効性を実証した。今後の展望として、植物プラクトンへの応用等が挙げられる。

文献

- I. Suthers et al., Plankton: A guide to their ecology and monitoring for water quality, CSIRO publishing, 2019.
- S.P. Kyathanahally et al., “Deep learning classification of lake zooplankton,” Frontiers in Microbiology, vol.12, pp.3226–3238, Nov. 2021.
- S. Ren et al., “Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks,” Proc. Advances in Neural Information Processing Systems, vol.28, pp.91–99, 2015.
- 吉田凌太郎他, “プラクトン画像のための Attention Branch Network に基づく階層的分類手法の検討,” 第 25 回画像の認識・理解シンポジウム, pp.1–4, July 2022.
- H. Fukui et al., “Attention branch network: Learning of an attention mechanism for visual explanation,” Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.10705–10714, June 2019.
- Z. Tian et al., “FCOS: Fully convolutional one-stage object detection,” Proc. IEEE/CVF Int'l Conf. Computer Vision, pp.9627–9636, Oct. 2019.

修士学位論文要約（令和5年3月）

顔認証におけるなりすまし攻撃検知の高精度化に関する研究

渡邊 浩太

指導教員：青木 孝文

Accuracy Improvement of Spoofing Attack Detection for Face Recognition

Kota WATANABE

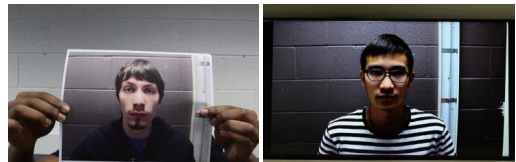
Supervisor: Takafumi AOKI

Spoofing attacks are a serious threat to face recognition systems by malicious third parties since face images can be easily collected from the Internet. In this paper, we propose a spoofing attack detection method using Vision Transformer (ViT), which extracts features based on patches for extracting fine features from a face image. We also propose a patch-wise data augmentation method and an attention-weighted patch loss to improve the accuracy of spoofing attack detection. Through a set of experiments using public datasets, we demonstrate the effectiveness of the proposed method compared with conventional methods.

1. はじめに

顔の特徴に基づいて個人を特定する顔認証は、利便性と受容性の高さから広く利用されている¹⁾。一方で、悪意のある人物が複製した顔画像を用いて不正に認証を通過するなりすまし攻撃のリスクがある²⁾。なりすまし攻撃の例として、図1に示すように、登録者の顔画像が印刷された紙を提示する Print-Attack や、登録者の顔を含む動画を再生した表示デバイスを提示する Display-Attack などがある。なりすまし攻撃による不正認証を防ぐためには、顔認証の前になりすまし攻撃の検知を行う必要がある。なりすまし攻撃で提示される顔画像には、紙の反射や表示デバイスのモアレなど、提示される媒体に起因するノイズが含まれるため、適切な画像特徴量を抽出することで検知することができる。これまでに深層学習に基づくなりすまし攻撃検知手法³⁾⁴⁾が提案されているが、数十フレームの入力を必要としたり、顔の姿勢や未知のなりすまし攻撃に対してロバスト性が低かったりする問題がある。

本論文では、顔の姿勢や未知のなりすまし攻撃に対してロバストな、単一フレームを用いたなりすまし攻撃検知手法を提案する⁵⁾。Vision Transformer (ViT)⁶⁾を用いてパッチベースで特徴を抽出することで、なりすまし画像に含まれる微細なノイズを捉えるとともに、顔の姿勢にロバストな特徴抽出を行う。また、パッチ単位のデータ拡張と、パッチごとになりすまし攻撃を検知するための損失関数を導入し、検知精度を向上させる。大規模データセットを用いた性能評価



Print-Attack

Display-Attack

図1 顔認証システムに対するなりすまし攻撃の例
実験を通して提案手法の有効性を示す。

2. 深層学習を用いたなりすまし攻撃検知

図2に示すように、提案手法では ViT⁶⁾を用いて画像の特徴抽出を行う。また、学習時になりすまし攻撃の検知を難化させるデータ拡張を行うことで、未知のなりすまし攻撃に対するロバスト性を向上させる。さらに、各パッチの特徴をより重視するために、各パッチからクラスを推定するための損失関数を導入する。以下では、データ拡張と損失関数について述べる。

(i) パッチ単位データ拡張

学習時になりすまし画像のパッチを一定確率で本物画像のパッチに置き換えるデータ拡張 Live Patch Mask (LPM)を導入する。なりすまし画像に本物画像のパッチを含ませた、検知が難しいなりすまし画像を用いて学習することで、ノイズの少ないなりすまし画像や未知のなりすまし攻撃の画像の検知精度を向上させる。

(ii) 損失関数

なりすまし攻撃の検知で重要となるノイズなどのテクスチャ特徴は、各パッチからも得られると考えら

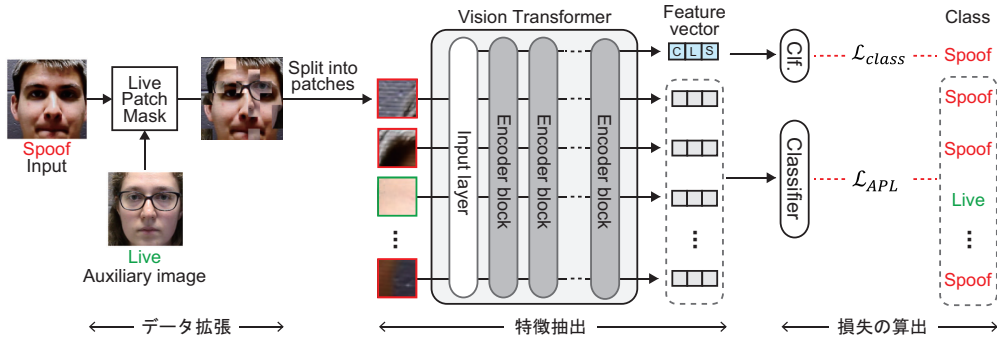


図2 提案するなりすまし攻撃検知手法の学習フロー

れる。提案手法では、画像全体の特徴からクラスを推定するための損失関数 \mathcal{L}_{class} に加えて、各パッチの特徴からそれぞれクラスを推定するための損失関数 \mathcal{L}_{APL} を導入する。 \mathcal{L}_{APL} では、各パッチの損失に対して画像のクラス分類への寄与度に基づいた重みづけを行い、検知精度の更なる向上を図る。

3. 大規模データセットを用いた性能評価実験

SiW³⁾ データセットを用いて提案手法の性能を評価する。SiW は、165 人の被験者に関する本物、Print-Attack、Display-Attack の動画像 4,578 本で構成される。各動画からランダムに選択されたフレームから顔領域を抽出して使用する。SiW には 3 種類の評価プロトコルが設定されている。プロトコル 1 では顔の向きや表情の変化に対する汎化性能、プロトコル 2 では Display-Attack に用いられる表示デバイスの種類に対する汎化性能、プロトコル 3 では未知のなりすまし攻撃に対する汎化性能をそれぞれ評価する。評価指標は、本物画像の誤拒否率となりすまし攻撃の種類で最大の誤受入率の平均値である Average Classification Error Rate (ACER) を用いる。

性能評価実験の結果を表 1 に示す。提案手法は、 \mathcal{L}_{APL} と LPM を適用することで、全てのプロトコルにおいて精度が向上した。特に、プロトコル 3 の ACER が大きく抑制された。従来手法と比較すると、プロトコル 1 および 2 で提案手法はいずれの従来手法よりも高い精度を示しており、顔の姿勢や表情の変化、および表示デバイスの種類に対する汎化性能が高い。プロトコル 3 においては従来手法と同等の精度を示した。

4. まとめ

本論文では、ViT を用いたパッチベースのなりすまし攻撃検知手法を提案し、大規模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した。今後の展望として、RGB カメラを搭載するモバ

表 1 SiW を用いた精度比較実験

Prot.	Method	ACER (%) ↓
1	FAS-BAS ³⁾	3.58
	CDCN ⁴⁾	0.12
	Proposed	0.17
	Proposed w/ \mathcal{L}_{APL} , LPM	0.10
2	FAS-BAS ³⁾	0.57±0.69
	CDCN ⁴⁾	0.06±0.04
	Proposed	0.03±0.04
	Proposed w/ \mathcal{L}_{APL} , LPM	0.01±0.01
3	FAS-BAS ³⁾	8.31±3.81
	CDCN ⁴⁾	1.71±0.11
	Proposed	6.82±6.44
	Proposed w/ \mathcal{L}_{APL} , LPM	3.07±2.75

イル端末への応用に向けたモデルの軽量化の検討が挙げられる。

文献

- 1) S.Z. Li and A.K. Jain, Handbook of Face Recognition, Springer, 2011.
- 2) S. Marcel et al., Handbook of Biometric Anti-Spoofing, Springer, 2019.
- 3) Y. Liu et al., “Learning deep models for face anti-spoofing: Binary or auxiliary supervision,” Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.389–398, June 2018.
- 4) Z. Yu et al., “Searching central difference convolutional networks for face anti-spoofing,” Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.5295–5305, June 2020.
- 5) K. Watanabe et al., “Spoofing attack detection in face recognition system using vision transformer with patch-wise data augmentation,” Proc. 2022 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conf., pp.1558–1562, Nov. 2022.
- 6) A. Dosovitskiy et al., “An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale,” Proc. Int’l Conf. Learning Representations, pp.1–21, May 2021.

修士学位論文要約（令和5年3月）

記憶を制限した神経衰弱における戦略の解析

浦田 智稀

指導教員：篠原 歩

Strategy of the memory game when players' memory is limited

Tomoki URATA

Supervisor: Ayumi SHINOHARA

The literature has studied the optimal strategy of the memory game where the same character is printed on two cards and players remember all the turned cards. This paper studies the game where four cards may have the same character, like usual playing cards. We show the optimal strategy in a special case of this game. Moreover, we analyze the optimal strategy of the game with a limited number of cards which is played by a single player whose memory is limited. We also study the game played by two players whose memory is limited.

1. はじめに

神経衰弱はトランプ等を用いて行われるゲームである。プレイヤーは裏向きのカードの中から、文字が一致する2枚のカードをめくって獲得することを目指す。プレイヤーは一度めくられたカードに書かれた文字を記憶することで、ゲームを有利に進めることができる。カードの初期配置はランダムであるため、書かれた文字を記憶していないカードをめくるとき、その結果どの文字が書かれたカードがめくられるかは確率的に求めることができる。

ZwickとPaterson¹⁾は文字が一致するカードが2枚だけ存在し、プレイヤーが一度めくられたカードに書いてある文字を全て記憶する2人神経衰弱を取り扱った。プレイヤーは記憶しているカード（既知カード）と記憶していないカード（未知カード）のどちらかをめくることができる。図1の例では、2枚目にめくるカードとして、Bのカードすなわち既知カードを選ぶと良いことが示された。場に文字が一致する2枚の既知カードがある場合はプレイヤーは当然それらをめくって獲得する。場に文字が一致する2枚の既知カードがない場合について、プレイヤーの行動は次の3つに分けられた。

- 0-move：書かれている文字が一致しない既知カードを2枚めくる。
- 1-move：1枚目に未知カードをめくった後、1枚目と文字が一致する既知カードが存在すればそれをめくり、存在しなければ1枚目と文字が一致しない既知カードをめくる。
- 2-move：1枚目に未知カードをめくった後、1

枚目と文字が一致する既知カードが存在すればそれをめくり、存在しなければ未知カードをめくる。

場にあるカードの種類数と既知カードの枚数に応じて、0-move、1-move、2-moveのどれが最適となるかが変化し、その法則性についての分析がなされた。

本研究では、新たな3つの設定の神経衰弱について取り扱う。

2. 記憶が無制限の2人神経衰弱

本節では、プレイヤーが2人であり、文字が一致するカードは最大4枚存在し、プレイヤーは全てのカードを記憶できるという設定の神経衰弱を取り扱う。プレイヤーが未知カードと既知カードどちらをめくればより多くのカードを獲得できるかについて分析を行なった。

場に文字Xのカードが x 枚あるとき、その文字をタイプ x と呼び、タイプ x の文字が書いてあるカードもまたタイプ x と呼ぶこととする。本設定ではタイプ2とタイプ4のカードが存在し得る。タイプ4のカードが1セットだけ存在し、そのうち1枚が既知カードであるような場を考える。この時、場にあるカードの種類数 n_a と既知カードの枚数 k_a に応じて、0-move、1-move、2-moveのどれが最適となるかが変化する。漸化式を導出し、実際に計算した結果を表1に示す。表1を見ると $k_a = n_a - 1$ の時には2-moveが最適であることが読み取れる。本論文では、 $k_a = n_a - 1$ のときに2-moveが最適となることの証明を行なった。



図 1. 既知カードをめくった方が良い場面. 黒は表向き, グレーは裏向きになっているカードを表す. ? は一度めくられていないカードを表す.

表 1. 記憶が無制限の 2 人神経衰弱の最適なめくり方

$n_a \setminus k_a$	1	2	3	4	5	6	7	8
2	2	1,2						
3	1	2	1,2					
4	1	1	2	1,2				
5	1	1	1	2	1,2			
6	1	1	1	1	2	1,2		
7	2	1	1	1	1	2	1,2	
8	1	2	1	1	1	1	2	1,2

3. カードを 1 枚だけ記憶できる 1 人神経衰弱

本節では, プレイヤが 1 人であり, 文字が一致するカードは最大 4 枚存在し, プレイヤは 1 枚だけカードを記憶できるという設定の神経衰弱を取り扱う. プレイヤがタイプ 2 とタイプ 4 どちらのカードを優先して記憶すれば, 少ないターンで場のカードを全て獲得することができるかについて分析を行なった.

場にある全てのカードの種類数 n_a とタイプ 4 のカードの種類数 n_f に応じて, タイプ 2 とタイプ 4 どちらを覚えた方が良いかが変わる. 漸化式を導出し, 実際に計算した結果を表 2 に示す. 表 2 を見ると, タイプ 2 のカードを覚えた方が良い場面は限られており, 特に $n_a > 6$ についてはタイプ 4 のカードを覚えた方が良いことがわかる. 本論文では, カードが多い場合にはタイプ 4 を覚えた方が良くなる理由について考察を行なった.

4. カードを k_{\max} 枚だけ記憶できる 2 人神経衰弱

本設定では, プレイヤが 2 人であり, 文字が一致するカードは 2 枚だけ存在し, プレイヤは k_{\max} 枚だけカードを記憶できるという設定の神経衰弱を取り扱う. 簡単のため, 2 人のプレイヤ 2 人のプレイヤが記憶するカードを同じにするため, 両者が記憶するカードに印をつけるという特殊なルールを追加する. プレイヤが未知カードと既知カードどちらをめくればより多くのカードを獲得できるかについて分析を行なった.

場にあるカードの種類数 n_a と既知カードの枚数 k_a に応じて, 0-move, 1-move, 2-move のどれが最適となるかが変化する. 漸化式を導出し, 実際に計算した結果を表 3 に示す. 表 3 を見ると, $k_{\max} = 1$ のときは常に 2-move が最適であることがわかる. $k_{\max} = 2$

表 2. カードを 1 枚だけ記憶できる 1 人神経衰弱の最適な記憶の仕方. (4) は場にタイプ 4 のカードのみが存在する場合を示す.

$n_a \setminus n_f$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	(4)								
2	2	(4)							
3	2	2	(4)						
4	2	2	4	(4)					
5	2	4	4	4	(4)				
6	2	4	4	4	4	(4)			
7	4	4	4	4	4	4	(4)		
8	4	4	4	4	4	4	4	(4)	
9	4	4	4	4	4	4	4	4	(4)

表 3. カードを k_{\max} 枚だけ記憶できる 2 人神経衰弱の最適なめくり方

$n_a \setminus k_a$	$k_{\max} = 1$	$k_{\max} = 2$		
	1	$n_a \setminus k_a$	1	2
1	1&2	1	1&2	
2	2	2	2	1&2
3	2	3	2	1
4	2	4	2	1
5	2	5	2	1
6	2	6	2	1
7	2	7	2	1
8	2	8	2	1
9	2	9	2	1
10	2	10	2	1

のときは, $k_a = 1$ であれば 2-move, $k_a = 2$ であれば 1-move が最適であることがわかる. 本論文では, これらのことについて証明を行なった.

5. まとめ

本研究では, 同じ文字のカードが 4 枚ある場合や記憶を制限した場合の戦略について分析を行なった. 今後の課題は, カードのめくり方と記憶の仕方についてそれぞれ選択肢がある場合や, 自分と相手の記憶しているカードが異なるような場合といった, 複雑な設定の戦略について解析することである.

文献

1) Uri Zwick and Michael S. Paterson. The memory game. *Theoretical computer science*, Vol. 110, No. 1, pp. 169–196, 1993.

修士学位論文要約（令和5年3月）

ドメインに特化したテキスト圧縮器の生成に関する研究

江上 尚志

指導教員：篠原 歩

Research on generating domain-specific text compressors

Takashi EGAMI

Supervisor: Ayumi SHINOHARA

We propose a compression framework utilizing prior knowledge in grammar-based compression and a corresponding compression algorithm. The proposed framework is divided into three stages: learning, primary compression, and secondary compression. During the learning phase, a domain dictionary is generated from training data, used to perform primary compression on the input string, and followed by secondary compression. We implemented a program following this framework and conducted experiments. As a result, under the condition of compressing small files, we confirmed that our method operates faster and achieves higher compression rates than existing methods.

1. はじめに

文法圧縮は古くから研究されており、文脈自由文法を用いて圧縮対象のデータを構造的に表現することで圧縮する。この代表的アルゴリズムとしてRE-PAIR²⁾が知られている。大きなファイルの圧縮ではファイルをブロックごとに分割し独立して圧縮することが一般的だが、関根らはこのブロック間で共有の辞書を作る手法を提案している。これにより、ファイル内で共通する知識を利用することで圧縮率をわずかに向上させた。

一方で、事前知識を保持する圧縮手法も存在する、ZSTANDARD (ZSTD)¹⁾は速度と圧縮率のバランスに優れた圧縮アルゴリズムとして知られ、事前辞書付き圧縮が実装されている。

本研究では、圧縮する文字列のドメインに関する事前知識を利用する圧縮を扱う。具体的な方法として、ZSTDが事前知識をプリセット辞書として圧縮を行うことに対して、提案手法では、文法圧縮を用いて圧縮を二段階に分けることで事前知識を利用し圧縮する。

2. 提案手法

本研究では、文法圧縮における事前知識を活用した圧縮の枠組みと、それに基づいた圧縮アルゴリズムを提案する。

提案手法の枠組みは**学習**、**一次圧縮**、**二次圧縮**の3つの段階に分けられる。学習では、圧縮対象のドメインに含まれる文字列を用いて事前知識を抽出し、

ドメイン辞書とする。この学習に用いる文字列を学習データと呼ぶ。一次圧縮では、学習によって得られたドメイン辞書を用いて、圧縮対象の文字列 T からより短い文字列 T' を生成する。二次圧縮では、一次圧縮済み文字列 T' から最終的な圧縮ファイル、すなわち符号化された圧縮済み系列を生成する。

提案手法の圧縮アルゴリズムをそれぞれの段階に分けて構成する。

学習には、RE-PAIRアルゴリズムを用いる。具体的には、学習データ X に対してRE-PAIRアルゴリズムを適用し、文法と開始系列を得る。この文法をドメイン辞書として保存する。一次圧縮では、ドメイン辞書に含まれる規則を圧縮対象の文字列 T に適用し、該当する部分文字列を新しい記号へ置換することで圧縮を行う。これを高速に行うために、規則の適用をRE-PAIRは1つずつ行うことに対し、提案手法ではすべての規則を同時に適用する。具体的には、replace machine (RM)¹⁾を用いて。一次圧縮をRMの構築とRMによる文字列の置換処理の2つに分ける。RMの構築では、まず文法をすべて再帰的に展開し、パターンと非終端記号との組の集合を作る。これをパターン集合として、対応するRMを構築する。次に、RM置換の工程では、得られたRMに文字列 T を入力し出力 T' を得る。また、ドメイン辞書はRE-PAIR形式の文法であり、非終端記号の数を変えることでパターン数を変化させることができる。圧縮に用いるパターンの数を辞書サイズと呼ぶ。

二次圧縮として、本研究ではRE-PAIRと固定長

¹⁾<https://facebook.github.io/zstd/>

符号の2種類を用いるが、二次圧縮はドメイン辞書に依存しないため他の汎用圧縮手法を利用することもできる。RE-PAIRを用いた二次圧縮では、 T' のすべての文字を終端文字としてRE-PAIR アルゴリズムを適用し、文法と開始系列を計算しRE-PAIR に適したエントロピー符号化を行う。固定長符号による二次圧縮では、一次圧縮済み文字列 T' を記号ごとにすべて同じ符号長で符号化して順に保存する。

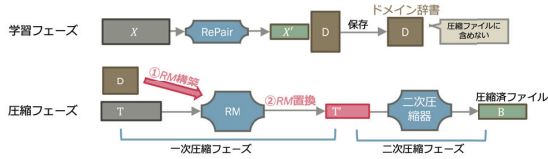


図 1: 提案手法の圧縮における流れ図

3. 実験と結果

本研究では、提案手法を、二次圧縮の手法に合わせた提案手法 1 (固定長符号), 提案手法 2 (RE-PAIR) として 2 つに分け、圧縮における速度と圧縮率の特性を既存手法と比較した。ただし、圧縮率は圧縮前と圧縮後のファイルサイズの比として、既存手法として、事前辞書を利用しない GZIP, RE-PAIR, 及び事前辞書を利用する ZSTD を用いた。また、比較のため、事前辞書を用いる手法は辞書サイズを変えて、辞書を用いない GZIP においては、圧縮レベルのパラメータを変えて複数回圧縮した結果を用いた。ZSTD については、圧縮レベルを 3 と 19 の 2 つを用いて、それぞれ辞書サイズを変えて圧縮した。圧縮するテキストファイルとして、Large Text Compression Benchmark² に使用される enwik9 を用いて、2 つの実験を行った、

まず、全体の実験の準備として、enwik9 を 4 分割し先頭 1 分割を学習データとして、提案手法および ZSTD で学習を行いそれぞれドメイン辞書を生成した。

次に、大きなファイルを圧縮する条件にて実験を行った。具体的には、分割された enwik9 において学習に使われなかった後方 3 つをそれぞれ独立して圧縮しその結果を平均した。その結果を図 2 に示した。グラフより、提案手法 2 は通常の RE-PAIR より 4 倍程度高速に動作し、ZSTD に対してもより高速ないしは高圧縮なことがわかる。

次に、小さなファイルを圧縮する条件で実験を行った。これは通信路やシステム内部などごく小さなファイルを圧縮することを想定した条件である。具体的には、分割された enwik9 において学習に使われなかった部分を記事ごとに分割し、分割された記事ご

とに独立して圧縮した結果を平均した (図 3a)。また、提案手法において RM の構築を省略できる条件を想定し、RM の構築時間を除いた場合の結果を図 3b に示した。結果より、提案手法 1 が ZSTD に対して同じ圧縮率をより高速に達成することがわかる。RM 構築時間を除いた場合はより傾向が強くなり、ZSTD に対して最大 30 倍程度高速に圧縮することがわかる。

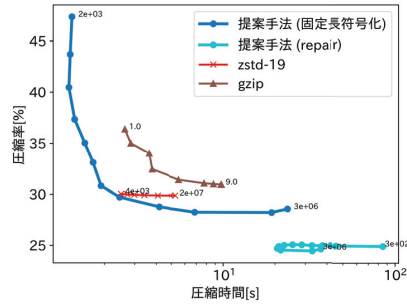
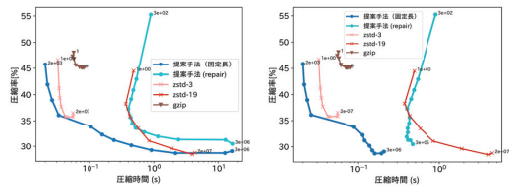


図 2: enwik9 を圧縮したときの速度対圧縮率



a RM 構築時間を含む b RM 構築時間含まない

図 3: enwik9 を記事ごとに圧縮したときの速度対圧縮率

4. まとめ

文法圧縮において事前知識を用いた圧縮の枠組みを提案し、実験にて圧縮速度及び圧縮率を確かめた。その結果、小さなファイルの圧縮において既存手法より高圧縮かつ高速化になることを確認した。

文献

- 1) Setsuo Arikawa and Shuji Shiraishi. Pattern matching machines for replacing several character strings. *Bulletin of informatics and cybernetics*, Vol. 21, No. 1/2, pp. 101–111, March 1984.
- 2) N.J. Larsson and A. Moffat. Off-line dictionary-based compression. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 88, No. 11, pp. 1722–1732, January 2000.

²<https://cs.fit.edu/~mmahoney/compression/text.html>

修士学位論文要約（令和5年3月）

3次元音空間の印象を規定する物理要因に関する基礎的研究

沖田 歩

指導教員：坂本修一

The Effects of Acoustical Physical Parameters on the Perceptual Impression of Three-Dimensional Sound Space

Ayumu OKITA

Supervisor: Shuichi SAKAMOTO

There have been many studies to investigate the relationship between sound spatial impression and physical parameters of auditory informations. However, most of the physical parameters used in the previous studies were calculated from acoustic signals measured by omni-directional microphones. In order to investigate human perception of sound space in more detail, I focused on physical parameters related to the directional pattern of incident sound at the sound-receiving point. In this study, I investigated the correspondence between the directional pattern and sound space impression. The results of the experiments revealed that physical parameters related to the directional pattern of incident sound at specific frequencies strongly affect the impression of spatial sound.

1. はじめに

音空間印象と音響物理量の対応を明らかにする取り組みは古くから行われており、様々な研究がなされている。しかし、従来の調査で用いられてきた音響物理量の多くは無指向性マイクロホンの測定値を基に算出される物理量である。したがって、より詳細に人間の音空間知覚を調査するためには、受音点に対して3次元的に入射する音の到来方向の情報に着目する必要がある。加えて、音の印象の判断は、到来方向などの空間情報のみならず、周波数の情報からも行われることも知られている。

そこで本研究では、音場の收音、再生に有効な手段である高次アンビソニクス (HOA: higher-order ambisonics) を利用し、受音点に対して3次元的に入射する到来音の方向性パターンと空間印象について周波数帯域ごとの検討を行った。

2. 周波数帯域ごとの入射音の方向性パターンが空間印象に及ぼす影響

2.1 実験方法

本章で対象とした音場は無響室と東北大学川内萩ホール（以下、萩ホールと記す）である。まず各音場において、3箇所の音源位置から聴取点に設置した球状マイクロホンアレイの各マイクロホンまでのインパルス応答を求めた。次にそれぞれのインパルス応答にドライソースを畳み込み、5次のHOAエンコードを行い展開係数を求めた。続いて、球面調和関数の各基底関数において、全周波数で得られた展開係数を逆フーリエ変換し、位数及び次数ごとの時間信号をそれぞれ求めた。その後、求めた時間信

号のうち、1次以上の次数をもつ信号に対して表1に該当する周波数を中心とする1オクターブ幅の帯域通過フィルタを適用した。さらに、フィルタ処理を行った時間信号の足し合わせにより、異なる2つの音場の1次以上の次数をもつ時間信号を入れ替えた。そして、入れ替え後の時間信号に対してフーリエ変換を行い、再び各周波数ごとの展開係数を求めた。以上の手続きによって、表1に示す展開係数の組み合わせを得た。最後に、この展開係数に対して、5次のHOAデコードを行い各スピーカの駆動信号を求めた。なお、各音源位置に配置したドライソースには、楽器ごと收音された2種類の三重奏音源¹⁾を使用した。また、音源の提示には電気通信研究所の157ch包囲型スピーカアレイを使用し、聴取者には提示される実験刺激の印象について²⁾を参考に選定した36個の評価語で評価をさせた。

表1. 周波数帯域ごとの方向性パターンの操作

展開係数(0次)	展開係数(1次以上)
無響室 or 萩ホール	Original: 入れ替えなし
	Band-250: 中心周波数 250[Hz] の帯域を入れ替え
	Band-500: 中心周波数 500[Hz] の帯域を入れ替え
	Band-1000: 中心周波数 1000[Hz] の帯域を入れ替え
	Band-2000: 中心周波数 2000[Hz] の帯域を入れ替え
	Band-4000: 中心周波数 4000[Hz] の帯域を入れ替え

2.2 実験結果および考察

評価語の評価値の因子分析から得られた「包囲・臨場性因子」の因子得点(図1)からは、Band-2000, Band-4000などの、高周波数成分を操作した刺激での因子得点の低下が確認できる。高周波数帯域の反射音は初期反射音に多く含まれ、この初期反射音は対象物が発する音による臨場感であるオブジェクト

臨場感に影響を及ぼすと考えられている³⁾。実験操作により、高周波数帯域の萩ホールの反射音を除いたことで、初期反射音に特徴的で直接音の拡がりや寄与していた成分が欠落したため、臨場感や拡がり感、立体感といったオブジェクト臨場感に関する印象の低下を招いたと考察する。

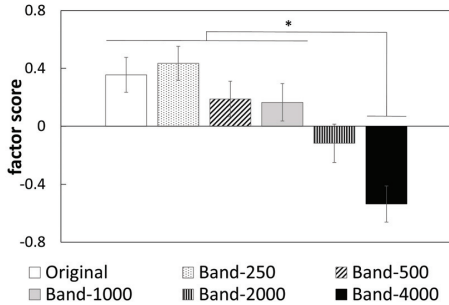


図 1. 包囲・臨場性因子の因子得点 (曲平均+標準誤差)

3. 周波数帯域ごとの入射音の到来方向の分解能が空間印象に及ぼす影響

3.1 実験方法

本章では萩ホールを対象とし、第2章と同様な実験環境、実験装置、帯域通過フィルタを利用することで、表2のように周波数帯域ごとに入射音の到来方向の分解能を操作した刺激を作成した。

表 2. 周波数帯域ごとの空間分解能の操作 (5次条件)

基本再現次数	周波数帯域			
	250 Hz	1000 Hz	4000 Hz	その他帯域
5次条件	250 Hz	1000 Hz	4000 Hz	その他帯域
original	HOA(5次)	HOA(5次)	HOA(5次)	HOA(5次)
mismatch_250	HOA(0次)	HOA(5次)	HOA(5次)	HOA(5次)
mismatch_1000	HOA(5次)	HOA(0次)	HOA(5次)	HOA(5次)
mismatch_4000	HOA(5次)	HOA(5次)	HOA(0次)	HOA(5次)

音源には、第2章で用いた三重奏音源に加え、2種類のオーケストラ音源⁴⁾を使用した。また、第2章と同様な評価語を利用し主観評価実験を行った。

3.2 実験結果および考察

評価語の評価値の因子分析から得られた「包囲性因子」、「明瞭性因子」の因子得点(図2, 3)を示す。図2からは特に1000 Hz帯域の入射音の到来方向の分解能の影響が大きいことがわかる。包囲性因子を構成する評価語には心地よい、安定感がある、などの心理的な安定感や快-不快に関するものが多い。更に、音の快-不快に関連する印象には1000 Hzを中心とした周波数帯域が最も大きな影響を及ぼすと報告されている⁵⁾。以上から、包囲性因子において1000 Hzの周波数帯域の影響が大きかったと考察する。

また、図3からは特に4000 Hz帯域の入射音の到来方向の分解能の影響が大きいことがわかる。この結果は、高周波数の音が主観的な鮮明さに強く影響するという報告⁶⁾に類似している。よって、入射音

の到来方向の分解能に着目した場合においても、明瞭感に関する印象に対しては高周波数成分の音の影響が大きいと考えられる。

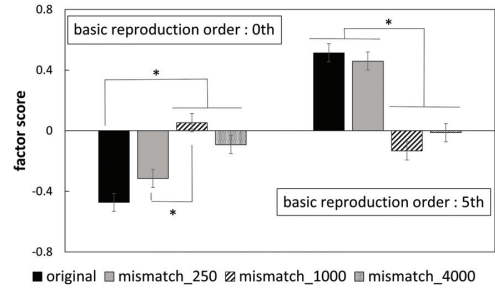


図 2. 包囲性因子の因子得点 (曲平均+標準誤差)

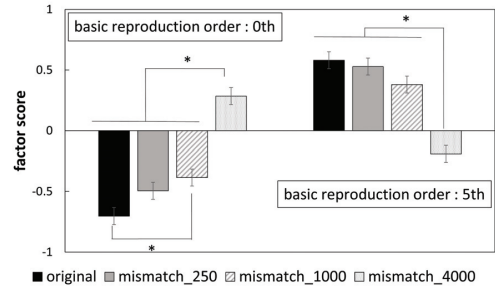


図 3. 明瞭性因子の因子得点 (曲平均+標準誤差)

4. まとめ

音空間印象に作用する物理要因について、受音点に入射する音の方向性パターンに着目し、調査を行った。その結果、音空間印象を規定する様々な評価尺度に対して、入射音の方向性パターンに関する物理量が作用することが明らかとなった。また、入射音の方向性パターンに関する物理量が作用する各評価尺度に対して、特に影響の程度が大きい周波数がそれぞれ存在することが示された。ただし、本研究で扱った4000 Hzの周波数帯域には再生システムによる誤差が含まれるため、この周波数帯域における空間印象については、今後の詳細な検討を要する。

謝辞 本研究は、ヤマハ株式会社のトレビーニョホルヘ氏、今村秀隆氏、塩澤安生氏、阪梨英樹氏から多くのご助言を頂いた。ここに深く感謝申し上げる。

文献

- 1) Thery *et al.*, Proc. ICA2019, pp. 739-746, 2019.
- 2) 岡部 他, 音講論(秋), 2-1-18, 2019.
- 3) 安藤, 音響誌, 78-3, pp. 114-120, 2022.
- 4) Pulkki *et al.*, AAU, 94-6, pp. 856-865, 2008.
- 5) 厨川 他, 音響誌, 34-9, pp. 501-509, 1978.
- 6) Solomon, JASA, 30, pp.421-497, 1958.

修士学位論文要約（令和5年3月）

深層強化学習を用いた人狼ゲームエージェントの構築に関する研究

工藤 海斗

指導教員: 周 暁 学位論文指導教員: 田村 祐馬

A Study on the Construction of Werewolf Game Agents
Using Deep Reinforcement Learning

Kaito KUDO

Supervisor: Xiao ZHOU Research Advisor: Yuma TAMURA

Reinforcement learning is a machine learning technique in which artificial intelligence itself discovers the best behavior under certain conditions through trial and error. In particular, the method that introduces deep learning into the learning model is called deep reinforcement learning. In this thesis, to gain insight into imperfect information games in which players may disclose false information, we construct werewolf game agents using deep reinforcement learning. Then, we examined the effectiveness of time series processing in this game.

1. はじめに

強化学習とは、膨大な量の試行錯誤から統計的に最善となる行動を自ら発見する機械学習の手法である。特に、その学習モデルの中にディープニューラルネットワーク等の深層学習を導入したものを深層強化学習と呼ぶ。

近年では囲碁などの盤上に全ての情報が現れる完全情報ゲームの攻略において深層強化学習を用いた人工知能が目覚ましい成果を上げている⁴⁾。

完全情報ゲームに対して、ポーカーや麻雀などのゲームを不完全情報ゲームと呼ぶ。不完全情報ゲームではゲームの進行に伴って非公開であった情報が少しずつ公開され、それらを用いた推測が可能になっているが、公開される情報が全て正しいという前提が成り立っている場合が多い。

一方で虚偽の情報を公開することのできる不完全情報ゲームも存在し、虚偽がないと仮定する場合よりも複雑な駆け引きが必要となることが予想される。

そこで本研究では、こうした「虚偽の情報開示が可能な不完全情報ゲーム」の知見を探ることを目的として、人狼ゲームと呼ばれるゲームを題材に深層強化学習を用いた人工知能のエージェントを構築した。特に、人狼ゲームにおける状態の変化が時系列データとして扱えるという点に注目し、時系列処理の有無によるエージェントの性能について検討した。

2. 実験方法

人狼ゲームは、いくつかの陣営に属するロール（役職）をプレイヤーに与え、各陣営の勝利条件をめぐってプレイヤー同士を戦わせるゲームである。人狼ゲームを題材とした人工知能を研究する団体として人狼知能プロジェクト⁵⁾がある。本研究では、人狼知能プロジェクトが開催している大会である人狼

知能大会のプラットフォームに基づき、村人2人、占い師1人、狂人1人、人狼1人からなるターン制5人村のレギュレーションで人狼ゲームをプレイするエージェントを構築した。その際、時系列処理モデルを内部に含まない深層強化学習モデルであるDQN³⁾を用いたエージェントと、時系列処理モデルを含む深層強化学習モデルDRQN²⁾を用いたエージェントで学習による勝率の変化を記録した。

学習に用いる入力データの構築に際し、各ターンごとに現れるプレイヤーの発言から、プレイヤー同士の「態度」をベクトルとして表現することでゲームの局面の主要な項目とした。具体的には、各プレイヤーが別プレイヤーに対して擁護的か攻撃的かをそれぞれ6次元のベクトルとして表現しそれらを5人分連結した30次元のベクトルに、役職に関わる発言状況を表現する9次元のベクトルを組み合わせ、計39次元のベクトルで1ターンのゲームの局面を表した。

また、ネットワークの出力には、次のターンの自己エージェントの行動として、他のエージェントへどのような態度を表すのか、どのような役職として振舞うのか、など12個の選択肢を用意した。

学習に際して、1ターン分のゲームの局面を表す39次元のベクトルを直近4ターン分集めて入力するDRQNおよびDQNと、直近1ターン分のみ用いるDQN(*)の、計3つの異なる学習モデルを用意し、各役職50000回対戦後のそれぞれの勝率の変化を求めた。

また、特定の対戦相手によらない知見を得るために各学習モデルに対して異なる3つの対戦相手で学習を行った。

対戦環境1:1人を提案のエージェントとし、残り4人を人狼知能プロジェクトが提供するサンプル

エージェントとし対戦を行う

対戦環境2:1人を提案のエージェント,1人を人狼知能プロジェクトが提供するサンプルエージェント,他の3人を第三回人狼知能国際大会上位エージェントである Haru, OKAMI, Tomato とし対戦を行う
対戦環境3: DQN(*) の4種類5人のエージェント同士, DQN の4種類5人のエージェント同士, および DRQN の4種類5人のエージェント同士で対戦を行う

各対戦環境における DRQN および DQN, DQN(*) で用いた中間層のノード数は表1の通りである. どの対戦環境においても, DRQN では39個, DQN では156個, DQN(*) では39個のノードを入力層に用意し, 出力層にはネットワークの種類に関わらず12個のノードを用意した. また, 中間層1には, DQN と DQN(*) であれば全結合層を, DRQN であれば再帰層として再帰型ニューラルネットワークの一種である LSTM¹⁾ を用い, 他の中間層はネットワークの種類に関わらず全結合層とした. 全結合層および再帰層の出力における活性化関数には ELU 関数を用いた. また, ネットワークに与える報酬については勝利時に +50 を, 敗北時に -50 を与えるものとした.

表1. 実験で用いた中間層のノード数

中間層1	中間層2	中間層3	中間層4
128	64	64	32

3. 実験結果

各対戦環境におけるロール別の勝率は表2, 表3, 表4の通りである.

村人以外のロールについてロール別で実験結果を見ると, それぞれ2/3の対戦環境で DRQN を用いたエージェントが最も勝率が高く, 高度な時系列処理が可能な DRQN が人狼ゲームにおいて有効となる場合が多いと考えられる. 特に, 人狼や占い師といった特殊能力持ちの役職について, 村人や狂人といった特殊能力を持たない役職と比較して大きな所為率向上が見られた.

表2. 対戦環境1で学習した時の勝率(単位:%)

エージェント	村人	占い師	狂人	人狼
学習前	54.7	53.1	36.7	35.6
DRQN	55.1	59.4	38.8	47.1
DQN	55.6	54.2	37.9	42.8
DQN(*)	54.9	54.1	37.6	44.7

表3. 対戦環境2で学習した時の勝率(単位:%)

エージェント	村人	占い師	狂人	人狼
学習前	54.7	53.1	36.7	35.6
DRQN	55.4	61.3	39.3	39.9
DQN	55.6	54.8	37.6	40.8
DQN(*)	55.4	53.3	37.8	41.7

表4. 対戦環境3で学習した時の勝率(単位:%)

エージェント	村人	占い師	狂人	人狼
学習前	54.7	53.1	36.7	35.6
DRQN	55.2	57.3	39.4	46.2
DQN	56.3	56.8	39.3	41.9
DQN(*)	55.0	58.0	38.4	43.2

4. まとめ

本研究では, 「虚偽の情報開示ができる不完全情報ゲーム」の人工知能に対する知見を得ることを目的として, 人狼ゲームをプレイするエージェントを深層強化学習を用いて構築した.

実験の結果, 深層強化学習を人狼ゲームの議論における戦略決定に用いることで一部のロールの勝率を大きく向上させる傾向が見られた. 特に, 再帰型ニューラルネットワークを内部構造に持つ DRQN で最も勝率が良くなるケースが多く, 「虚偽の情報開示ができる不完全情報ゲーム」において局面の変化を時系列データとして捉え戦略決定に用いることが有効となる可能性が高いと考えられる.

今後の課題としては, 対戦回数を重ねるとともに入力や出力を細分化し, より複雑な発話パターンに対応させることが挙げられる.

文献

- 1) F. A. Gers, J. Schmidhuber, and F. A. Cummins. Learning to Forget: Continual Prediction with LSTM. *Neural Comput.*, 12(10):2451–2471, 2000.
- 2) M. J. Hausknecht and P. Stone. Deep Recurrent Q-Learning for Partially Observable MDPs. In *2015 AAAI Fall Symposia*, pages 29–37. AAAI Press, 2015.
- 3) V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver, et al. Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 518(7540):529–533, 2015.
- 4) D. Silver, J. Schrittwieser, K. Simonyan, et al. Mastering the game of Go without human knowledge. *Nature*, 550(7676):354–359, 2017.
- 5) 人狼知能プロジェクト. <http://aiwolf.org>.

修士学位論文要約（令和5年3月）

文字列検索の索引構造からテキストを求める問題に関する研究

熊谷 滉士郎

指導教員：篠原 歩，学位論文指導教員：吉仲 亮

Inferring strings from position heaps in linear time

Koshiro KUMAGAI

Supervisor: Ayumi SHINOHARA, Research Advisor: Ryo YOSHINAKA

Position heaps are index structures of strings used for the string matching problem. They are rooted trees whose edges and nodes are labeled and numbered, respectively. This paper is concerned with variants of the inverse problem of position heap construction and gives linear-time algorithms for those problems. The basic problem is to restore a string from a rooted tree with labeled edges and numbered nodes. In the variant problems, the input trees may miss edge labels or node numbers. Moreover, we show the formulas of the number of output strings and the algorithms for enumerating them.

1. Introduction

The string matching problem searches for a pattern P in a text T . It has been widely studied for many years and many efficient algorithms have been proposed. One of those techniques is preprocessing T to create indexing structures. Moreover, the reverse engineering of indexing structures has also been widely studied.

In this paper, we discuss the reverse engineering of other types of indexing structures, called *position heaps* ^{2) 3)}. The position heap of a string T has two types, and both are rooted trees with labeled edges and numbered nodes. Ehrenfeucht et al. ²⁾ and Kucherov ³⁾ gave definitions of *right-to-left position heaps* and *left-to-right position heaps*, respectively.

2. Preliminaries

Let Σ be a finite alphabet and the size of Σ be constant. Throughout this paper, strings are 1-indexed. For a string w of length n , we let $w[i]$ be the i -th letter of w , and $w[i : j]$ be the substring of w which starts at position i and ends at position j for $1 \leq i \leq j \leq n$. In particular, we denote $w[i : n]$ by $w[i :]$ and $w[1 : j]$ by $w[: j]$.

For an edge-labeled rooted tree $G = (V, E, \Psi)$, the partial mapping $\mathcal{S}_G : V \rightarrow V$ called the *suffix*

links is defined by the following equation.

$$\mathcal{S}_G(u) = \begin{cases} v \text{ s.t. } \Psi^*(r, u)[2:] = \Psi^*(r, v) & \text{if such } v \text{ exists} \\ \text{undefined} & \text{otherwise} \end{cases}$$

where r is the root of G and $\Psi^*(s, t)$ is the path label from node s to node t . The linear-time construction method of \mathcal{S}_G is well known. Suffix links play an important role in the linear-time construction of position heaps.

For string T of length n , a position heap for T is an index structure with which one can efficiently solve the pattern-matching problem. There are two variants of position heaps. Both of them are edge-labeled rooted trees whose nodes are numbers.

Ehrenfeucht et al. defined the right-to-left position heap $\text{PHE}(T) = (V, E, \Psi)$ of T as the sequence hash tree ¹⁾ of $\langle T[n:], T[n-1:], \dots, T[1:] \rangle$. We define $\text{PHES}(T) = (V, E, \Psi, \mathcal{S}_{\text{PHE}(T)})$.

On the other hand, Kucherov defined the left-to-right position heap $\text{PHK}(T) = (V, E, \Psi)$ of T as the sequence hash tree ¹⁾ of $\langle T[1:], T[2:], \dots, T[n:] \rangle$. To guarantee the well-definedness, T must end with a unique letter, i.e., $T[j] \neq T[n]$ for all $j \in \{1, \dots, n-1\}$. We define $\text{PHKS}(T) = (V, E, \Psi, \mathcal{S}_{\text{PHK}(T)})$.

The characteristic difference is that, we scan the text from the ending for creating the right-to-left position heap, but we read the text from the beginning when construct the left-to-right position heap.

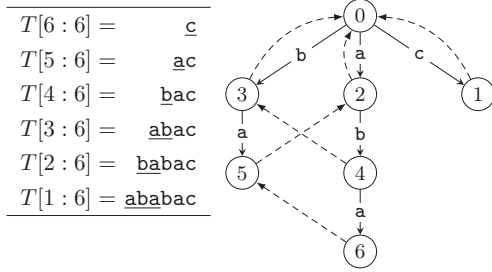


Fig 1. PHEs(ababac). Dashed arcs are suffix links.

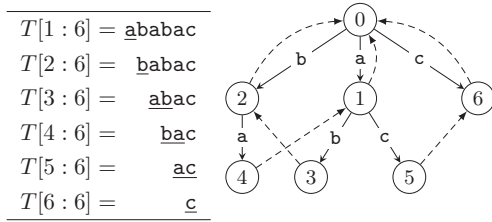


Fig 2. PHKS(ababac). Dashed arcs are suffix links.

From the studies ^{2) 3)}, we can construct both position heaps in linear time. We call T the *source text* of PHE(T) or PHK(T).

3. Proposals

We study the following 8 problems. Since the difference between problem definitions for left-to-right and right-to-left position heaps is minimal, we mark only the different words with angle brackets when we consider left-to-right position heaps.

Problem E1 (K1). Given an edge-labeled rooted tree (V, E, Ψ) with $V = \{0, \dots, n\}$, answer a string T such that $\text{PHE}(T)$ ($\text{PHK}(T)$) = (V, E, Ψ) .

Problem E2 (K2). Given a rooted tree (V, E) with $V = \{0, \dots, n\}$, answer a string T such that $\text{PHE}(T)$ ($\text{PHK}(T)$) = (V, E, Ψ) for some Ψ .

Problem E3 (K3). Given an edge-labeled rooted tree (V, E, Ψ) , answer a string T such that $\text{PHE}(T)$ ($\text{PHK}(T)$) $\equiv (V, E, \Psi)$.

Problem E4 (K4). Given a pair (G, \mathcal{S}) of a rooted tree $G = (V, E)$ and a partial mapping $\mathcal{S}: V \rightarrow V$, answer a string T such that $\text{PHEs}(T)$ ($\text{PHKS}(T)$) $\equiv (V, E, \Psi, \mathcal{S})$ for some Ψ .

There are some solutions to Problems E2, E3, E4, K2, K3, and K4. We show all problems are solvable in linear time.

Particularly, in Problems E3 and K3, we show the summary of solving those problems. By giving

each arc of $\text{PHEs}(T)$ ($\text{PHKS}(T)$) the appropriate multiplicity, we can construct the graph which has an Eulerian circuit p that satisfies the following properties.

1. T equals the string scanned the edge labels along p .
2. Among the arcs from the same node, p contains the suffix link at last (first).

Conversely, from an Eulerian circuit fulfilling the second property, we can obtain a suitable string as a source text by the first property. Since we can compute appropriate multiplicities without referring to node numbers, we reduce problems E3 and K3 to the construction problem of Eulerian circuits where some arcs have priority order. This problem is solvable in linear time by using the idea behind the BEST theorem ⁴⁾.

Moreover, we present formulas for counting the solutions. The number of solutions is at most $n!$, but those formulas are computed in polynomial time. In addition, we show efficient algorithms for enumerating solutions in output linear time.

4. Conclusion

We studied four reverse engineering problems on both right-to-left ²⁾ and left-to-right ³⁾ position heaps. We showed that all problems can be solved in linear time. Other possible variants would take (V, E) as inputs. Moreover, studies on reverse engineering of augmented position heaps, which are modified position heaps, remain as future work.

References

- 1) E. G. Coffman and J. Eve. File structures using hashing functions. *Commun. ACM*, Vol. 13, No. 7, p. 427–432, July 1970.
- 2) Andrzej Ehrenfeucht, Ross M. McConnell, Nissa Osheim, and Sung-Whan Woo. Position heaps: A simple and dynamic text indexing data structure. *Journal of Discrete Algorithms*, Vol. 9, No. 1, pp. 100–121, 2011.
- 3) Gregory Kucherov. On-line construction of position heaps. *Journal of Discrete Algorithms*, Vol. 20, pp. 3 – 11, 2013.
- 4) T. van Aardenne-Ehrenfest and N. G. de Bruijn. Circuits and trees in oriented linear graphs. *Simon Stevin : Wis- en Natuurkundig Tijdschrift*, Vol. 28, pp. 203–217, 1951.

修士学位論文要約（令和5年3月）

聴覚オブジェクト認知を考慮した 音コンテンツ空間化に関する基礎的研究

栗林真幸

指導教員：坂本修一

A Fundamental Study on Sound Content Spatialization Method

Based on Auditory Object Perception

Masaki KURIBAYASHI

Supervisor: Shuichi SAKAMOTO

To add spatial information to the sound content which does not include spatial information, some methods have been proposed. However, it is difficult to place sound objects in positions that are consistent with the listener's knowledge and experience. Since the placement of objects would affect the perception of the objects themselves and also presence of the listening experience, I experimentally investigated the effects of semantic and spatial consistency on auditory object perception in order to realize the sound content spatialization method based on auditory object perception. The experimental results suggest that spatial consistency would affect auditory object perception. On the other hand, the results doesn't suggest any effect on semantic consistency.

1. はじめに

モノラル音源やステレオ音源等の空間情報を持たない音コンテンツから、空間情報を持った音コンテンツへ変換する方法は今まで多く提案されている^{1) 2)}。これらの方法は空間的な印象を与えることができるものの、音源内に存在するオブジェクトが知識や経験から予想される位置に配置された適切な音空間を必ずしも実現はできない。オブジェクトの配置はオブジェクト自体の認知、そして、聴取体験の臨場感にも関わる可能性がある。視覚系ではシーン整合性効果としてオブジェクトと背景情報との関連性、特に意味的整合性、空間的整合性がオブジェクトの認知に影響力を持つことが報告されてる^{3) 4)}。

本研究では、オブジェクト認知の観点を取り入れた音コンテンツ空間化の検討に向けて、意味的整合性、空間的整合性といった聴覚オブジェクトと背景情報との関連性が聴覚オブジェクトの認知過程に及ぼす影響を実験的に調査した。

2. 聴覚オブジェクト認知における空間的整合性の影響

情景を想起させる背景音及び情景を想起させることのない背景音の存在下で、様々な位置から到来する聴覚オブジェクトの検出までの反応時間を調べ、聴覚オブジェクト認知における空間的整合性の影響について検討した。

視覚系におけるシーン整合性効果に基づき、次の

ような仮説を立て実験を行った。

1. 情景を想起させる場合、聴覚オブジェクトの位置が情景と空間的に整合した位置で反応が速まる。
2. 情景を想起させない場合、情景を想起させる場合よりも全体として反応は遅くなるものの、情景によらない聴覚オブジェクトの典型的な位置に関する知識による影響が現れる。

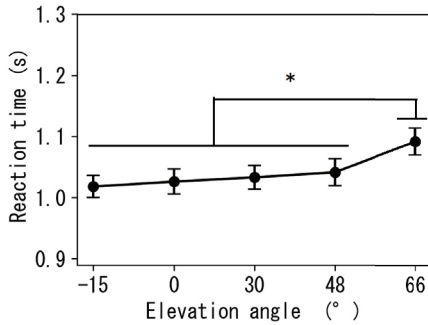
被験者は正常な聴力を有する成人16名（男性11名、女性5名、平均22.9歳、SD = 1.3）であった。実験には東北大学電気通信研究所の157チャンネル包囲型ラウドスピーカを使用した。

実験刺激は、背景音と標的音からなる。背景音は、街頭での収録音（JR仙台駅前ペDESTリアンデッキにて収録）及びホワイトノイズの2種類の音を用いた。標的音は、カラスの鳴き声、クラクション、鍵が落ちた音、くしゃみの4種類の音を用いた。背景音は157個のすべてのラウドスピーカを用いて試行中常時呈示された。街頭での収録音に関しては、Bformat信号を一次のアンビソニックス形式でデコードした157チャンネル信号、ホワイトノイズに関してはチャンネル間で無相関なホワイトノイズによる157チャンネル信号を用いた。いずれの背景音もラウドネスレベルが70 phonになるように調整した。一方、標的音は、157個のラウドスピーカのうち仰角、方位角の間隔がおおよそ均等になるような20個のラウドスピーカのいずれか一つから1.5~2.0秒のランダムな間隔で呈示された。標的音の呈示音圧は、聴取者の頭部

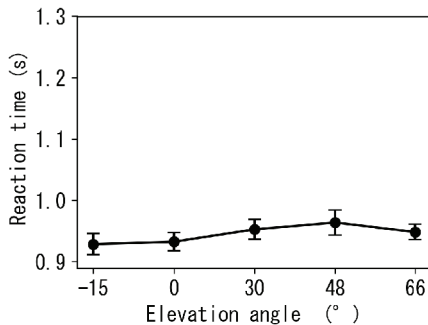
中心で A 特性音圧レベル 60 dB になるように調整した。

背景音が街頭での収録音の場合には、被験者に実験前に収音してきた場所の写真を呈示し、その状況を想起しながら実験を行うよう求めた。被験者には背景音再生下で、4種類の標的音が再生されることを伝え、標的音が聞こえたら、手元にあるゲームパッドで各標的音に対応するボタンを素早く押して反応するように求め、反応時間を測定した。

反応時間について、各標的音ごとに、背景音、方位角と仰角を要因とする3要因 $2 \times 4 \times 5$ 水準の分散分析を行った。標的音がクラクションの場合の結果を図1に示す。背景音が街頭での収録音の場合、標的音がクラクションの場合に位置が情景と空間的に不整合な位置で反応が有意に遅かった。これは空間的整合性の影響を示唆する仮説1に沿った結果である。一方、背景音がホワイトノイズの場合、いずれの標的音についても位置間の反応時間の差はみられず、仮説2に沿わない結果であった。これは、ホワイトノイズが時間的な振幅の変化がない音であったが故に実験難易度が低く、天井効果が働いた可能性がある。



(a) 背景音：街頭での収録音の場合



(b) 背景音：ホワイトノイズの場合

図1. 標的音がクラクションの場合の実験結果（横軸が仰角、縦軸が反応時間）

3. 聴覚オブジェクト認知における意味的整合性と空間的整合性の影響の比較

聴覚オブジェクトに対して意味的に整合する情景に加えて、意味的に整合しない情景の場合について実験を行い、聴覚オブジェクト認知における意味的整合性の影響と空間的整合性の影響の比較を検討した。

視覚系におけるシーン整合性効果に基づき、次のような仮説を立て実験を行った。

1. 情景と聴覚オブジェクトが意味的に整合する場合、聴覚オブジェクトの位置が情景と空間的に整合した位置で反応が速まる。一方空間的に不整合な位置では、意味的整合と空間的不整合の効果が打ち消し合い、相対的に反応が遅くなる。
2. 情景と聴覚オブジェクトが意味的に整合しない場合、視覚系と同様に意味的整合性の影響が空間的整合性の影響より強くなるため、聴覚オブジェクトへの反応において空間的整合性の影響は現れない。

被験者は正常な聴力を有する成人16名（男性13名、女性3名、平均23歳、SD = 1.4）であった。実験環境及び実験手続きは第2章と同様であった。背景音は街頭での収録音を屋外条件に、食堂での収録音を屋内条件に用いた。標的音は、屋外条件に意味的に整合する音として、クラクション、横断歩道の音、屋内条件に意味的に整合する音として、電子レンジ、食器を片付ける音の計4種類の音を用いた。

反応時間について、各標的音ごとに、条件、方位角と仰角を要因とする3要因 $2 \times 4 \times 5$ 水準の分散分析を行った。その結果、いずれの標的音についても条件間の差は見られなかった。これは仮説のいずれにも沿わない結果である。この要因として、今回の実験構成上、整合、不整合が連続して提示されている情景想起が安定しなかった可能性が考えられる。

4. まとめ

聴覚オブジェクト認知における空間的整合性及び意味的整合性の影響について検討した。一部の標的音において、聴覚オブジェクト認知における空間的整合性の影響を示唆する結果が見られた。一方、意味的整合性に関しては今回の結果からは影響は見られず、さらなる検証の必要性が明らかとなった。

文献

- 1) J. Trevino *et al.*, *JIH-MSP*, 6(6), 1100-1116, 2015.
- 2) R. Gao *et al.*, *Proc. IEEE/CVF Conf. on CVPR*, 324-333, 2019.
- 3) 新美ら, 勁草書房, 2016.
- 4) M. L.-H. Vö *et al.*, *J. of vision*, 9(3), 24-24, 2009.

修士学位論文要約（令和5年3月）

グラフの耐故障分割問題に関する研究

佐藤 勇人

指導教員：伊藤 健洋

A Study on Fault-Tolerant Partitioning Problem of Graphs

Hayato SATO

Supervisor: Takehiro ITO

In this research, we introduce and study the fault-tolerant partitioning problem of graphs, which models the situation where we wish to find a power distribution route (i.e., a partition) with fault-tolerance in a given electrical distribution network (i.e., a graph). We analyze the computational complexity of the problem from the viewpoint of graph structures. We first show that the problem remains NP-hard even for graphs having simple structures, e.g., serial-parallel bipartite graphs of diameter 4. Then, we give several efficient algorithms to solve the problem for restricted classes of graphs.

1. はじめに

実社会の様々な課題は、グラフに関する組合せ最適化問題として数理モデル化されてきた。例えば、配電網における電力の送り方を求める課題は、グラフの分割問題²⁾³⁾として定式化されている。グラフの分割問題は理論的な解析だけでなく、応用的な解析も行われている⁴⁾。この技術は、例えば停電最小化や配電ロス最小化にも応用が期待される。

本研究ではグラフの分割問題に対し、耐故障性という概念を導入する。第2節にて詳しい定義を与えるが、どの供給点の一つ故障したとしても、容易に停電復旧することができるグラフ分割が存在するかどうかを判定する問題である。本研究では、グラフの耐故障分割問題に対し、入力グラフの構造が計算複雑性に与える影響について解析した。

2. グラフの耐故障分割問題

与えられたグラフ $G = (V, E)$ の点集合 V は、供給点の集合 $V_s \subseteq V$ と需要点の集合 $V_D = V \setminus V_s$ に分割されるとしよう。各供給点には供給量と呼ばれる正整数 $\text{sup}: V_s \rightarrow \mathbb{Z}^+$ が割り当てられ、各需要点には需要量と呼ばれる正整数 $\text{dem}: V_D \rightarrow \mathbb{Z}^+$ が割り当てられる。ここで、 \mathbb{Z}^+ は正整数の集合である。以降、 $n_s = |V_s|$ とし、 $V_s = \{s_1, s_2, \dots, s_{n_s}\}$ とする。

グラフ G の点集合 V の分割 $\mathcal{V} = (V_1, V_2, \dots, V_{n_s})$ が、以下の条件を満たすとき、それを G の分割と定義する。各 $i \in \{1, 2, \dots, n_s\}$ に対し、

- (i) V_i に誘導される G の部分グラフは連結である。
- (ii) $V_i \cap V_s = \{s_i\}$ であり、かつ、 $\text{sup}(s_i) \geq \sum_{v \in V_i \cap V_D} \text{dem}(v)$ 。

すなわち、 V_i に含まれる需要点は、供給点 s_i から供給を受ける。入力グラフ G が分割を持つかどうかを判定する問題は、**グラフの分割問題**と呼ばれる²⁾。

本研究では、グラフの分割に対し、耐故障性の概念を導入する。配電網での機器故障等に依り停電が発生した際に、停電復旧のしやすさを表す概念である。グラフ G の分割 $\mathcal{V} = (V_1, V_2, \dots, V_{n_s})$ を考えよう。本研究では、グラフ中の供給点が1つだけ故障するものとする。故障した供給点 s_i から供給を受けていた V_i に含まれる需要点は全て停電する。このとき、 G が次の条件を満たす分割 $(V'_1, V'_2, \dots, V'_{n_s})$ を持つとき、その分割は s_i の故障に対して**融通**できるという。

$$(i) \quad V'_i = \{s_i\}$$

$$(ii) \quad \text{全ての } j \in \{1, 2, \dots, n_s\} \setminus \{i\} \text{ に対して } V_j \subseteq V'_j.$$

直感的には、停電しなかったところは変更せずに、停電を復旧することに相当する。グラフ G の分割 \mathcal{V} が、 G に含まれるどの供給点 s_i に対しても、その故障に対して融通できるとき、その分割 \mathcal{V} を G の**耐故障分割**と呼ぶ。また、入力グラフ G が耐故障分割を持つかどうか判定する問題を**耐故障分割問題**と呼ぶ。

3. 耐故障分割問題の NP 困難性

まず本研究では、グラフの耐故障分割問題が NP 困難であることを証明した。これにより、この問題は一般には高速に解けそうにないことがわかる。

証明は、既に NP 完全と知られている Partition 問題¹⁾から帰着することで与えた。スペースの都合上、詳細は説明できないが、帰着によって得られるグラフを図1に示す。このグラフは、供給点が3個しかなく、直径4の直並列グラフ(木幅2)である。このような制

約を持つグラフであっても、耐故障分割問題は NP 困難であることを証明した。

上記の証明を少し変更することで、耐故障分割問題は、供給点が 3 個しかない完全二部グラフまたは完全グラフに inputs を制限しても NP 困難であることも示せる。

また、供給点の個数は定数ではないが、完全二部グラフ及び完全グラフに対する耐故障分割問題は、強 NP 困難であることも証明できる。これは既に強 NP 完全と知られている 3-Partition 問題¹⁾から帰着を構成した。

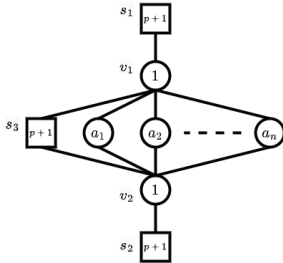


図 1 Partition 問題からの帰着によって得られるグラフ。ここで、四角は供給点、丸は需要点、供給点の中の数字は供給量、需要点の中の数字は需要量を表す。

4. 多項式時間アルゴリズム

はじめに、入力グラフに供給点が 2 個しかない場合を考えよう。この場合は、耐故障分割問題は線形時間で解ける。すなわち、どちらの供給点を取り除いても、グラフが連結であり、さらに残った供給点の供給量が全ての需要点の需要量の総和以上であることを確かめれば十分である。

次に、入力グラフをパスまたはサイクルに制限した場合を考えよう。ただし、供給点の個数に制限はないものとする。本研究では、この場合にも耐故障分割問題が線形時間で解けることを示した。ここでは、直感的な説明のみ与える。グラフがパスまたはサイクルであるため、グラフを辿って現れる順番に供給点を s_1, s_2, \dots, s_{n_s} と番号付けする。すると、各 $i \in \{1, 2, \dots, n_s\}$ に対して、供給点 s_i の隣にある供給点は 2 つだけであり、それは s_{i-1} と s_{i+1} である。したがって、供給点 s_i が故障した場合に発生する停電は、 s_{i-1} と s_{i+1} によって復旧するしかない。この事実を用いることで、パスまたはサイクルに耐故障分割が存在するかを判定することができる。

本研究では、入力グラフを直径 4 以下の木に限定した場合にも、耐故障分割問題が多項式時間で解けることを示した。直感的な説明ではあるが、直径 4 以下の木であるので、いくつかのスターを

中心点で繋いだようなグラフである。スターはグラフ構造が単純であり、それを利用して多項式時間アルゴリズムを開発した。

最後に、入力グラフが完全グラフである場合には、供給量と需要量の種類数をパラメータとした XP 時間アルゴリズムを与えた。したがって、これらの種類数が定数であれば、多項式時間アルゴリズムともいえる。このアルゴリズムは、ビンパッキング問題のアルゴリズムを拡張することで得た。

5. まとめ

本研究では、従来研究のグラフの分割問題に対し、耐故障性という概念を導入し、耐故障分割問題を定義した。そして、耐故障分割問題について、入力グラフの構造を主な着眼点として、計算困難性と容易性の解析を行った。

文献

- 1) Michael R. Garey and David S. Johnson. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman, 1979.
- 2) Takehiro Ito, Xiao Zhou, and Takao Nishizeki. Partitioning trees of supply and demand. *International Journal of Foundations of Computer Science*, Vol. 16, pp. 803-827, 2005
- 3) Koki Takayama and Yusuke Kobayashi. A strongly polynomial time algorithm for the maximum supply rate problem on trees. *Theoretical Computer Science*, Vol. 806, pp. 323-331, 2020.
- 4) 井上武, 高野圭司, 渡辺嵩之, 川原純, 吉仲亮, 岸本彰宏, 津田宏治, 湊真一, 林泰弘. ZDD を用いた系統運用制約を満たす配電網構成の網羅的探索手法. 電気学会全国大会, Vol. 6, pp. 52-53, 2012.

修士学位論文要約（令和5年3月）

相乗りにおける割り当てアルゴリズムに関する研究

菅原 直希

指導教員: 周 暁

Algorithms for Finding Ride-Sharing Assignment

Naoki SUGAWARA

Supervisor: Xiao ZHOU

Ride-sharing is one of the ways expected to reduce traffic congestion and environmental impact. In the ride-sharing assignment problem, given passenger requests with origin and destination locations, and available car locations, the task is to assign each cars to passengers such that the overall driving distance is as small as possible. This problem is known to be NP-hard for general graphs, even if each car carries exactly two passengers. In this paper, to obtain efficient algorithms, we assume reasonable constraints on the locations of passengers and drivers. We design algorithms for path graphs and general graphs under these restrictions.

1. はじめに

現代における移動手段の最も主要なものとして自動車が挙げられる。自動車は比較的自由な時間に、好きな場所へと移動することができる大変便利な乗り物である。一方で、渋滞や排気ガスによる環境への負荷など、様々な問題を抱えている。そのような問題を解決することが期待される手段の一つとして相乗りが存在する。相乗りとは、複数の乗客を1台の自動車に乗せ、それぞれの目的地へと送り届けることをいう。相乗りをすることによって、乗客を運ぶのに必要な車の数を減らすことができる。このように、自動車やドライバーと乗客とのマッチングを行う問題を相乗り問題という。相乗り問題については、想定する状況の違いにより様々な関連問題が研究されている。

例えば、ある目的地へと向かっているドライバーに対しリアルタイムで乗客をドライバーに割り当て、その乗客をドライバーが拾い、目的地へと送り届ける Dynamic Ridesharing^{5) 6)} や乗客が複数のドライバーを乗り換えながら目的地へ向かう Multi-hop Ridesharing³⁾、ドライバーの運転開始位置と終了位置の間で、各乗客に対する時間窓や最大乗車時間制限などの異なる制約のもと、人々を輸送する Dial-a-ride problem²⁾ などが研究されている。

これらに対し、本論文では相乗り割り当て問題を取り扱う。複数の乗客の初期位置とその目的地及び、複数の利用可能なドライバーの初期位置の情報が与えられた際に、それぞれのドライバーに対し複数の乗客を、全体の合計運転距離ができるだけ小さく

るように割り当てる問題を相乗り割り当て問題という。本問題について、各ドライバーが乗客2人を運ぶ場合（ドライバーの数に対し乗客の数がちょうど2倍）にNP困難であることが知られている¹⁾。またこの場合において、最適なコストの高々2.5倍の解をドライバーの数 n に対し $O(n^3)$ 時間で出力することが保証される近似アルゴリズムが存在する¹⁾。

2. 本論文の結果

本論文では各ドライバーが乗客2人を運ぶ場合の相乗り割り当て問題について、グラフクラスや、乗客やドライバーの位置関係の制限から本問題を解くアルゴリズムを示した。

2.1 パスであるグラフに対するアルゴリズム

本節では、グラフクラスがパスであり、各乗客が初期位置に対し右側にあると仮定した場合のアルゴリズムについて述べる。まず、乗客の目的地の数を p とした場合について、以下の定理を示した。

定理 1. 各ドライバーが乗客2人を運ぶ際に、グラフクラスがパスであり、各乗客が初期位置に対し右側にあると仮定した場合に、乗客の目的地が p 個である場合の相乗り割り当て問題を $O(p2^p \cdot n^2)$ 時間で解くアルゴリズムが存在する。

略証. まず、パスの端点から順に動的計画法により合計の運転距離を計算していくことでグラフ全体における最短の運転距離を求め、得られた結果を運転距離の計算とは逆にたどっていき各ドライバーに対する乗客の割り当てが求められる。□

定理 2. 各ドライバーが乗客2人を運ぶ際に、グラフクラスがバスであり、各乗客が初期位置に対し右側にあると仮定した場合に、相乗り割り当て問題に対する $O(n^3)$ 時間2倍近似アルゴリズムが存在する。

略証. 先行研究¹⁾の近似アルゴリズムを本制約のもとで改良することによって得られる。まず、各乗客2人のペアの、1人目の乗客を拾ってから2人の目的地へ送り届けるまでの運転距離を計算し、乗客を頂点、計算した乗客2人の運転距離を辺の重みとした最小重み完全マッチング⁴⁾を見つける。そうして得られた乗客のペアに対しドライバーを割り当てることで、割り当てを求める。□

2.2 一般のグラフに対するアルゴリズム

本節では、一般のグラフに対し乗客やドライバーの位置に制約を加えた場合のアルゴリズムについて述べる。まず、乗客の初期位置及び目的地が定数である場合について、以下の定理を示した。

定理 3. 各ドライバーが乗客2人を運ぶ際に、乗客の初期位置が q 個、目的地が p 個である場合の相乗り割り当て問題を $O(n(2n+pq)^{pq}/(pq)^{pq-2})$ で解くアルゴリズムが存在する。

略証. 動的計画法を用いて各ドライバーに各乗客を割り当てた場合の運転距離を計算することによって最短の運転距離を求める。その後、結果を逆にたどっていくことにより割り当てが求められる。□

次に、ドライバーの初期位置が1個である場合について以下の定理を示した。

定理 4. 各ドライバーが乗客2人を運ぶ際に、ドライバーの初期位置が1個である場合の相乗り割り当て問題を $O(n^3)$ で解くアルゴリズムが存在する。

略証. ドライバーの初期位置が1個である場合、各乗客2人のペアに対し、ドライバーの初期位置から乗客2人を拾って目的地へ送り届けるまでの運転距離を計算することができる。この運転距離を重みとした各乗客に対する最小重み完全マッチング⁴⁾を見つけることで、最適な乗客2人のペアを求め、そのペアに対しドライバーを割り当てることで、ドライバーに対する乗客の最適な割り当てが得られる。□

3. まとめ

本論文では相乗り割り当て問題について、グラフクラスや、乗客やドライバーの位置関係の制限から

本問題を解くアルゴリズムについて述べた。今後の課題としては、まずグラフクラスがバスである場合の計算複雑性の解析が挙げられる。また、ドライバーの初期位置が限られる場合や、乗客の初期位置が限られる場合における相乗り割り当て問題を解くアルゴリズムなどが挙げられる。

文献

- 1) X. Bei and S. Zhang. Algorithms for trip-vehicle assignment in ride-sharing. In *proceedings of the Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence and Thirtieth Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference and Eighth AAAI Symposium on Educational Advances in Artificial Intelligence*, AAAI'18/IAAI'18/EAAI'18. AAAI Press, 2018.
- 2) J.-F. Cordeau. A branch-and-cut algorithm for the dial-a-ride problem. *Operations Research*, 54(3):573–586, 2006.
- 3) F. Drews and D. Luxen. Multi-hop ride sharing. In *proceedings of the International Symposium on Combinatorial Search*, 2013.
- 4) H. N. Gabow. Data structures for weighted matching and nearest common ancestors with linking. In *proceedings of 1st Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA'90)*, pages 434–443, 1990.
- 5) A. Levofsky and A. Greenberg. Organized dynamic ride sharing: The potential environmental benefits and the opportunity for advancing the concept. In *proceedings of the Transportation Research Board 2001 Annual Meeting*, pages 7–11, 2001.
- 6) M. Schreieck, H. Safetli, S. Siddiqui, C. Pflügler, M. Wiesche, and H. Krcmar. A matching algorithm for dynamic ridesharing. *Transportation Research Procedia*, 19:272–285, 2016.

修士学位論文要約（令和5年3月）

球状アレイを用いた音源分離アルゴリズムの 実装方法が分離性能に及ぼす影響

武元 航

指導教員：坂本 修一

The Effect of the Implementation Method of Sound Source Separation Algorithm Using a Spherical Microphone Array on the Separation Performance

Wataru TAKEMOTO

Supervisor: Shuichi. SAKAMOTO

Beamforming using a spherical microphone array is a method of sound field analysis. It separates signal from a certain direction using time difference between signals on microphones. Beamforming algorithm using a spherical microphone array can be realized in two domains: spherical harmonic domain and time-frequency domain. However, the performance of sound source separation depends on the implementation of the beamforming in two domains because of the difference of their mathematical expression. In this study, we aim to analyze the effect on the sound separation performance, caused by the difference of their mathematical expression. Results of mathematical analysis and simulation revealed that the robustness would be degraded when the beamforming using non-uniformly distributed microphones is implemented in the spherical harmonics domain.

1. はじめに

ビームフォーミング^{1) 2)}とは、マイクロホンの観測信号の時間差を利用し、特定の方向の音を分離する技術である。多数のマイクロホンを球状に配置した球状マイクロホンアレイ³⁾を用いた場合、時間周波数領域での実装¹⁾に加え、球状マイクロホンアレイ上の音圧を球面調和スペクトルに分解して処理する球面調和領域での実装²⁾が容易となる。ただし、両計算領域のビームフォーミングは処理の違い²⁾があり、分離性能が異なる可能性がある。この処理の違いが分離性能に与える影響を知ることで、分離性能を改善したビームフォーミングを設計できると考えた。

そこで、本研究では両計算領域のビームフォーミングの処理の違いが分離性能に与える影響を分析した。

2. 理論

2.1 逆球面フーリエ変換・球面フーリエ変換

球上の関数 $f(\theta, \varphi)$ は、球面調和関数 $Y_n^m(\theta, \varphi)$ と球面調和スペクトル f_{nm} の線形結合（球面調和関数展開、逆球面フーリエ変換）で表せる。球状マイクロホンアレイを用いた信号処理では、球状マイクロホンアレイ上の音圧分布 $p(\theta, \varphi)$ などが球上の関数として扱われ、以下のように表せる。ここで、 n は次数、 m は位数、 p_{nm} は球面調和スペクトルである。

$$p(\theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n p_{nm} Y_n^m(\theta, \varphi) \quad (1)$$

一方、球面フーリエ変換を用いて、各位置 (θ_j, φ_j) のサンプリング点の値 $p(\theta_j, \varphi_j)$ から球面調和スペクトル p_{nm} を求められる。ただし、サンプリング点の数 M は有限であるため、解析できる次数 N には限

界が生じる。球面調和スペクトル p_{nm} は、以下のように球面フーリエ変換行列 \mathbf{S} を用いて求められる。

$$\mathbf{p}_{nm} = \mathbf{S} \mathbf{p} \quad (2)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \alpha_1^{00} \bar{Y}_0^0(\theta_1, \varphi_1) & \cdots & \alpha_M^{00} \bar{Y}_0^0(\theta_M, \varphi_M) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_1^{NN} \bar{Y}_N^N(\theta_1, \varphi_1) & \cdots & \alpha_M^{NN} \bar{Y}_N^N(\theta_M, \varphi_M) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{p}_{nm} = [p_{00}, \dots, p_{NN}]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{p} = [p(\theta_1, \varphi_1), \dots, p(\theta_M, \varphi_M)]^T \quad (5)$$

T は転置、 $(\bar{\cdot})$ は複素共役を表す。また、 α_j^{nm} は標本化補償係数であり、等密度でないマイクロホン配置を等密度に補正する役割がある。

2.2 時間周波数領域と球面調和領域のビームフォーミング

時間周波数領域のビームフォーミングは以下で定式化される。

$$\mathbf{y} = \mathbf{w}^H \mathbf{p} \quad (6)$$

$$\mathbf{w} = [w(\theta_1, \varphi_1), \dots, w(\theta_M, \varphi_M)]^T \quad (7)$$

ここで、 \mathbf{w} は位置 (θ_j, φ_j) の各マイクロホンの指向性を制御する重み係数 $w(\theta_j, \varphi_j)$ を含むベクトルである。一方、球面調和領域のビームフォーミングは、

$$\mathbf{y} = \mathbf{w}_{nm}^H \mathbf{p}_{nm} \quad (8)$$

$$\mathbf{w}_{nm} = [w_{00}, \dots, w_{NN}]^T \quad (9)$$

となる。式中の \mathbf{w}_{nm} は球面調和領域における指向性を制御する重み係数 w_{nm} を含むベクトルである。

表 1. 両計算領域の分離性能の定式化

	時間周波数領域	球面調和領域
DI	$\frac{ w_{nm}^H [Y^H Y] p_{nm}^l ^2}{\frac{1}{4\pi} w_{nm}^H [Y^H Y] B [Y^H Y] w_{nm}}$	$\frac{ w_{nm}^H p_{nm}^l ^2}{\frac{1}{4\pi} w_{nm}^H B w_{nm}}$
WNG	$\frac{ w_{nm}^H [Y^H Y] p_{nm}^l ^2}{w_{nm}^H [Y^H Y] w_{nm}}$	$\frac{ w_{nm}^H p_{nm}^l ^2}{w_{nm}^H [SS^H] w_{nm}}$

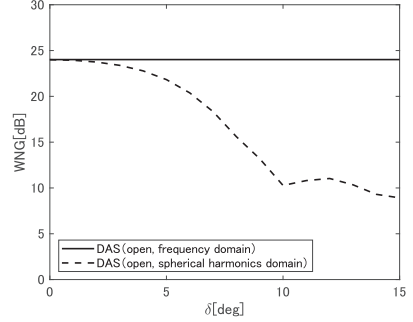


図 1. マイクロホン配置ごとの WNG の変化

文献²⁾によれば、両計算領域のビームフォーミングの重み w , w_{nm} と観測信号 p , p_{nm} の間に球面フーリエ変換対の関係がある場合、その処理の違いは球面フーリエ変換行列の積の有無に現れる。

3. 両計算領域のビームフォーミングの分離性能の分析

3.1 数式表現に基づく分析

両計算領域のビームフォーミングの式を指向性を制御する重み係数 w_{nm} を用いる形に改めて式変形した。時間周波数領域のビームフォーミングは、

$$w^H p = (Y w_{nm})^H p = w_{nm}^H Y^H p \quad (10)$$

と式変形できる。一方、球面調和領域のビームフォーミングは、

$$w_{nm}^H p_{nm} = w_{nm}^H (S p) = w_{nm}^H S p \quad (11)$$

と式変形できる。これらの式を比べることで、二つの計算領域のビームフォーミングの処理の違いは、 Y^H と S であることが見て取れる。ここで Y^H は以下のような行列であり、式 (3) の S と比較するとその違いは標準化補償係数 α_j^{nm} の有無に現れる。

$$Y^H = \begin{bmatrix} \bar{Y}_0^0(\theta_1, \varphi_1) & \cdots & \bar{Y}_0^0(\theta_M, \varphi_M) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Y}_N^N(\theta_1, \varphi_1) & \cdots & \bar{Y}_N^N(\theta_M, \varphi_M) \end{bmatrix} \quad (12)$$

ここで、マイクロホン配置が不均一な場合、標準化補償係数 α_j^{nm} は、各マイクロホン、次数 n , 位数 m で一定の値を持たない。そのため、指向性を制御した方向に対する出力を基準に正規化しても、両計算領域で式は等しくならない。

そこで、前段の式の違いが分離性能に与える影響を調べた。まず、特定の方向への指向性の強さを示す指向性指数とロバスト性を示すホワイトノイズゲインを指標として、両計算領域のビームフォーミングの分離性能の定式化を行った。結果を表 1 に示す。 B は動径分布関数を含む行列、 p_{nm}^l は指向性を制御した方向から到来する平面波に対して各マイクロホンで観測される音圧の球面調和スペクトルを含むベクトルである。両計算領域に関してそれぞれ比較すると、式の違いはマイクロホン配置の影響を受ける行列 $[Y^H Y]$, $[SS^H]$ の有無に現れている。

3.2 マイクロホン配置変化時の分離性能の変化

マイクロホン配置の条件を変化させ、シミュレーションを行った。比較対象は両計算領域での DAS (delay-and-sum beamformer) とした。球状マイクロホンアレイは、半径 0.085 m の 252 ch 空球マイクロホンアレイを仮定した。マイクロホン配置は、 δ を不均一度のパラメータとして、不均一度が小さい配置³⁾を基準に制御した。 δ を 0~15 度まで 1 度ごとに変化させ、各 δ において $\pm\delta$ の範囲での一様分布でマイクロホンの位置を変化させた。両計算領域の DAS が球面フーリエ変換対の関係となる 9 kHz までシミュレーションした。音速は 344 m/s, サンプリング周波数は 48 kHz, 分析窓長は 1024 である。

5 kHz におけるホワイトノイズゲインの結果を図 1 に示す。マイクロホン配置が不均一になるほど DAS (球面調和領域) で値が低下し、両計算領域の DAS で差がみられている。一方、指向性指数は、マイクロホン配置が変化しても両計算領域の DAS で差は小さかった。要因としては、定式化した分離性能の式に含まれる $[SS^H]$ がマイクロホン配置の影響を受けやすいことが考えられた。

3.3 剛球アレイの散乱が分離性能に与える影響

剛球アレイを用いた場合、観測信号には散乱が含まれるため、両計算領域のビームフォーミングを実装した場合、空球アレイの条件下と分離性能は異なる可能性がある。そこで、3.2 節のマイクロホンアレイの条件を剛球アレイに変更し、剛球アレイにおける DAS を用いてシミュレーションを行った。その結果、マイクロホン配置が不均一になるほど DAS (球面調和領域) でホワイトノイズゲインが低下した。その際、低下した量は空球アレイの条件下と同程度だった。このことから、散乱の有無により、両計算領域の処理の違いが分離性能に与える影響は変化しないことが分かった。

文献

- 1) 浅野, “音のアレイ信号処理,” コロナ社, 2009.
- 2) Rafaely, “Fundamentals of Spherical Array Processing second edition,” Springer, 2015.
- 3) Sakamoto, AST, 36(6), pp.516–526, 2015.

修士学位論文要約（令和5年3月）

ベクトルシンボル構造を用いたパターンマッチングに関する研究

田中 聡

指導教員：篠原 歩

Research on pattern matching using Vector Symbolic Architectures

Soh TANAKA

Supervisor: Ayumi SHINOHARA

Pattern matching is a problem to find pattern string in text string. Vector Symbolic Architectures (VSA) are frameworks representing data using hyperdimensional vectors. There already exists research on pattern matching using VSA. It is expected to work fast in hardware which can process it in parallel. In this research I defined hierarchical string and proposed the way to solve hierarchical pattern matching using VSA.

1. はじめに

パターンマッチングとはテキストと呼ばれる文字列の中からパターンと呼ばれる文字列とのマッチ箇所を探す問題である。ベクトルシンボル構造¹⁾とは高次元ランダムベクトルを用いてデータを表す計算の枠組みである。ベクトルシンボル構造を用いてパターンマッチングを行う研究が存在する。ベクトルシンボル構造を用いることにより、並列計算が可能なハードウェア上で高速に動作することが期待されている。Kleykoら⁴⁾は、ベクトルシンボル構造を用いて最長共通部分文字列探索を解く手法を提案した。Kimら³⁾は、ベクトルシンボル構造を用いたDNAパターンマッチングに特化したハードウェア高速化の研究を行った。本研究では、階層的な文字列を定義し、ベクトルシンボル構造を用いて階層的パターンマッチングを行う手法を提案した。また、本手法に用いる閾値の値を計算によって検証した。

2. 階層的パターンマッチング

階層的な文字列は、長さが等しい複数の文字列をコンパクトに表したものである。例えば、文字列 eab, eac, ead は、階層的な文字列で $ea \begin{bmatrix} b \\ c \\ d \end{bmatrix}$ と表すことができる。階層的なパターンマッチングとは、文字列 T と階層的な文字列 P が与えられたとき、 T から P が表す文字列の出現箇所を列挙する問題である。例えば、 $T = aeadaeabd$, $P = ea \begin{bmatrix} b \\ c \\ d \end{bmatrix}$ のとき、出現箇所は、1 と 5 である。

3. ベクトルシンボル構造

ベクトルシンボル構造 (VSA) は高次元ランダムベクトルを用いてデータを表す計算の枠組みであり、データを表す高次元ベクトル空間、類似度、バインド、バンドルから構成される。類似度とは、2つのベクトル \mathbf{a} と \mathbf{b} の近さを表す指標であり、それぞれのベクトルが表すデータ同士が近いとき大きく、遠いとき小さい値をとるように設定される。記号には $\text{sim}(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ を用いる。文字、文字列、階層的な文字列等の変数に対応する高次元ベクトルを、その変数の太字で表す。バインド、バンドルは複数のベクトルから一つのベクトルを生成する演算であり、それぞれ \boxtimes , \boxplus という記号を用いる。バインドは「かつ」に対応し、引数のベクトルが一つでも異なれば類似度の小さいベクトルが生成される。例えば $\text{sim}(\mathbf{c}, \mathbf{d}) \sim 0.5$ のとき、 $\text{sim}(\mathbf{a} \boxtimes \mathbf{b} \boxtimes \mathbf{c}, \mathbf{a} \boxtimes \mathbf{b} \boxtimes \mathbf{d}) \sim 0.5$ となる。バンドルは「または」に対応し、引数のベクトルが一つでも一致していれば類似度の大きいベクトルが生成される。例えば $\text{sim}(\mathbf{a} \boxplus \mathbf{b} \boxplus \mathbf{c}, \mathbf{a} \boxplus \mathbf{d} \boxplus \mathbf{e}) > 0.5$ となる。本研究では、VSA の一種である Binary Spatter Codes (BSC)²⁾ を用いた。

4. ベクトルシンボル構造を用いたパターンマッチング

アルファベット中の文字それぞれに 0, 1 を要素とする D 次元ランダムベクトルを与える。文字列に対応するベクトルは、文字に対応するベクトルを文字の位置だけ循環シフトしたものをバインドして計算する。循環シフト $\rho_i(\mathbf{a})$ はベクトル \mathbf{a} の値を一定数 i 後方へずらし、はみ出した値を先頭にずらす操作である。

循環シフトをすることで、循環シフトする前と循環シフトした後のベクトル同士の類似度は0.5に近い値になる。例えば $\text{sim}(\mathbf{a}, \rho_1(\mathbf{a})) \sim 0.5$ となる。この性質を用いて、文字列の i 番目の文字 \mathbf{a} を $\rho_i(\mathbf{a})$ と表すことができる。 $S = \text{abc}$ は、0文字目が \mathbf{a} かつ1文字目が \mathbf{b} かつ2文字目が \mathbf{c} であるから、 S に対応するベクトル \mathbf{S} は $\mathbf{a} \boxtimes \rho_1(\mathbf{b}) \boxtimes \rho_2(\mathbf{c})$ と計算する。このとき、一致する二つの文字列に対応するベクトルの類似度は1になり、一致しない二つの文字列に対応するベクトルの類似度の期待値は0.5となる。この性質から、VSAを用いてパターンマッチングを解くことができる。本研究では、バインドとバンドルを用いて階層的な文字列に対応するベクトルの計算方法を提案した。例えば、階層的な文字列 $H = \text{ea} \begin{bmatrix} \mathbf{b} \\ \mathbf{c} \\ \mathbf{d} \end{bmatrix}$ は、0文字目が \mathbf{e} かつ1文字目が \mathbf{a} かつ2文字目が \mathbf{b} または \mathbf{c} または \mathbf{d} であるから、 H に対応するベクトル \mathbf{H} は、 $\mathbf{e} \boxtimes \rho_1(\mathbf{a}) \boxtimes \rho_2(\mathbf{b} \boxplus \mathbf{c} \boxplus \mathbf{d})$ と計算する。ベクトルシンボル構造の性質と本手法から以下の定理を示した。

- 文字列 S と階層的な文字列 H がマッチするとき、 $\text{sim}(\mathbf{S}, \mathbf{H})$ の期待値は0.5よりも大きい。
- 文字列 S と階層的な文字列 H がマッチしないとき、 $\text{sim}(\mathbf{S}, \mathbf{H})$ の類似度の期待値は0.5になる。

これらの定理から、類似度に対して適切な閾値を与えることで階層的なパターンマッチングが確率的に解けることがわかる。

5. 計算量

ベクトルの次元を D 、テキストの長さを n 、階層的なパターンの長さを m 、階層的なパターンに対応するベクトルを計算する際のバンドルの数を k 、バインドの数を l とする。但し $l \geq m - 1$ である。階層的なパターンをベクトルで表す計算は $\mathcal{O}(D(k+l))$ で実行できる。但し、階層的なパターンの構文解析にかかる計算は考慮していない。マッチ箇所を全て求める計算は $\mathcal{O}(Dn)$ で実行できる。

6. 類似度の期待値計算

文字列と階層的な文字列に対応するベクトルの類似度の期待値は以下の補題で求められる。

- $\text{sim}(\mathbf{A}, \mathbf{X}) \approx p_0$, $\text{sim}(\mathbf{A}, \mathbf{Y}) \approx p_1$ のとき、
 $\text{sim}(\mathbf{A}, \mathbf{X} \boxplus \mathbf{Y}) \approx \left(\frac{1}{2}\right)^2 (p_0 + p_1 + 1)$
- $\text{sim}(\mathbf{A}, \mathbf{X}) \approx p_0$, $\text{sim}(\mathbf{B}, \mathbf{Y}) \approx p_1$ のとき、
 $\text{sim}(\mathbf{A} \boxtimes \mathbf{B}, \mathbf{X} \boxtimes \mathbf{Y}) \approx 2p_0p_1 - p_0 - p_1 + 1$

実験ではこの計算式を用いた期待値の整合性を確認した。

7. 実験

6種類の異なる文字列とマッチする階層的なパターンを用いて階層的なパターンマッチングの実験を行った。実験結果は図1に示す。階層的な文字列とマッチする文字列ごとに、類似度の期待値は異なる。閾値は、最も0.5に近い期待値である0.508を基準に 0.508 ± 0.05 の範囲で0.001刻みで与えた。閾値が0.508付近では真陽性率が1で、偽陽率が0に近かった。

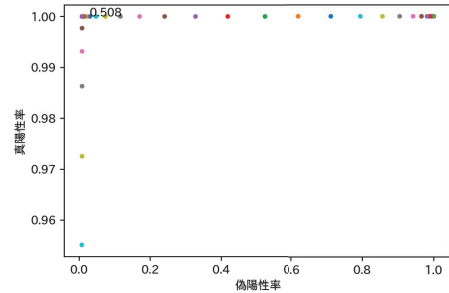


図1: BSCによる階層的なパターンマッチング

8. まとめ

本研究ではVSAを用いた階層的なパターンマッチング手法を提案した。今後の課題はベクトルの次元を考慮し、類似度の期待値のみならず分散を用いてより正確な閾値の設定をすることである。

文献

- 1) Ross W. Gayler. Vector symbolic architectures answer Jackendoff's challenges for cognitive neuroscience. In *ICCS*, pp. 133–138, 2004.
- 2) Pentti Kanerva. The spatter code for encoding concepts at many levels. In *International Conference on Artificial Neural Networks*, pp. 226–229, 1994.
- 3) Yeseong Kim, Mohsen Imani, Niema Moshiri, and Tajana Rosing. GenieHD: Efficient DNA pattern matching accelerator using hyperdimensional computing. *DATE 2020*, pp. 115–120.
- 4) Denis Kleyko and Evgeny Osipov. On bidirectional transitions between localist and distributed representations: The case of common substrings search using vector symbolic architecture. *Procedia Computer Science*, Vol. 41, pp. 104–113, 2014.

修士学位論文要約（令和5年3月）

耐故障性を持つ配電経路の策定アルゴリズムに関する研究

野崎 哲平

指導教員：伊藤 健洋

Research on Algorithms for Fault-Tolerant Distribution Routes in Electrical Distribution Networks

Tepei NOZAKI

Supervisor: Takehiro ITO

Power distribution networks are usually designed to supply power from multiple routes. In this research, we mathematically model the problem of finding a power distribution route in a given electrical distribution network such that the restoration is possible without complicated procedures when a supply source is damaged. In this study, we prove that this problem is NP-hard in general. We then propose heuristic algorithms to solve the problem, and experimentally evaluate their performances.

1. はじめに

実社会の様々な課題はグラフを用いて数理モデル化でき、これまでも多くの組合せ最適化問題が研究されてきた。例えば、電力の配電経路を求める課題は、グラフの分割問題として定式化され¹⁾、様々な派生問題も含めて、長年研究が行われている²⁾。

配電網は、需要点と供給点を持つグラフ $G = (V, E)$ として与えられるとする。グラフの各需要点 v は、配電網において電力を消費する負荷区間に相当し、その負荷区間で必要とする需要量を表す非負整数 d_v が割り当てられているとする。各供給点は、配電網における変電所など電力の送り出しに相当し、本研究では供給量の制限はないものとする。グラフの各辺 $e \in E$ は、開閉器を伴う電線に相当し、その開閉器を開閉することで、辺 e 上を電流が流れるか否かを制御できるものとする。各辺 e には辺容量として非負整数 c_e が割り当てられており、その辺へ流せる電流量の上限を表すものとする。

配電網における配電経路は、グラフ G から何本かの辺を除去し（すなわち、対応する開閉器を開状態にして）、グラフをいくつかの連結成分に分割することで表現される。このとき、各連結成分は木でなければならず、供給点から各需要点への一意に定まる経路では、全ての辺容量が満たされなければならない。今後、このような条件を満たす分割を、単に G の分割と呼ぶ。

一般に、入力グラフ G には多数の分割が存在する。例えば、日本の標準的な電力網をモデル化した標準解析モデル⁴⁾には、 10^{57} 通り以上の分割が存在することが知られている³⁾。それら分割の善し悪しを評価する指標は、配電損失などいくつか存在するが、

本研究では系統事故発生時における停電復旧の観点で評価する。本研究では、グラフ中の供給点が1つだけ故障するものとする。このとき、故障した供給点 s から供給を受けていた需要点は停電する。本研究では、停電復旧のために、停電した需要点に接続する辺のみの開閉状態を操作できるものとする。このような仮定の下、グラフ G の分割において供給点 s が故障した際、復旧できない停電量を s の故障に対する停電量と呼ぶことにする。本研究では、グラフ G の分割の耐故障性を表す指標として、最大停電量と平均停電量の二種類を提案する。すなわち、 G の各供給点 s の故障に対する停電量を計算し、最大停電量ではその最大値を指標とし、平均停電量ではその平均値を指標とする。

本研究では、入力グラフ G に対して、最大停電量または平均停電量を最小化する分割を求めることは、NP 困難であることを示した。（ただし、紙面の都合上、本稿では省略する。）したがって、これらの指標を最適化することは一般には難しい。そこで、本研究では、ヒューリスティクスアルゴリズムを提案し、計算機実験に依ってその性能を評価した。

2. 耐故障性の高い分割を求めるヒューリスティクス

前述の通り、最大停電量や平均停電量を最適化することは計算困難である。そこで本研究では、耐故障性の高い分割を高速に求めるために、他の評価値を用いてグラフ分割の探索を行うヒューリスティクスアルゴリズムを提案する。評価値として、電気分野でよく利用される配電損失、電流裕度率、最大電圧降

下の三つを比較検討した。これらの評価値を用いて、本研究では探索アルゴリズムを次のように構成する。

まず、入力されたグラフに対して初期解を一つ構成する。次に、グラフ分割の間に隣接関係を導入し、現在の分割に対して局所的な列挙を可能とする。列挙された隣接する分割に対して評価値を計算し、その中で最も良い評価値を持つ分割へと移動する。これを、評価値の改善が出来なくなるまで繰り返す。

3. 計算機実験

本研究では、ベンチマークデータとして、日本の標準的な電力網をモデル化した標準解析モデル⁴⁾を使用した。このモデルには、72個の供給点があり、各需要点は24時間分の異なる需要量データが与えられている。配電損失、電流裕度率、最大電圧降下の三つの評価値について前述のアルゴリズムを適用し、得られたそれぞれのグラフ分割に対して、最大停電量と平均停電量を計算した。

実験の結果、三つの評価値の中では、配電損失に基づき得られたグラフ分割が、最大停電量及び平均停電量ともに良い値を示す傾向があった(図1, 2参照)。配電損失が良い(少ない)グラフ分割では、各供給点が供給する負荷区間がバランス良く分散される傾向があることに起因すると考察される。

次に、各評価値が最大停電量や平均停電量と相関があるかを解析した。その結果、三つの評価値それぞれが、相関を示すことが分かった。

4. まとめ

本研究では、最大停電量または平均停電量を最小化する分割を求めることはNP困難であることを示した。また、配電損失、電流裕度率、最大電圧降下の三つの評価値に基づき、耐故障性の高いグラフ分割を求めるヒューリスティクスアルゴリズムを提案し、計算機実験に依って評価した。

文献

- 1) Takehiro Ito, Xiao Zhou, and Takao Nishizeki, Partitioning trees of supply and demand, International Journal of Foundations of Computer Science, Vol. 16, No. 4, pp. 803-827, 2005.
- 2) Koki Takayama and Yusuke Kobayashi, A strongly polynomial time algorithm for the maximum supply rate problem on trees, Theoretical Computer Science, Vol. 806, pp. 323-331, 2020.
- 3) 井上武, 高野圭司, 渡辺喬之, 川原純, 吉仲亮, 岸本章宏, 津田宏治, 湊真一, 林泰弘, ZDDを用いた系統運用制約を満たす配電網構成の網羅的探索手法, 電気学会全国大会, 6巻, pp. 52-53, 2012.

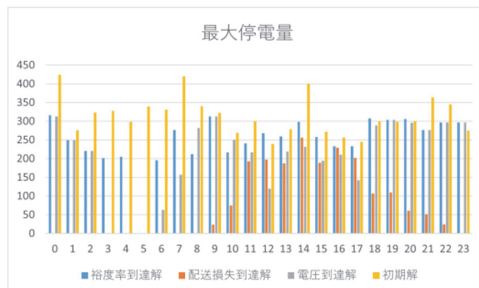


図1: 0-23時における各評価値で求められたグラフ分割の最大停電量

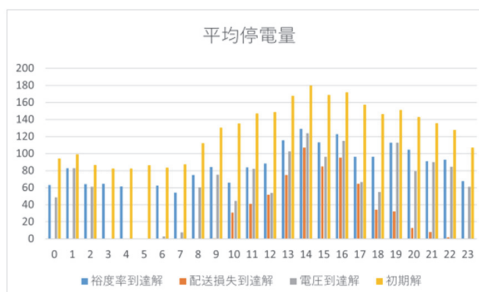


図2: 0-23時における各評価値で求められたグラフ分割の平均停電量

- 4) 林泰弘, 川崎章司, 松木純也, 松田浩明, 酒井重和, 宮崎輝, 小林直樹, 分散型電源連系配電ネットワークの標準解析モデルの構築とネットワーク構成候補の多面的評価手法の開発, 電気学会論文誌B(電力・エネルギー部門誌), Vol. 126, No. 10, pp. 1013-1022, 2006.

修士学位論文要約（令和5年3月）

グラフ上の拡散競争におけるナッシュ均衡存在判定問題に関する研究

松崎 雄大

指導教員: 周 暁 学位論文指導教員: 鈴木 顕

On the Decision Problem Determining the Existence of a Nash Equilibrium for Competitive Diffusion on Graphs

Yudai MATSUZAKI

Supervisor: Xiao ZHOU Research Advisor: Akira SUZUKI

Competitive diffusion is a game-theoretic model of diffusion of technologies, advertisements, or influence through a social network. In this thesis, we investigate computational complexity of determining the existence of a Nash equilibrium for competitive diffusion on a given integer vertex-weighted graph with the number of the players. We show the problem is NP-complete even for cactus graphs with positive integer vertex-weights. Moreover, we give a polynomial-time algorithm to solve Competitive Diffusion for forests of weighted stars.

1. はじめに

近年では、TwitterやInstagram、Facebookといったサービス上のソーシャルネットワークにより情報は容易に拡散する。今まで、情報拡散の過程や動向の分析がコンピュータサイエンスにより研究されてきた。多くの場合、ネットワークを介して自社の商品を宣伝したい企業側に焦点が当てられている。特に、複数の競合企業がより多くの顧客へ商品を広めようとする場合の拡散過程は、ゲーム理論的な定式化がなされている。

本学位論文ではNoga Alonらによって提唱された**拡散競争ゲーム**¹⁾について取り扱う。拡散競争ゲームはソーシャルネットワークを利用したバイラルマーケティングのモデル化として提案された。バイラルマーケティングとは、ソーシャルネットワーク上の利用者の口コミによって行われる宣伝手法である。ここで、複数の企業が競合する商品をバイラルマーケティングにより宣伝する場合を考える。各企業は利用者の中から宣伝する人を選び、その人に自社の商品の情報をネットワークで拡散してもらう。ここで、ソーシャルネットワークをグラフに、利用者の価値を点重みに、企業数をプレイヤー数に対応させることで、バイラルマーケティングをモデル化できる。拡散競争ゲームにおいて、どのプレイヤーも戦略を変えることによって自分の利得を増やすことができない安定した状態のことをナッシュ均衡という。プレイヤー数 k 人で拡散競争ゲームをしたとき、少なくとも一つのナッシュ均衡となる戦略の組が存在するかどうかの判定問題として、**拡散競争**

ゲームナッシュ均衡存在判定問題の研究が進んでいる。この問題はNP完全であることが示されており³⁾、プレイヤー数 k をパラメータとしても $W[1]$ -hardであることが示されている⁴⁾。また、非負重みの場合、直並列グラフでNP完全であり、正負の重みの場合、森で弱NP完全であることが示されている⁴⁾。容易性については、鎖グラフ、閾値グラフにおいて多項式時間アルゴリズムが示されており、パス森において擬多項式時間アルゴリズムが示されている⁴⁾。

2. 定義

本節では**拡散競争ゲーム**と**ナッシュ均衡**についての定義と表現を与える。

拡散競争ゲームは、無向グラフ $G = (V, E)$ と、整数の頂点重み $w: V \rightarrow \mathbb{Z}$ 、及び自然数 $k \in \mathbb{N}$ が入力として与えられる。**拡散競争ゲーム**は、 k 人のプレイヤー p_1, p_2, \dots, p_k によって、以下のように帰納的に行われる：時刻1において、 $1 \leq i \leq k$ の各プレイヤー p_i は、頂点 $v_i \in V$ を選択する。 v_i を p_i の**戦略**と呼ぶ。この時、 p_i は頂点 v_i を獲得したという。ただし、時刻1に同じ頂点 v を選択するプレイヤーが2人以上存在した場合、 v は以降どのプレイヤーにも獲得されない頂点となる。このような頂点を中立点と呼ぶ。以降 $t \geq 2$ となる t において、時刻 $t-1$ で、まだどのプレイヤーにも獲得されていない頂点 $r \in V$ が、あるプレイヤー p_i に獲得された隣接点を持ち、かつ p_i 以外に獲得された隣接点を持たない場合、 r は時刻 t において p_i に獲得され

る。もし r が異なるプレイヤーに獲得された複数の頂点と隣接していた場合、 r は時刻 t に中立点となる。どのプレイヤーもこれ以上頂点を獲得できなくなったときにゲームは終了する。それぞれのプレイヤーに対し、他のプレイヤーの戦略を固定したときに、自分の戦略を変更してもより良い利得を得られない状態の戦略の組はナッシュ均衡であるという。

拡散競争ゲームナッシュ均衡存在判定問題は、グラフ G 上で拡散競争ゲームを k 人で行った場合、ナッシュ均衡となる戦略の組 s が少なくとも1つ存在するかどうかを判定する問題である。

3. 結果

本学位論文では、非負重みの場合、カクタスグラフに対して、拡散競争ゲームナッシュ均衡存在判定問題が NP 完全であることを示した。また、正負重みの場合、スター森に対し拡散競争ゲームナッシュ均衡存在判定問題を解く多項式時間アルゴリズムを与えた。

定理 1. 拡散競争ゲームナッシュ均衡存在判定問題は重みが非負の場合、入力グラフをカクタスグラフに限定した場合ですら、NP 完全である。

今回の帰着では集合分割問題からの多項式時間帰着により、拡散競争ゲームナッシュ均衡存在判定問題は NP 完全であることを証明した。

定理 2. 拡散競争ゲームナッシュ均衡存在判定問題は正負の重みの場合、入力グラフがスター森ならば $O(k^2m^2)$ 時間で判定できる。重みが非負の場合は $O(km \log(km))$ 時間で判定できる。ここで、 k はプレイヤー数、 m はスターの個数である。

補題 1. グラフ G の各連結成分において、全ての $i(1 \leq i \leq k)$ について、プレイヤー数 i のときのナッシュ均衡となる戦略の組の数が、 $|G|$ の多項式で抑えられ、ナッシュ均衡となる戦略の組の最小の利得が人数が増加すると単調に減少するならば、拡散競争ゲームナッシュ均衡存在判定問題の多項式時間アルゴリズムが存在する。

補題 2. 1つのスターにおける拡散競争ゲームにおいて、ナッシュ均衡となる戦略の組は高々2組である。

略証. スターの葉の次数は1であるため、 $(k-1)$ 人のプレイヤーは葉の重みの利得しか得られない。したがって、ナッシュ均衡となる戦略の組は、センターと重みの大きい $(k-1)$ 個の葉からなる戦略の

組か、重みの大きい k 個の葉からなる戦略の組の2組しか存在しえない。□

補題1と2より、正負の重みの場合のアルゴリズムを作成することができる。計算時間は $O(k^2m^2)$ である。また、非負重みの場合、二分探索を用いることにより計算時間が $O(km \log(km))$ へ短縮することができる。

4. まとめ

本学位論文において、拡散競争ゲームのカクタスグラフにおける困難性、およびスター森における容易性を示した。今後の課題としては、短時間で拡散競争ゲームが終了するグラフクラスでは比較的解析しやすいため、直径が小さい他のグラフクラスについて多項式時間アルゴリズムを探すことが考えられる。また、先行研究から鎖グラフや閾値グラフでは多項式時間アルゴリズムが存在するため、これらのグラフクラスを包含する準閾値グラフの容易性もしくは困難性を示すことも今後の課題として挙げられる。

文献

- 1) N. Alon, M. Feldman, A. Procaccia, and M. Tennenholtz. A note on competitive diffusion through social networks. *Information Processing Letters*, 110:221–225, 2010.
- 2) L. Bulteau, V. Froese, and N. Talmon. Multi-player diffusion games on graph classes. *Internet Mathematics*, 12(6):363–380, 2016.
- 3) R. Etesami and T. Basar. Complexity of equilibrium in competitive diffusion games on social networks. *Automatica*, 68:100–110, 2016.
- 4) T. Ito, Y. Otachi, T. Saitoh, H. Satoh, A. Suzuki, K. Uchizawa, R. Uehara, K. Yamanaoka, and X. Zhou. Competitive diffusion on weighted graphs. volume 9214, pages 422–433, 2015.
- 5) E. Roshanbin. The competitive diffusion game in classes of graphs. pages 275–287, 2014.
- 6) L. Small and O. Mason. Nash equilibria for competitive information diffusion on trees. *Information Processing Letters*, 113:217–219, 2013.
- 7) X. Sun, Y. Sun, Z. Xia, and J. Zhang. *The One-Round Multi-i-player Discrete Voronoi Game on Grids and Trees*, pages 529–540. 2019.

修士学位論文要約（令和5年3月）

自己運動の物理的および主観的規定因が 頭部回転中の音空間知覚に及ぼす影響

守部 颯一郎
指導教員：坂本修一

Effects of Objective and Subjective Characteristics of Self-motion on Sound Space Perception during Head Rotation

Soichiro Moribe
Supervisor: Shuichi SAKAMOTO

Many studies have investigated the effects of head movement on sound localization, but the effects are not clear. In this study, we examined three experiments and investigated the effect of head rotation on auditory spatial perception. First, we equalized the binaural signals presented during the experiment with/without head rotation. Next, the effects of physical parameters during head rotation on sound localization were examined. Finally, the effect of active/passive head motion on sound localization was examined. The results show that listeners can localize sound position accurately even when their head is rotating.

1. はじめに

これまで多くの研究で、頭部運動が音像定位に及ぼす影響について調査が行われてきたが、頭部運動によって音像定位精度が向上¹⁾する場合と低下する場合²⁾の両方が報告されており、その影響は明らかではない。そこで本論文では3つのパラメータについて検討を行い、頭部運動の及ぼす影響について検討した。

はじめに頭部回転によって生じる音源からの耳入力信号の変化と、音源自体の移動で生じる音源からの耳入力信号の変化を統制し、頭部回転の有無が音像定位に与える影響について調査を行った。次に、初速や加速度など速度に付随するパラメータの影響について同時に統制を行い、その影響を調査した。最後に頭部運動時の自発性の有無の影響について調査を行った。

2. 頭部回転が相対回転運動する音源の音像定位に及ぼす影響

実験は東北大学の無響室にて行った。聴取者の正面に2°ごとに円形にスピーカを設置した。実験には2種類の刺激を用いた。1つ目はホワイトノイズ(A特性音圧レベル:55 dB)である。2つ目は帯域ノイズ(500~5000 Hz, A特性音圧レベル:65 dB)であり、信号長は立ち上がり立下り各10 msを含む50 msとなっている。以後方向判別音と記載する。聴取者の頭部回転によって音源が相対的に回転移動する場合(音源移動条件)、聴取者静止時に音源自体が回転移動する場合(頭部回転条件)と、音も頭部も静止している場合(静止条件)の3つの条件を設定し実験を行った。

音源移動条件ではまず、15°/sで回転移動する音像(ホワイトノイズ)の呈示が開始された。その後、聴取者の正面(0°)、左右(±10°)のいずれか(以下、この角度を判断角度と記載する)に移動音像が到達した瞬間に、判断角度を中心に左右10°の範囲にあるスピーカのいずれかから方向判別音が呈示された。聴取者は移動音像に対し方向判別音が左右どちらから聞こえたかを回答した。

頭部回転条件ではまず、聴取者が速度制御が可能な椅子で15°/sの速度で受動回転を開始した。その後、音源の相対移動角度が音源移動条件と同様になるように判断角度のいずれかから相対移動音像(ホワイトノイズ)の呈示が開始した。その後、同様に方向判別音の呈示が行われた。聴取者は相対移動音像に対し方向判別音が左右どちらから聞こえたかを回答した。

回答から主観的等価点(PSE)と丁度可知差異(jnd)を算出した。jndは先行研究²⁾³⁾と同様、頭部回転時にはその値が増加し、音像定位精度が低下した。そこで、以後はPSEについて言及する。PSEから方向判断時の移動音像の位置(0°もしくは±10°)を減算した値を知覚された音像位置の変位として、評価を行った。

知覚された音像位置の変位を図1に示す。統計検定の結果、音源移動条件(SoundL, SoundR)では他の条件と比べ音源の移動方向へと有意な変位が見られた。これはフラッシュラグ効果の影響と考えられる⁴⁾。一方、頭部回転条件(HeadL, HeadR)は静止条件と同程度の変位となり音像の位置が正確に知覚された。頭部回転条件では音源の移動が自身の運動に起因する。そのため、音源移動条件よりも音

像の移動の予測ができ、フラッシュラグ効果が生じなかったと推察される。

3. 頭部回転速度に寄与するパラメータが音像定位に及ぼす影響

回転速度に関するパラメータの影響をそれぞれ相殺できる実験条件(表1)を作成し、実験を行った。実験方法については先ほどの頭部回転条件とほぼ同様のため、省略する。成人男女12名に対して実験を行った。このとき、頭部回転方向は左方向のみで、判断角度は±10°として実験を行った。そのうえで第2章と同様、PSEをもとに知覚された音像位置の変位を算出した。

知覚された音像位置の変位を図2に示す。統計検定の結果、実験条件間で有意な差は生じなかった。このことから知覚された音像位置の変位に頭部回転速度に寄与するパラメータの影響は小さいことが推察される。先行研究⁵⁾では加速度が音像の位置に影響を及ぼすことが報告されていたが本実験では見られなかった。先行研究に対し加速度の大きさが小さかったことが理由と考えられる。

4. 頭部運動の自発性が音像定位に及ぼす影響

自発的な回転を行う場合を自発回転条件、自発性のない回転を行う場合を受動回転条件とした。受動回転条件ではこれまでの実験と同様、回転椅子で受動回転をさせ実験を行った。自発回転条件ではヘッドマウントディスプレイ上に視覚刺激を呈示し、その刺激に合わせて聴取者に頭部を回転させた。実験方法についてはこれまでとほぼ同様であるため省略する。

知覚された音像位置の変位を図3に示す。実験条件間で有意な差は生じなかった。このことから知覚された音像位置の変位に頭部運動の自発性が及ぼす影響は小さいことが推察される。先行研究⁶⁾では自発回転の有無で差が生じることが報告されていたが、本実験では生じなかった。自発回転条件および受動回転条件で耳入力信号の変化を統制したため差が生じなかったと考えられる。

5. 結論

本研究によって、頭部回転時にはそのパラメータに依らず、音像の位置は頭部が静止し音源が移動していないときと同様、正確に知覚されることが明らかとなった。

文献

- 1) Thurlow *et al.*, JASA, 42-2, 480-488, 1967
- 2) 大場他, 音講論(春), 3-8-3, 2013
- 3) 角掛他, 音講論(春), 2-P-35, 2016
- 4) Alais *et al.*, Current Biology, 13, 1-20, 2003

- 5) Lester *et al.*, Acta Psychologica, 31, 375-384, 1969
- 6) 植松他, 音講論(秋), 2-3-7, 2001

表1. 全実験条件

実験条件	加速度	初速	速度	加速時間	回転角度
Acc1	-4°/s ²	23°/s	7°/s	4s	60°
Acc2	2°/s ²	11°/s	19°/s	4s	60°
Acc3	2°/s ²	17°/s	23°/s	3s	60°
Acc4	-2°/s ²	17°/s	7°/s	5s	60°
Const	0°/s ²	17°/s	17°/s	0s	60°
Static	0°/s ²	0°/s	0°/s	0s	0°

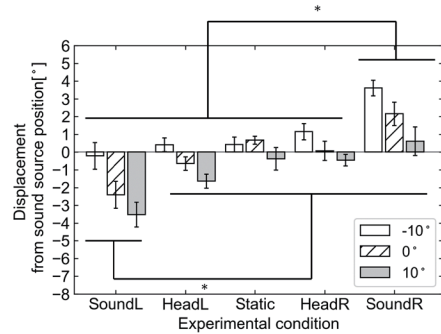


図1. 各実験条件での知覚された音像位置の変位 (*:p < .05). 誤差棒は標準誤差を表す。

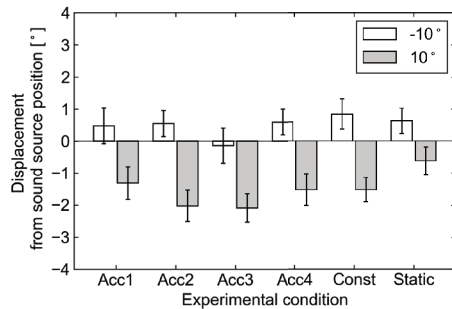


図2. 各実験条件での知覚された音像位置の変位. 誤差棒は標準誤差を表す。

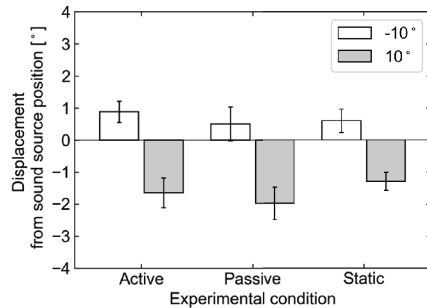


図3. 各実験条件での知覚された音像位置の変位. 誤差棒は標準誤差を表す。

修士学位論文要約（令和5年3月）

組合せ遷移の枠組みによる点彩色の最適化に関する研究

柳澤 佑介

指導教員: 周 暁 学位論文指導教員: 田村 祐馬

Optimization of Vertex-Coloring Under the Reconfiguration Framework

Yusuke YANAGISAWA

Supervisor: Xiao ZHOU Research Advisor: Yuma TAMURA

The framework of combinatorial reconfiguration has been extensively studied in the field of theoretical computer science. Recently, optimization variants of reconfiguration problems were introduced to resolve difficulties in the original framework. In this thesis, we deal with the optimization variant of two coloring reconfiguration problems, namely OPT-COLORING RECONFIGURATION and OPT-LIST COLORING RECONFIGURATION. We first obtain a complexity dichotomy for OPT-COLORING RECONFIGURATION with respect to the degeneracy of a graph and the number of colors. In OPT-LIST COLORING RECONFIGURATION, we give FPT algorithms and hardness results from the viewpoint of structural parameters.

1. はじめに

遷移問題³⁾とは、問題の現在の実行可能解から目的の実行可能解へ、解である状態を保ちつつ段階的に変更できるかを判定する問題である。近年になり遷移問題は幅広く研究されているが、遷移問題を実社会へ応用する際には入力に目的の解を必要とする、目的の解へ遷移不可能な場合がありうる、といった課題が存在する。この課題を解決するために、**最適化遷移問題**⁴⁾が提唱された。最適化遷移問題とは、問題と現在の解が与えられた際に、現在の解から変更可能な解の中で最も良い解を求める問題である。この最適化遷移問題は、従来の遷移問題を実社会に応用する際の問題を解消している。

本論文では、**彩色の最適化遷移問題**と**リスト彩色の最適化遷移問題**について、パラメータとグラフクラスの観点から問題の計算複雑性を解析した。

2. 定義

k 彩色は、 k 個の要素からなる色集合 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ に対して隣接する 2 頂点が異なる色になるような色の割当である。

グラフ G 、各頂点に対する色のリスト関数 $L : V(G) \rightarrow 2^C$ に対して、グラフ G の各頂点の色がリスト $L(v)$ から割り当てられているような彩色を**リスト彩色**と呼ぶ。特に、高々 p 色を用いたリスト彩色を**リスト p 彩色**と呼ぶ。2つの k 彩色 f, f' に対し、1つの頂点の色を変更しながら k 彩色を得ることを繰り返して f から f' に変更できるとき、2つの k 彩色は**遷移可能**であると呼ぶ。彩色の最適化遷移問題は、グラフ G における k 彩色 f_0 が与えられた際に、 f_0

から遷移可能な k 彩色のうち最も色数が少ないものの彩色数を出力する問題である。

リスト彩色の最適化遷移問題は、グラフ G におけるリスト彩色と整数 p が与えられた際に、 f_0 から遷移可能なリスト p 彩色が存在するか否かを判定する問題である。

3. 本論文の結果

本論文では彩色の最適化遷移問題とリスト彩色の最適化遷移問題について、グラフの構造的パラメータとグラフクラスに着目して計算複雑性の解析を行った。紙面の都合上、一部結果の証明は省略している。

3.1 彩色の最適化遷移問題

3.1.1 計算困難性

定理 1 彩色の最適化遷移問題は、色数 k が 4 以上の場合に縮退数が 3 かつ最大次数が 4 の平面グラフに対しても NP 困難である。

略証. Erickson の帰着²⁾を基に、NP 完全であることが知られている、3-SAT からの多項式時間帰着を与えた。また、ガジェットを用いることで、縮退数 3 かつ最大次数 4 である平面グラフに変換した。□

3.1.2 計算容易性

定理 2 入力グラフの色数 k が 3 以下の場合に彩色の最適化遷移問題に対する線形時間アルゴリズムが存在する。

略証. 彩色遷移問題に帰着する。彩色遷移問題は線形時間で解けるため⁵⁾、本問題は線形時間で解ける。□

定理 3 入力グラフの縮退数 d が 2 以下の場合に彩色の最適化遷移問題に対する線形時間アルゴリズムが存在する。

略証. $k \leq 3$ の場合は定理 2 より, 本問題は線形時間で解けるため, $k \geq 4$ と仮定する. このとき, $k \geq d + 2$ となるため, 任意の彩色は互いに遷移できる¹⁾. したがって, 入力グラフ G の最小の彩色数を出力すればよい. ここで, $\chi(G) \leq d + 1$ が知られているため, $\chi(G) \leq 3$ である. $\chi(G) \leq 2$ であるかどうかは線形時間で判定でき, $\chi(G) > 2$ である場合は $\chi(G) = 3$ と結論付けられる. よって本問題は線形時間で解ける. \square

定理 4 弦グラフ及びコグラフに対して, 彩色の最適化遷移問題を解く線形時間アルゴリズムが存在する。

3.2 リスト彩色の最適化遷移問題

3.2.1 計算困難性

定理 5 リスト彩色の最適化遷移問題は, 各頂点のリストのサイズが 2 であるような, 辺が存在しないグラフに対しても NP 困難である。

略証. NP 完全であることが知られている, 頂点被覆問題からの多項式時間帰着を与えた. \square

定理 6 リスト彩色の最適化遷移問題は, バンド幅が定数かつパス幅が 2 であるような二部グラフに対して, 色数 k が定数であったとしても PSPACE 完全である。

略証. Wrochna の帰着⁶⁾を基に, チューリング機械からの多項式時間帰着を与えた. \square

3.2.2 計算容易性

定理 7 リスト彩色の最適化遷移問題は, パス幅が 1 であるグラフに対して, 色数 k に関する FPT アルゴリズムが存在する。

略証. 動的計画法により, 解同士の連結性を表すグラフを構築するアルゴリズムを与えた. また, これにより解が求められることを示した. \square

定理 8 リスト彩色の最適化遷移問題は, 色数 k と入力グラフの頂点被覆数 vc に関する FPT アルゴリズムが存在する。

略証. 頂点被覆集合に対する色の割当を全列挙する事で, 解同士の連結性を表すグラフを構築するアルゴリズムを与えた. また, これにより解が求められることを示した. \square

4. まとめと今後の課題

本論文では彩色の最適化遷移問題とリスト彩色の最適化遷移問題について, グラフの構造的パラメータとグラフクラスに着目して計算複雑性の解析を行った. 今後の課題としては, 彩色の最適化遷移問題においては, 二部グラフやパーフェクトグラフにおける計算複雑性の解析が挙げられる. また, NP 困難の結果が実際には NP 完全または PSPACE 完全のどちらであるかの解析が考えられる. リスト彩色の最適化遷移問題に対しては, 木に対する解析や treedepth と呼ばれるパラメータに関する解析が挙げられる。

文献

- 1) L. Cereceda, J. van den Heuvel, and M. Johnson. Connectedness of the graph of vertex-colourings. *Discrete Mathematics*, 308(5):913–919, 2008.
- 2) J. Erickson. *Algorithms*, 2019.
- 3) T. Ito, E. D. Demaine, N. J. Harvey, C. H. Papadimitriou, M. Sideri, R. Uehara, and Y. Uno. On the complexity of reconfiguration problems. *Theoretical Computer Science*, 412(12):1054–1065, 2011.
- 4) T. Ito, H. Mizuta, N. Nishimura, and A. Suzuki. Incremental optimization of independent sets under the reconfiguration framework. *Journal of Combinatorial Optimization*, 43(5):1264–1279, 2022.
- 5) M. Johnson, D. Kratsch, S. Kratsch, V. Patel, and D. Paulusma. Finding shortest paths between graph colourings. *Algorithmica*, 75:295–321, 2016.
- 6) M. Wrochna. Reconfiguration in bounded bandwidth and treedepth. *Journal of Computer and System Sciences*, 93:1–10, 2018.

修士学位論文要約（令和5年3月）

可笑しみのある音声の合成法に関する基礎的研究

渡邊 悠希

指導教員：坂本 修一

A Fundamental Study on Synthesis of Humorous Voices

Yuki WATANABE

Supervisor: Shuichi SAKAMOTO

In this study, we tried to synthesize voices that make listeners humorous. To achieve this goal, we manipulated acoustical features of voices and analyzed whether synthesized voices could induce humorous to the listeners. As a result of the experiments, the listeners feel humorous when they hear the synthesized voices with appropriate changes in F0 range, speech rate, and pause length.

1. はじめに

聞き手に可笑しさを想起する音声合成できることは、日常の様々な場面で有用であると考えられる。そこで本研究では、可笑しみのある音声の合成を目指し、笑いの性質を含ませることを試みた音声の評価・分析を行った。本稿では、笑いの性質として、「意外性」「安心・非重大性」、「間の長さ」に着目して行った実験について述べる。

2. 異なる想起感情を組み合わせた音声による可笑しみの創出

2.1 はじめに

Darwinは、笑いの関連する事象には「意外性」と「安心・非重大性」が共通していると指摘した²⁾。本実験ではこの考えに基づき、「意外性」「安心」を含ませることを試みた音声によって想起される可笑しみの程度を評価した。ここで「意外性」は、提示される情報の変化により聞き手に想起されると考え、前後半で変化が感じられるよう発話文と想起感情を設定した。

2.2 実験刺激

2.2.1 音声素材の収録

著者を含む3名の大学生を対象に、「前半と後半のつながりに意外性のある文章」を自由に発想させ、25文を得た。これらの発話文を、東北大学学友会放送研究部に所属する学生2名に3種の教示のもと発話させ、25文×3種の教示×3テイク×2名の話者＝450音声を得た。教示を表1に示す。

2.2.2 実験刺激の作成

2名の話者それぞれに対して前述のように収録した音声のうち、Separate条件の16文×1テイク＝16音声声を音声素材として使用した。これらの音声に対し、

安心を想起することを期待した変換を施した。この際に操作した音響特徴量は、これまでの実験¹⁾から安心の想起に関連すると示唆された時間長とF0の変化幅とした。これらの音響特徴量に対し、これまでの実験結果¹⁾を踏まえF0の変化幅の操作の方向が異なる2種の設定値(Type_1, Type_2)を用意した。さらに、各設定値において、操作の幅が異なる条件(安心(Δ1倍), 安心(Δ2倍))を用意した。設定値の詳細を表2に示す。実験刺激は、表2に示す操作を収録音声の前後半にそれぞれ適応することで作成した。適用した変換処理を表3に示す。なお、音声の変換には音声合成ソフトWORLD³⁾(D4C edition⁴⁾)を使用した。

2.3 実験手続き

実験では、20名の聴取者を4名もしくは6名の4つのグループに分け、各設定値の各話者の音声に割り振った。聴取者は、同一話者が発話した1文から5種の変換により生成された5つの音声における全ての組み合わせ(5C₂対＝10通り)で評価を行った。これを16文全てに対して実施したので、各聴取者あたり10回×16文＝160回の評価を行ったことになる。聴取者は、提示された音声対を聴取し、どちらの音声の方が聴取の際にクスッとする程度が大きいかを5段階(-2, -1, 0, 1, 2)で回答するよう指示された。

表1. 話者に提示した教示

教示名	教示の概要
Natural 条件	1つの文章をなるべく一息で、自然に発話してください
Separate 条件	文章中のスペースで間を取って、自然に発話してください
Laugh 条件	聞き手をクスッとさせるつもりで発話してください

表 2. 設定した想起感情と音響特徴量の操作値

設定した感情	設定値 Type.1		設定値 Type.2	
	時間長	F0 の変化幅	時間長	F0 の変化幅
平静	操作なし	操作なし	操作なし	操作なし
安心 ($\Delta 1$ 倍)	1.1 倍	1.2 倍	1.1 倍	0.8 倍
安心 ($\Delta 2$ 倍)	1.2 倍	1.4 倍	1.2 倍	0.6 倍

表 3. 生成音声に適用した変換処理の内訳

変換名	前半の操作	後半の操作
N-N	平静	平静
R(x1)-N	安心 ($\Delta 1$ 倍)	平静
R(x2)-N	安心 ($\Delta 2$ 倍)	平静
N-R(x1)	平静	安心 ($\Delta 1$ 倍)
N-R(x2)	平静	安心 ($\Delta 2$ 倍)

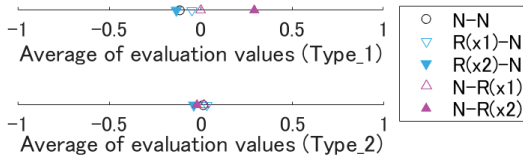


図 1. 設定値ごとに求めた各変換処理の平均評価値

2.4 実験結果

設定値ごとに各変換処理の平均評価値を求めた結果を図 1 に示す。設定値 Type.1 に注目すると、想起感情が「平静」→「安心」に変化する N-R 条件が、音響特徴量に操作を加えていない N-N 条件と比較して可笑しさを想起した程度が大きい傾向があった。

3. 間の長さを操作した音声により想起される可笑しさの程度の評価

3.1 はじめに

2.2.1 項で説明した収録音声进行分析したところ、Laugh 条件における間の長さは他条件より長い傾向があった。この結果から、間の取り方は可笑しみのある話し方と関わっている可能性があると思われた。よって、これまでに作成された変換前より可笑しさを想起する音声に対し、間の長さが最適となるようさらに操作を加えることで、より大きな可笑しさを想起する音声生成が可能かを考えた。そこで本実験では、音声に含まれる間の長さで想起される可笑しさの程度との関連を調査した。

3.2 実験刺激

音声素材として、Separate 条件の 25 文 \times 1 テイク \times 2 名の話者 = 50 音声に、前章で最も可笑しさを想起する程度が大きいことが示された変換（音声の後半の時間長を 1.2 倍、F0 の変化幅を 1.4 倍にする変換）を施したものを使用した。操作可能な間の

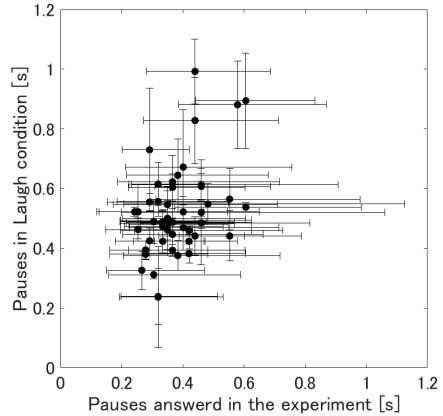


図 2. Laugh 条件の間と本実験で回答された間の散布図

長さは、2.2.1 項で説明した収録音声の分析結果を踏まえ、0.12~1.05 s の範囲で対数軸上で等間隔になるよう選択した。

3.3 実験手続き

実験には 8 名の聴取者が参加した。聴取者は、間の長さのみ異なる 7 音声聴取し、最も面白みを感じる音声を 1 つ回答するよう指示された。以上の評価を、いずれの聴取者も 25 文 \times 2 名の話者 = 50 音声に対して行った。

3.4 実験結果

聴取者に可笑しいと回答された音声の有する間の長さ、それと発話文、話者が対応する Laugh 条件の音声の有する間の長さとの散布図を図 2 に示す。これらの間の長さの相関係数は +0.45 であった。

4. 考察およびまとめ

2 章の結果から、「意外性」「安心」を含ませることを試みた音声により、聞き手に可笑しさを想起できる可能性が示唆された。また 3 章の結果から、聞き手を笑わせようとして発話された音声の有する間の長さを適用した音声によって、聞き手に実際に可笑しさを想起できる可能性が示唆された。以上から、笑いの性質を含ませることを試みた変換音声によって、変換前よりも聞き手に可笑しさを想起できる可能性が示唆された。

文献

- 1) 渡邊ら, 音講論, 2-4-1 (2022 春).
- 2) Darwin, John Murray (1872).
- 3) Morise *et al.*, *IEICE Trans. Info. Sys.*, E99-D(7), pp.1877-1884 (2016).
- 4) Morise, *Speech Comm.*, 84, pp.57-65 (2016).

修士学位論文要約（令和5年3月）

様々な速度の対象に対応可能な時空間情報に基づく移動物体検出手法

遠藤 広人

指導教員：菅沼 拓夫， 学位論文指導教員：阿部 亨

Moving Object Detection Method Based on Spatio-temporal Information for Various Speed Targets

Hiroto ENDO

Supervisor: Takuo SUGANUMA, Research Advisor: Toru ABE

Video surveillance systems can monitor a wide variety of objects. Considering the problems associated with an increase in the number of cameras, it is desirable that a single camera can be used for multiple monitoring purposes. To realize such a system, a process that selectively detects objects with specific movement speeds is effective. However, conventional velocity estimation methods lose estimation accuracy due to apparent changes other than movement, such as illumination changes, and then they cannot be used to select the object. In this work, we propose a selective moving object detection method based on successive background subtraction results, which correspond to spatio-temporal information.

1. はじめに

ビデオ監視システムは様々な対象を監視可能である。しかし、監視用途ごとに専用のカメラを設置した際、運用コストの増加等が問題となるため、カメラ一台で複数の用途への対応や、その用途の切替が容易なシステムが求められる。そして、このようなシステムを実現する上では、用途ごとに対象の移動速度が大きく異なるという点から、特定の移動速度の対象を選択的に検出する処理が有効だと考えられる。

上記処理は映像中の変化の検出および変化の速度推定の2つに分けられる。前者を行う手法に背景差分があるが、背景と異なる領域を全て検出するという性質上、この手法単体では移動速度による対象の選択は困難である。また後者については画素毎の移動速度を求める手法¹⁾²⁾を利用し実現可能である。しかし、これらは映像の画素値に基づき推定を行うため、照明変化等の移動以外で見かけが変化する場合に推定精度が低下する。

そこで本研究では、時空間情報に相当する連続した背景差分結果に基づく選択的移動物体検出手法を提案する。提案手法では背景差分で検出した移動物体の境界の変化から推定した速度に基づき、特定速度の対象を選択する。これにより、移動以外での見かけの変化に頑強な速度推定を行い、安定した対象の選択が可能となる。

2. 提案

始めに、図1に示すように入力画像 $I_{(t)}$ に背景差分を適用し、順次背景差分画像 $D_{(t)}$ を生成する。

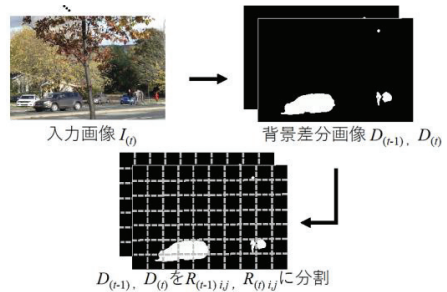


図1：入力画像に対する前処理の流れ

その後、 $D_{(t-1)}$ と $D_{(t)}$ をそれぞれ正方形の矩形 $R_{(t-1)ij}$ および $R_{(t)ij}$ に分割する。その後、両矩形が移動物体境界を含むまで拡大させる。

次に、図2のように $R_{(t-1)ij}$ と $R_{(t)ij}$ で移動物体の有無が異なり面積が S_{ij} 変化する領域、およびそれを近似した直線のうち図3(左)のようにその領域と重なる線分 b を求める。図3(右)のようにこの b が V 移動し通過した領域の面積 S'_{ij} と S_{ij} の差が小さい場合、 V を物体の速度と推定できる。以上の議論を基に、式(1)の E が最小となる V を求め、これを移動物体の速度として求める。

$$E = \sum_{R_{(t)ij} \in C} w_{i,j} (S'_{i,j} - S_{i,j})^2 \quad (1)$$

ここで、 C は1つの移動物体の周囲に位置し、その境界を含む $R_{(t)ij}$ の集合である。また、 V は重み w_{ij} を M 推定により更新しつつ反復的に推定する。その後、得られた V を利用し、背景差分で検出された全移動物体の中から特定速度のものを対象として選択する。

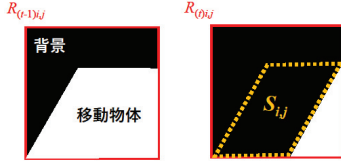


図 2：移動物体の有無が異なる領域(点線)

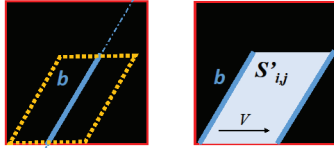


図 3：線分 b(左)および b の通過領域(右)

3. 実験

3.1. 速度推定精度の評価

提案手法の速度推定精度を評価する上で、様々な状況を再現した映像中の移動物体の速度推定を行った。なお評価指標には、映像中の各フレームでの移動物体の推定速度と実際の速度との誤差の二乗平均平方根誤差 RMSE を用いた。

本稿では、図 4 のように照明条件が異なる映像 1, 2, 3 における車の速度推定精度を評価した実験の内容および結果を示す。本実験ではこれらを背景差分した映像を用い提案手法による速度推定を行った。また、比較手法として、車領域中の各画素の速度(既存手法 TVL1¹⁾, DeepFlow²⁾より計算)の平均値を車の速度として求め、提案手法との RMSE の比較を行った。

実験結果を表 1 に示す。提案手法では映像によって RMSE は大きく変化しなかった。これは背景差分により照明変化の影響を考慮し、正しく車領域を検出できたためである。一方、比較手法は映像 2, 3 で RMSE が増大した。以上より移動以外の見かけの変化が生じる状況では、速度推定精度

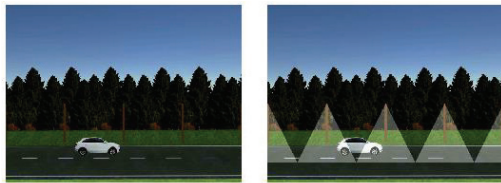


図 4：照明条件の異なる映像の 1 フレーム

表 1：映像 1, 2, 3 における各手法の RMSE[画素/frame]

	提案手法	TVL1	DeepFlow
映像 1	0.58	0.91	0.51
映像 2	0.57	5.52	3.38
映像 3	0.56	10.15	2.13

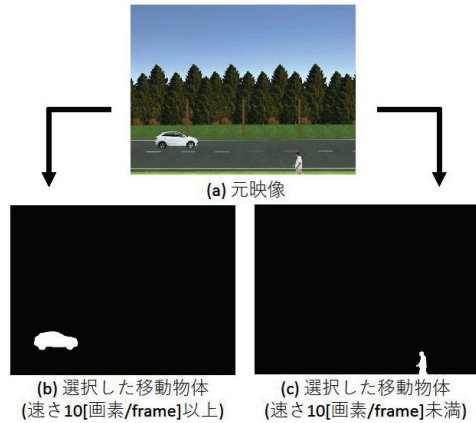


図 5：人・車が移動する映像およびその背景差分映像から移動物体を選択した映像の 1 フレーム

の点で提案手法の方が優位だと考えられる。

一方、照明以外の条件を変更し、提案手法によって映像中の移動物体の速度を推定する実験を行ったところ、物体の形状、速さ、移動方向、および移動物体領域の欠損の大きさ等によっては RMSE が増大することが分かった。

3.2. 移動速度に基づく対象の選択的検出

図 5(a)のように、人および車がそれぞれ速さ 5, 15[画素/frame]で移動する映像を用意した。これに背景差分を適用した後、提案手法で求めた速さが 10[画素/frame]以上かそれ未満かで移動物体領域を選択したところ、図 5(b), (c)のようになった。各映像では、それぞれ車および人のみが移動物体領域として残っていることが確認でき、提案手法で求めた推定速度から対象を選択的に検出可能であると考えられる。

4. 結論

本研究では、連続した背景差分結果に基づく選択的移動物体検出手法を提案した。実験結果から、移動以外の見かけの変化が生じる状況における提案手法の有効性および提案手法による選択的移動物体検出の実現性を示した。今後の課題として、物体の形状や速さ等の変化によって生じる、提案手法の推定速度の誤差の低減が挙げられる。

文献

- 1) J. Sanchez, et al. “TV-L1 Optical Flow Estimation”, Image Processing On Line 3, pp.137-150, 2013.
- 2) P. Weinzaepfel, et al. “DeepFlow: Large Displacement Optical Flow with Deep Matching”, 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, pp.1385-1392, 2013.

修士学位論文要約（令和5年3月）

ベイズ最適化を用いた量子化学計算における Domain Folding アルゴリズムの拡張

川島 祐輝

指導教員：田中 和之，学位論文指導教員：大関 真之，奥山 真佳

Extension of Domain Folding Algorithm for Quantum Chemical Calculations Using Bayesian Optimization

Yuki KAWASHIMA

Supervisor: Kazuyuki TANAKA, Research Advisor: Masayuki OHZEKI, Manaka OKUYAMA

In this paper, QMF and QCC energies for small molecules are calculated using the Domain Folding¹⁾ algorithm. The QMF and QCC energies are obtained by optimizing a sum-of-products system of trigonometric functions. However, these energy functions have many extreme values, making it difficult to obtain a globally optimal solution by a simple gradient method. Domain Folding, which simplifies the optimization of continuous variables by providing auxiliary discrete variables to the trigonometric functions, was used, but since this method requires optimization of discrete variables, we used Simulated Annealing (SA) and Bayesian Optimization in Combinatorial Structures²⁾ (BOCS). The results show that the success probability of global optimization per successive optimization is improved by using Domain Folding for the QMF and QCC energies of LiH and the QMF energy of H₂O. In addition, BOCS outperforms SA when the dimensionality of discrete variables is small, and the effectiveness of Bayesian methods in the ground truth energy search problem is demonstrated. On the other hand, for H₂O QCC energy, the optimization performance deteriorated with the use of Domain Folding, leaving the problem of the problem dependence of Domain Folding and the computational complexity required for discrete optimization to be solved.

1. はじめに

ある原子系の化学的性質を知るためには電子に関する時間に依存しないシュレーディンガー方程式を解けばよく、この操作のことを一般に量子化学計算と呼ぶ。量子化学計算は主に材料や創薬の場での応用が期待されるが、電子シュレーディンガー方程式を解析的に解くことができるのは水素原子のような一つの原子核と一つの電子からなる原子系のみであり、他の多くの場合では数値的な近似アルゴリズムが必要である。

Genin らは量子ビット結合クラスター (Qubit Coupled Cluster, QCC)法で定式化した分子の基底エネルギーを求める新しいアルゴリズム, Domain Folding を提案した。このアルゴリズムでは組合せ最適化手法の量子アニーリング (Quantum Annealing, QA)を用いることを動機として、分子の基底エネルギー探索問題を離散・連続混合最適化問題に置き換えることで得られる解が改善されることを示した。本研究では Domain Folding における離散変数の最適化にベイズ推定を用いることを検討し、その他手法との比較を行う。

2. LiH における QCC エネルギーの最適化

LiH における QCC エネルギーを Domain Folding を用いて最適化した結果を図 1 に示した。(x, x)は Domain Folding のレベルを表し、(0, 0) は Domain Folding を行わない場合の結果である。また、図中の数値は最適化の収束に要したステップ数の平均であり、グラフの濃い部分は 1 ステップあたりの大域的最適化の成功確率を示している。よって、(3, 1)では全ての離散最適化手法において Domain Folding を用いることで大域的最適化の成功確率が向上していたことが分かった。離散最適化手法を比較すると Domain Folding のレベルが(3, 1)では

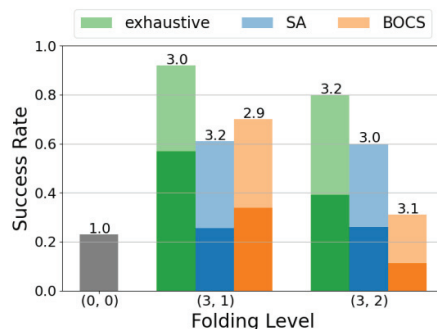


図 1 LiH における QCC エネルギーの大域的最適化の成功確率

BOCS が SA より優れた結果を示した。これは、図 2 のように BOCS は SA より優れた解を与えることの原因と考えられる。一方で、(3, 2) では BOCS の性能が大きく悪化した。これは、離散変数の次元が大きくなったことで BOCS に十分な探索回数を与えられなかったことが原因と考えられ、探索回数が小さい場合においては SA のような確率的なアルゴリズムに優位性があることが分かった。

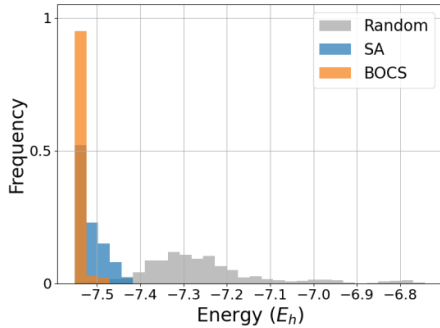


図 2 LiH における QCC エネルギーの分布

3. H₂O における QCC エネルギーの最適化

H₂O における QCC エネルギーを Domain Folding を用いて最適化した結果を図 3 に示した。図 3 ではいずれの最適化手法を用いても 1 ステップあたりの大域的最適化の成功確率は Domain Folding を行わない場合よりも低くなっていた。これは、離散変数の最適化で良い解が得られなかったことが原因と考えられ、この結果から H₂O における QCC エネルギーの最適化では Domain Folding を用いる優位性は見られなかった。また、離散最適化で得られるエネルギーの分布を図 4 に示した。図 4 より BOCS と SA の両方が離散変数の大域的最適化に失敗するケースが多く見られた。よって、離散最適化の性能を向上させることが基底エネルギーを得るために重要だといえるが、離散変数の次元に対して十分に大域

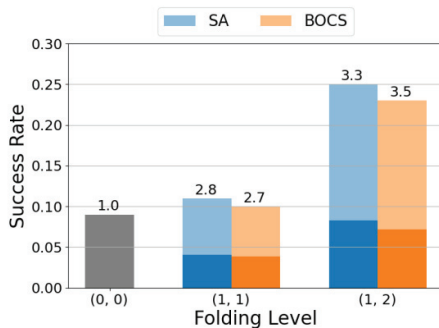


図 3 H₂O における QCC エネルギーの大域的最適化の成功確率

的最適化が可能な探索回数は未知数である。

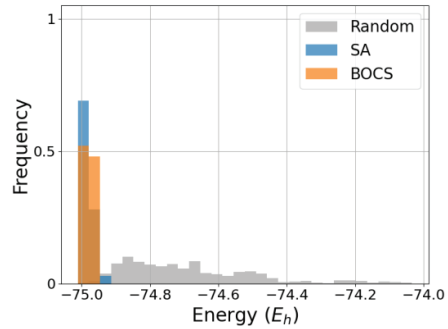


図 4 H₂O における QCC エネルギーの分布

4. まとめ

LiH の QMF エネルギー・QCC エネルギーおよび H₂O の QMF エネルギーにおいて Domain Folding を用いることで大域的最適化の成功確率が向上することを示した。また、離散変数の次元が小さい場合には BOCS が SA を上回る性能を示し、基底エネルギー探索問題におけるペイズ的手法の有効性を明らかにした。一方で、H₂O の QCC エネルギーでは Domain Folding を用いることで最適化の性能が悪化する結果となり、Domain Folding の問題依存性や離散最適化に必要な計算量に課題を残すことになった。

文献

- 1) S. N. Genin, I. G. Ryabinkin, and A. F. Izmaylov, Quantum chemistry on quantum annealers, arXiv preprint arXiv:1901.04715 (2019).
- 2) R. Baptista and M. Poloczek, Bayesian optimization of combinatorial structures, in International Conference on Machine Learning, pp. 462–471 (PMLR, 2018)

修士学位論文要約（令和5年3月）

デジタルツインの概念に基づくインテリアデザイン支援システムに関する研究

曾根 悠生

指導教員：菅沼 拓夫

Research on Interior Design System Based on the Concept of Digital Twin

Yuki SONE

Supervisor: Takuo SUGANUMA

AR and VR are being actively used in interior design. AR and VR make it easier to understand in advance how furniture is arranged and how a property will look, as well as to design spaces. However, there are issues in interior design support using AR and VR, such as operability issues and the visual and sensory gap between reality and virtuality. In this study, we introduce the concept of digital twin and propose an interior design support system that combines AR and VR to strengthen the linkage between reality and virtual space. Then we verified the effectiveness of the proposed method by conducting evaluation experiments using a combined AR and VR system.

1. 序論

AR や VR 技術の利用ケースが増加してきており、特にインテリアデザイン分野では、活発な利用が行われている。AR や VR アプリケーションを利用することで、家具を配置した様子や物件の様子を事前に把握したり、空間のデザインをしたりすることが容易になる。しかし、AR を用いたインテリアデザイン支援では、家具を含めた部屋全体の確認や家具配置のために頻繁な移動が必要である。VR の場合は実際の環境との見た目や感覚、配置位置のギャップが生じることがある。

このように AR や VR を用いたインテリアデザイン支援には課題が存在する。そこで本研究では、デジタルツインの概念を導入し、AR と VR を併用し、現実空間と仮想空間の連携を強化したインテリアデザイン支援システムを提案する。

2. 関連研究

2.1 AR と VR を利用したシステム

AR と VR の両方を用いる研究として、AR、VR による複数の視点を提示し作業支援を行うことで、前章で述べたそれぞれの課題を解決するアプローチがある。この複数の視点には、一人称視点、3D モデルを利用した VR 空間の視点、ローカルユーザーおよび作業空間の様子を映したカメラ視点が含まれる。これらの複数の視点により、作業効率向上の効果得られている。具体的には、AR と VR を組み合わせによる補助視点や複数の視点により全体の把握や配置のしやすさが向上することがわかった。しかし、複数のデバイスが必要であることが課題として挙げられる。

2.2 デジタルツイン

本研究では部屋内、テーブル上、手元といった半径 1m ～ 数 m 程度の局所的な空間に範囲を限定したデジタルツインを局所空間デジタルツインと定義する。図 1 のようにカメラの映像やセンサ、行動記録とその結果などの現実空間の情報を基に、仮想空間内に局所空間デジタルツインモデルを作成する。そして、解析処理を行うことによって、ユーザーに対してのフィードバック情報を生成・AR や VR 等で提供する。本研究ではこのような局所空間デジタルツインの概念をインテリアデザインシステムに導入する。

3. 提案

本研究では AR と VR を併用した仮想家具配置操作・表示機能を持つインテリアデザインシステムを提案する。本システムでは事前に LiDAR によるスキャ

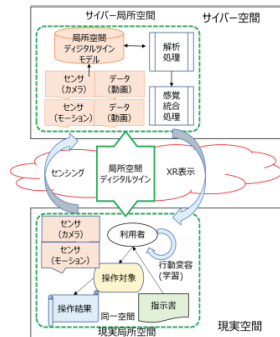


図 1：局所空間デジタルツインに基づくシステムの構成

ンを行い、3Dモデルを含むデジタルツインモデルを作成する。このモデルを利用し、図2のような3つのモードによる仮想オブジェクトの配置操作・表示機能を実装した。ARモードは実際の環境の映像に仮想家具を表示・操作するモードである。VRモードは作成した部屋の3Dモデルから構成される仮想空間上を移動しながら家具の配置操作を行うモードである。AR+VRモードは、ARモードと基本的には同じであるが、画面上にスキャンにより作成した部屋の小さな3Dモデルが表示されており、部屋を俯瞰的に見ながら操作を行うことができる。ユーザーは画面上のボタンをタップすることでモードの切り替えや仮想オブジェクトの生成を行う。仮想オブジェクトの位置情報はすべてのモードで共有され、あるモードで配置した仮想オブジェクトは他のモードにおいても同じ位置に表示される。ユーザーは複数のモードを自由に変更しながら仮想オブジェクトの配置を行うことが可能である。VRモードとARモードを利用することで簡易的な遠隔でのデザインを行うことができる。

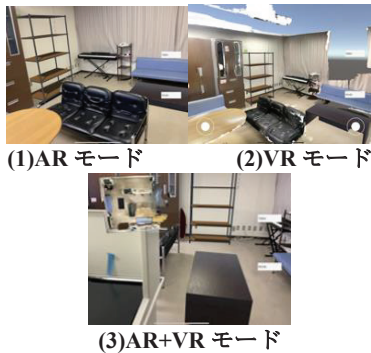


図2：本システムの3つのモード

4. 実験と評価

4.1 実験

ARとVRを併用した仮想家具の配置操作・表示機能を持つシステムについての評価を行うために、実装したアプリケーションを利用し実験を行った。

実験1ではレイアウト通りに仮想オブジェクトを配置するタスクを各モードの場合について行った。実験2では実験1と同様のタスクを複数モード併用した場合について検証した。それぞれの実験終了後、配置のしやすさや位置の把握のしやすさなどについてのユーザー評価アンケートを行った。

4.2 評価

実験1の結果を図3、実験2の結果を表1に示す。なお実験2のアンケートの内容は以下の3つ

どのモードが作業しやすいか

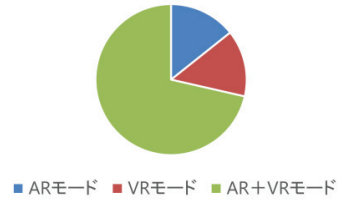


図3：実験1の結果

表1：実験2のアンケート結果

質問	評価					加重平均
	1	2	3	4	5	
(1.)	0	0	1	3	3	4.29
(2.)	0	0	0	3	4	4.57
(3.)	0	0	0	3	4	4.57

である。

- あるモードで配置したオブジェクトは他のモードでも同じ位置に配置されたか
- 単一のモードのみより作業をしやすいか
- 複数のモードを併用することが有効であると感じるか

図3に示す通り、AR+VRモードの評価が最も高く、

直視的な操作と俯瞰的な視点による操作が影響していると考えられる。また表1に示す通り、複数のモードの使用が有効であると考え人が多いことが分かった。以上のことからARとVRを併用することで単一の場合よりも作業体験を向上させることができると考えられる。

5. 結論

本研究ではデジタルツインの概念を導入し、ARとVRを併用したインテリアデザイン支援システムを提案した。実験によりARとVRを併用することで作業の体験を向上させることがわかった。今後の課題としては、複数人によるリアルタイムな協同作業システムや、デジタルツインモデル解析による、家具・配置推薦機などの高度なインテリアデザインシステムの機能実現が挙げられる。

参考文献

- Fages, A., Fleury, C. and Tsandilas, T.: Understanding Multi-View Collaboration between Augmented Reality and Remote Desktop Users, Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction, Vol. 6, No. CSCW2, pp. 1-27 (2022).

修士学位論文要約（令和5年3月）

入力系列の時間構造に対する時空間学習則のシナプス結合重み空間について

熊谷太翼

指導教員：堀尾喜彦

Effects of temporal structure in input series on synaptic weight space formed through spatio-temporal learning rule

Daisuke KUMAGAI

Supervisor: Yoshihiko HORIO

In this study, I examined the effects of temporal structure in input series on synaptic weight space formed through spatio-temporal learning rule. First, I focused on the the Hamming distance between random input patterns and the dimension N of input vectors. The results showed that the distribution of synaptic weights was multimodal, regardless of N , and the most significant multimodality was observed with a Hamming distance of roughly 10% of N . These findings suggest that the spatio-temporal learning rule is sensitive to similar but slightly different data and network can effectively learns. Next, I used a MNIST dataset as input and found that output patterns were well separated because the averaged Hamming distance between was 0.417. It has been confirmed that a high recognition capability can be obtained using spatio-temporal learning rule.

1. はじめに

人間の脳における海馬では、空間情報や時間情報を学習するために、時空間学習則¹⁾と呼ばれる学習則で学習していることが分かっている。従来法であるヘブ則²⁾はパターン分離能力が低い一方で、時空間学習則は似た入力に敏感でパターン分離能力が高いという相反する特徴を持っていることが分かっている³⁾。このような特徴は、生理学的な実験によって確認された後、シミュレーションによって実際に異なる働きをしていることが確認されたが、それらのシミュレーションはとて限られた条件下でしか確認されておらず、実世界に対応したタスクに対しても同様な特徴を示すのかはわかっていない。そこで、本研究では、時空間学習則における特徴が、より拡張された条件下や、MNIST データセットを用いた画像認識でもパターン分離能力が高いという特徴が現れるのか調べた。

2. 時空間学習則とシミュレーション方法

まず始めに、本研究の全体を通して行うシミュレーションの方法について説明する。使用したニューロンモデルは図1のようなものを使用し、図2のような単純な一層のネットワークアーキテクチャを用いた。

次に、入力として時空間パターンというものを使用した。時空間パターンは、空間パターンを時系列に並べることで構成されている。この空間パターンは要素数 N で”1”と”0”がランダムで同じ数になるように生成される。また、この時それぞれの空間パターンは一

定のハミング距離になるように設定されている。このような時空間パターンに対して、同じ文脈・異なる文脈の2つのパターンを入力として用意する。同じ文脈は、同じ空間パターンを時系列に並べたもの(例. A A A A A)で、一方で異なる文脈は異なる空間パターンを並べたもの(例. A B C D E)である。このような2つの入力パターンを用意して、シミュレーションを行った。

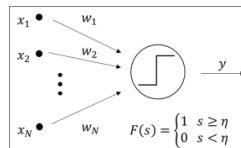


図1 ニューロンモデル

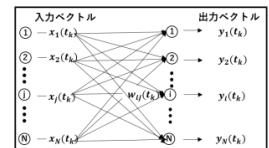


図2 ネットワーク構造

3. ネットワークサイズとハミング距離の影響

図3に入力パターンのサイズ N に対する荷重値分布をヒストグラムにしたもののエントロピーの変化を示した。この時、それぞれのネットワークに対して、入力パターン間のハミング距離が 5%, 10%, 15%のデータをそれぞれ入力した。このエントロピーは、学習後の荷重値分布をヒストグラムにした時の分布に対しての多峰性の多寡を比較するため導入した。この多峰性というものが現れることが時空間学習則の特徴で、異なる入力パターンを入力していることを認識できているということが分かる。

この結果から、同じ文脈、異なる文脈ともに常にヘブ則よりも時空間学習則の方が上回っていることが

分かる。また、時空間学習則は、ネットワークサイズの大きさに関わらず多峰性が出ていることから、どんな大きさのネットワークサイズでも入力パターンを認識できているということが分かる。さらに、ハミング距離が N の 10%程度で最も多峰性が出ていることも分かる。したがって、常に時空間学習則の方がより多くの情報を学習し、似ているが微妙に異なる入力パターンに対して最も敏感に反応し、多峰性が出るということが分かる。

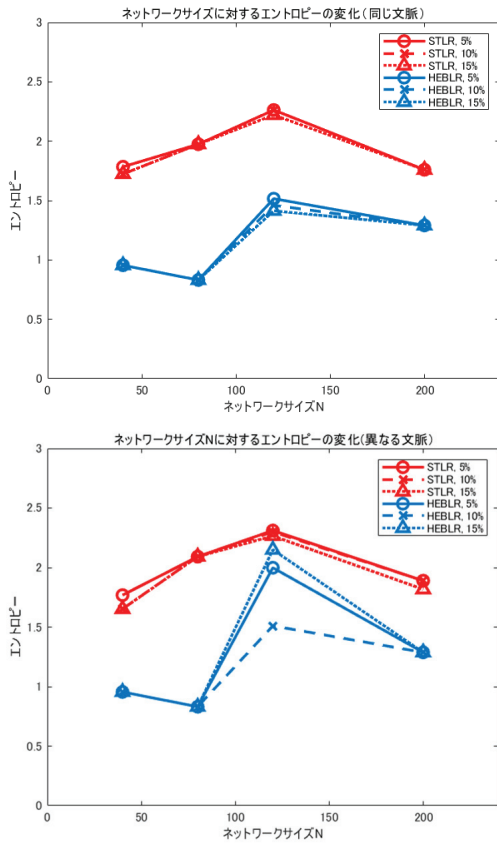


図3 ネットワークサイズに対するエントロピーの変化

4. 時空間学習則を用いた画像データの認識

次に、入力の空間パターンをMNISTデータに置き換えることで手書き文字に拡張した場合でも、同じような傾向が確認され、文字を認識できているかどうかを調べた。この時、この時、同じ数字(しかし、異なる画像データ)を5回入力した場合と、“0”から“8”までの違う文字をランダムに4回入力し最後に“9”を入力するというシミュレーションをそれぞれ行った。これらは、これまでのシミュレーションの同じ文脈は、異なる文脈と対応している。そのように拡張してシミュレーションした結果、図4のようになった。図4で示している

通り、同じ文脈の場合、概ねすべて多峰性が現れている。しかし、複雑な形状の数字(5,6)や画像ごとに角度にばらつきがある数字(7,9)はあまり多峰性が出ていないという結果となっている。また、異なる文脈の場合はそれぞれの入力ごとに多峰性にばらつきがあるため、一概に学習ができているかどうかはわからないと推測される。

最後に各数字を入力したネットワークがその数字を認識できているかどうかを確認するために出力パターン間のハミング距離を測定し、その平均ハミング距離を算出した結果、0.417という結果となった。ハミング距離が1の時はビットを反転しただけで異なると認識できているとは言えないため、ハミング距離が0.5の時最も異なる情報を持っていると考えることができる。したがって、今回シミュレーションしたネットワークでは各数字を認識できていると考えることができる。

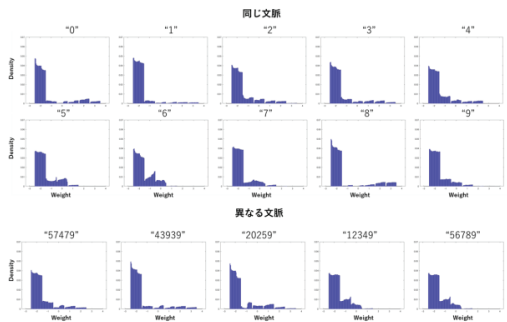


図4 MNIST データセットを学習した後の荷重値分布

5. まとめ

時空間学習則のシナプス結合重み空間に対して、入力系列の時間構造がどのような影響があるのかを研究し、時空間学習則はネットワークサイズの大きさに関わらず多峰性が現れ、似ているが微妙に異なるデータに対して敏感に反応し学習するということが分かった。さらに、入力パターンを画像データに拡張した場合でも5枚という少ない入力データ、少ない計算時間でも同様に学習認識できることが明らかになった。

文献

- 1) Tsukada, M., Aihara, T., Saito, H.: Hippocampal LTP depends on spatial and temporal correlation of inputs. *Neural Networks*, 9, 1357-1365, 1996
- 2) Hebb, D. O. *The Organization of Behavior; A Neuropsychological Theory*, Oxford: Wiley, 1949.
- 3) Tsukada, H., Tsukada, M.: Comparison of Pattern Discrimination Mechanisms of Hebbian and Spatiotemporal Learning Rules in Self-Organization, *Front. Syst. Neurosci.*, 15, 2021.

修士学位論文要約（令和5年3月）

マルチエージェントに基づく学習データ流通基盤に関する研究

本田 光来

指導教員：菅沼 拓夫

A Study on Multi-agent Based Learning Data Sharing Infrastructure

Miku HONDA

Supervisor: Takuo SUGANUMA

The trend towards conducting online classes in schools has led to the widespread use of Learning Management Systems (LMS) and Learning Analytics (LA) to distribute e-learning materials and visualize and analyze learning data. However, the sensitive nature of the data requires privacy considerations, and the current control over public disclosure of learning data is inflexible, which can lead to unnecessary data collection and misuse by third parties. To address these issues, a new framework for data circulation is needed to collect and circulate learning data while respecting the intentions of students and taking privacy into consideration. The proposed platform is based on multi-agents, focusing on automatic negotiation for disclosure level adjustment of learning data and the concept of Human-in-the-loop to improve the convenience of learners.

1. はじめに

教育 DX の一環として、各種学校においてオンライン上で授業を実施する動きがますます活発化してきている。e-learning 用学習教材を配信する Learning Management System(LMS)が一般的に利用されている。また、LMS に蓄積されている学習データを可視化および解析する Learning Analytics(LA)が普及してきている。しかし、LA に用いられる学習データは、基本的に個人情報を含む機微な情報であるため、プライバシーに配慮しつつ有効活用を図る必要があるが、学習データの公開制御の柔軟性の観点では、現状では画一的・固定的であり、学習者の意図に反して不必要に収集され、第三者にデータが悪用される可能性も指摘されている。また逆に、効果的な学習活動支援に必要な学習データが自由に利用できないなどの課題もある。したがって、学生が安全・安心に LA の恩恵を享受するためには、学生自身の意思を尊重してプライバシーに配慮しつつ、より少ない負担で大量の学習データを効果的に収集・流通して LA に活用する、データ流通のための新しい枠組みが必要である。本研究では上記の課題に対し、学習データの開示度調整のための自動交渉と、Human-in-the-loop の概念による学習者の利便性向上を中核とした、マルチエージェントに基づく学習データ流通基盤を提案する。

2. 関連研究と課題

利益が競合する複数主体間の交渉において合意形

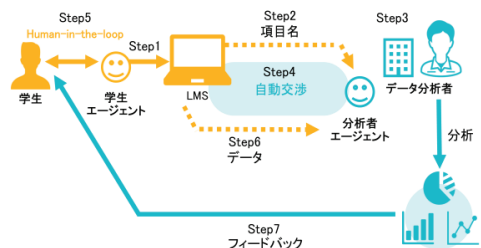


図1 提案手法の概要

成を行う手法の1つであるソフトウェアエージェントを用いた自動交渉を、学生とデータ分析者間のデータ開示度決定に関する交渉に適用することを考える。自動交渉を用いてスマートフォン上のデータに対するアクセス権限を動的に変更する手法[1]が提案されている。この研究では、エージェントは交渉履歴からユーザーの嗜好を推測し、ユーザーに対して、より有益な提案を行い、ユーザーの負担を最小限に抑え、作業負担を減らすことを可能とした。しかし、実データを用いた評価実験では、ユーザーがエージェントの存在を認知していないことが要因で、エージェントの有無によるユーザーの作業負担が変化しない結果となった。したがって、ユーザーがエージェントの存在を意識し、協調するための機構が求められる。ソフトウェアエージェント分野の研究において、人間の意思の不確実性を考慮した Human-in-the-loop(HITL)の概念が注目されている。そこで、コンピュータインタラクションやスマートフォンから取得されるデータを用いて、ユーザーの介入可能性を検

討した研究がある[2]. この研究では、データから機械学習を用いて介入可能性を判断し、ユーザにとって適切な介入タイミングを決定している.

3. マルチエージェントに基づく学習データ流通基盤

(S1)学習データ流通基盤に向けたエージェント間自動交渉を行い、(S2) Human-in-the-loop による自動交渉の改善および学習者の負担軽減の支援が可能な手法を提案する. 図1に提案の概要を示す.

学生の代理となる学生エージェントと、分析者の代理となる分析者エージェント間で自動交渉を行う. その際、必要十分な時間内に自動交渉が収束する仕組みを設計する.

また、交渉がなかなか合意に至らず、双方の得られる利益も低くなる場合があり、その場合は、不確実な意思決定を行う可能性がある際に、学生の入力を求める. 具体的には、アクティビティデータおよび学習データの一部を機械学習の特徴量として用い、機械学習を行うことで、学生が応答可能な時間帯を推定する.

学生への介入可能性を考慮し、即時の要求が適切でないとは判断された場合には HITL 要求を延期または中止する.

4. 実験と評価

提案手法を評価するため、エージェント間自動交渉の自動交渉のプロトタイプシステムを実装し、HITL 介入によって自動交渉が改善する余地があるかを検証した. 実験では、エージェント間の自動交渉をシミュレーションで実行し、十分終了可能な計算時間となっているか確認した. また、1回の交渉ごとにかかる時間と交渉ラウンド数を測定し、エージェントの利益(効用)の結果を確認する. 図2に実験結果を示す. 20ラウンド付近から大きく平均値が変動する傾向がみられたが、全体として交渉が長引くほどにエージェントの効用は低下傾向にあることを確認した. したがって、一部の長引いた交渉に対する HITL 介入により改善する余地があると考えられる.

本実験では、学習アプリ KoToToMo Plus[3]を用いた学習中に、定期的に HITL 要求を発信する. 実験人数は5人とし、HITL 通知に対し、学習者は対応できるときに応答し、疑似 HITL タスクを行う. さらに、通知をタップした場合に、介入に対する負担度合いを5段階評価するアンケートも併せて行うことで、学習者の負担を数値化する. 本実験では単純手法として HITL 要求と同時に通知が発信される単純手法と、学習ログのうち、学習が終了したタイミングから、LMS が再度操作されるタイミングの間に介入提案手法の2パターンによる介入方法を実施した. アンケート結果を図3に示す. 介入に対する評価は、単純手法よりも提案手法がおおむね高い評価を得た. これは、

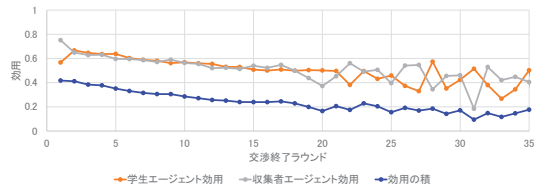


図2 交渉終了ラウンド毎の効用平均の推移

提案手法が学習単元の終了時や動画再生終了時な

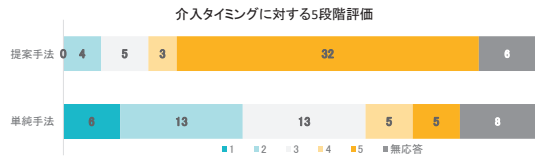


図3 介入タイミングに対するアンケート結果

どのタイミングで通知を発信したことに起因する. したがって、介入に適したタイミングとして学習が一段落したタイミングが挙げられる. また、提案手法は単純手法に比べ、平均1分43秒遅延して通知が発信された.

5. おわりに

本研究では、学習データの開示度調整のための自動交渉と、HITL の概念による学習者の利便性向上を中核とした、マルチエージェントに基づく学習データ流通基盤を提案した. 特に本研究では、学生とエージェント間の HITL に着目し、学生に負担をかけずに円滑にデータ共有を実現する手法に関して、提案手法が有効であることを確認した.

参考文献

- [1] Tim Baarslag, Alan Alper, Richard Gomer, Muddasser Alam, Perera Charith, Enrico Gerding, et al. An automated negotiation agent for permission management. 2017.
- [2] Manuela Züger, Sebastian C Müller, André N Meyer, and Thomas Fritz. Sensing interruptibility in the office: A field study on the use of biometric and computer interaction sensors. pp. 1–14, 2018.
- [3] 趙秀敏, 富田昇, 今野文子, 朱嘉琪, 稲田忠, 大河雄一, 三石大. 第二外国語としての中国語学習のためのブレンディッドラーニングにおける e ラーニング教材設計指針の作成と実践. 教育システム情報学会誌, Vol. 31, No. 1, pp. 132–146, 2014.

修士学位論文要約（令和 5 年 3 月）

フィードバック誤差学習型 FES 制御器の適用法の簡略化に関する基礎研究

井口 俊吾

指導教員：渡邊 高志

A Basic Study on Simplification of Application Method of Feedback Error Learning FES Controller

Shungo IGUCHI

Supervisor: Takashi WATANABE

This study aimed to develop a practical controller for functional electrical stimulation (FES) for paralyzed patients to assist with activities of daily living. This study investigated an application method of a feedback error learning (FEL)-FES controller. In the previous study, large number of measurements of responses of the musculoskeletal system to electrical stimulation were required to create a musculoskeletal model. There were also physical burdens and time constraints in those measurements. Therefore, a method of simplifying the model was proposed, which was to adjust the static part using interpolation of responses to three types of ramp waveform stimulation and the dynamics part of the second-order delay transfer function with a time delay using a response of one type of step waveform stimulation. The controller trained with the model adjusted by the proposed method was tested in controlling 1-DOF movement of the elbow joint in the sagittal plane with healthy subjects. The results showed that the FEL-FES controller trained with the model using the simplified adjustment method would be effective to improve time delay caused in a closed-loop control. In the future, the closed-loop controller has to be improved for better control performance, and controlling movements in the horizontal plane and multi-joint movements should be investigated for a more practical controller.

1. はじめに

機能的電気刺激 (Functional Electrical Stimulation; FES) による麻痺肢の動作制御において、フィードバック誤差学習 (Feedback Error Learning; FEL) を利用した制御器 (FEL-FES 制御器) の研究が行われてきた^{1) 2)}。この制御器は十分に速い運動に対して時間遅れなく制御でき、制御器の調整が自動で行えるという利点がある。しかし先行研究^{1) 2)}は主に実験的検証を目的としており、制御器調整のための身体的負担・拘束時間が大きかった。そこで本研究では筋骨格モデルを利用した FEL-FES 制御器の適用法を簡略化することで、大きな負担や時間的拘束なしで十分に速い運動を実現できる FEL-FES 制御器の構築を目指した。なお、制御対象は矢状面の肘関節運動であり、上腕二頭筋と上腕三頭筋を刺激筋に選択した。

2. 筋骨格モデルを利用した FEL-FES 制御器

図 1 に本研究で使用する FEL-FES 制御器の概略を示す。開ループ制御器は 3 層の階層型ニューラルネットワーク (ANN) であり、現在時刻 n から $n+5$ までの目標角度、目標角速度、目標角加速度を入力とした (時刻刻み幅は 50ms である)。PID 制御器はアンチリセットワインドアップを搭載しており、CHR 法を用いてパラメ

タを決定した。

本研究では、筋骨格モデルでの計算機シミュレーションにより ANN の学習を行う。筋骨格モデルは、非線形静特性部と線形動特性部の 2 部で構成した (図 2)。モデルは、各刺激筋の刺激強度 (V_{Biceps} , $V_{Triceps}$) が入力されると、時間遅れが考慮された肘関節角度を算出する。静特性部は、ランプ状に上昇する刺激強度 (11 種類の組み合わせ) を印加した際の計測角度を内挿したものを別日に作成し、当日に 3 種類の組み合わせのランプ状刺激による角度を計測して調整することで作成した。動特性部は上腕二頭筋に最大強度のステップ状刺激を印加した際の計測結果を、むだ時間を含む 2 次遅れ系伝達関数で近似して作成した。このように、当日の計測を減らすことで先行研究¹⁾よりモデル調整を簡略化した。

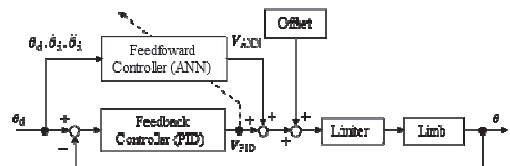


図 1 本研究で使用する FEL-FES 制御器の概略

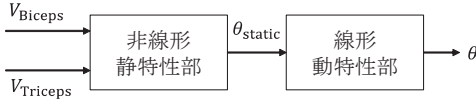


図2 本研究で用いた筋骨格モデルの構造

3. FEL-FES 制御器による追従制御実験

健常男性 5 名 (A~E) を対象とし、簡略化した筋骨格モデルを用いて学習した制御器の制御能力を評価するための実験を行った。被験者は上肢を鉛直方向に脱力した姿勢で、PID 制御器と、学習を行った ANN と PID 制御器を組み合わせた FEL-FES 制御器により、正弦波を組み合わせたランダム軌道の追従制御を行った。PID 制御器は別日に調整した。図 3 は目標値との平均絶対誤差と、時間遅れを評価するために目標値との相関係数が最も大きくなる時刻 (Est Lag) を算出したものである。図 3 より PID 制御器と比較して FEL-FES 制御器では制御誤差、時間遅れが共に良好であった。このことから簡略化したモデルでも時間遅れ補償に有効な制御器の獲得に有効であることを確認した。これは筋特性が変化した場合に、小さな負担、短時間でモデルの再作成を行い、制御器の再学習が可能であることを示唆する。

4. 簡略化モデルによる制御性能の検証

FEL-FES 制御器の性能について検証するために、健常男性 3 名 (B~D) を対象とし、周期の異なるランダム軌道 3 種類 (rdm 1~rdm 3)、正弦波軌道 3 種類 (sin 1~sin 3)、計 6 種類の目標軌道の追従制御実験を行った。使用した制御器は当日に調整した PID 制御器と当日に学習を行った ANN を組み合わせた FEL-FES 制御器である。図 4、図 5 は目標軌道ごとの平均絶対誤差と Est Lag である。図 4、図 5 より被験者 D は目標軌道間で制御精度にばらつきがなく、Est Lag の値が全目標軌道で -0.2~0.2 であり時間遅れが小さかった。一方で被験者 B はランダム軌道と正弦波軌道の結果を比較してみると、正弦波軌道の方が悪かった。さらに、正弦波軌道では Est Lag の値が -0.9~-0.6 であり時間遅れが発生していた。この結果より、簡易的なモデルで学習した FEL-FES 制御器でも幅広い種類の軌道制御が可能であることが示唆された一方で、被験者によっては正弦波のような屈曲範囲が大きい場合に制御精度が低い場合があることが確認された。

本来、むだ時間や時定数の値は刺激する筋によって異なるが、本研究では簡略化のために筋骨格モデルの動特性パラメータを上腕二頭筋、上腕三頭筋で統一した。このように簡易的な構造でも時間遅れ補償に有効だったのは、各刺激筋の時定数やむだ時間に近い値をモデルに反映できており、それを ANN が学習したためだと考える。本研究でのモデルが時間遅れ補償を可能にする ANN の

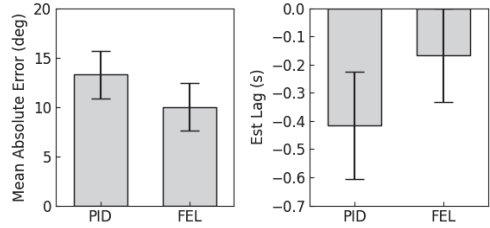


図3 2種類の制御器での平均絶対誤差と Est Lag

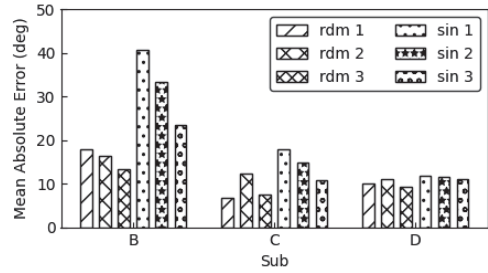


図4 異なる目標軌道での追従制御の平均絶対誤差

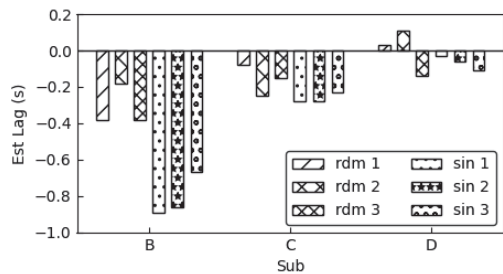


図5 異なる目標軌道での追従制御の Est Lag

学習に有効であった要因をより明確にすることで、それに応じた筋骨格モデルや ANN の改良が可能になると考えられる。

5. まとめ

FEL-FES 制御器の適用法の簡略化を検討し、簡易的なモデルでの制御器学習による時間遅れ補償の有効性を確認した。今後は、閉ループ制御器の簡便な調整による性能向上、3次元での制御、多関節制御などを検討する必要がある。

文献

- 1) K. Kurosawa, R. Futami, T. Watanabe, and N. Hoshimiya. "Joint Angle Control by FES Using Feedback Error Learning Controller." IEEE Transactions on Neural systems and Rehabilitation Engineering, Vol. 13, No. 3, pp.359-371, 2005.
- 2) Resquín, F., Gonzalez-Vargas, J., Ibáñez, J. et al. "Adaptive hybrid robotic system for rehabilitation of reaching movement after a brain injury: a usability study." Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, Vol. 14, No. 104, 2017.

修士学位論文要約（令和5年3月）

Bluetooth 電波を用いた端末装着不要な屋内位置推定に関する研究

梅原 優佑

指導教員：本間 経康

A study on indoor localization by using Bluetooth radio waves without wearing a device

Yusuke UMEHARA

Supervisor: Noriyasu HOMMA

In recent years, the demand for indoor activity measurement has been grown to continuously monitor the elderly people and to quantitatively understand daily physical activities. In this study, we propose a new device-free indoor localization system by using ambient radio waves from home electronics. The proposed system estimates the location of a person by machine learning techniques that utilize the person-location-derived fluctuations in Bluetooth radio wave strength. The proposed system does not need any special transmission/reception procedures. To ease the data acquisition effort for training the proposed system, we also adopted a robot equipped with a radio wave absorber to emulate the changes in the person-location-derived radio wave fluctuations. The experimental results with human subjects suggested that the feasibility of indoor localization of sub-meter accuracy by the proposed system. It is thus expected that the proposed system with further improvement in the localization performance will be helpful for realizing the continuous measurement of indoor activities without wearing of devices.

1. はじめに

近年、高齢者の見守りや日常生活における健康管理に向けた屋内活動の継続的な計測への需要が高まっている。長期間における端末の装着や保持は煩わしさや付け忘れを伴うため、継続的な計測には非接触な手法が望まれる。その1つとして、Wi-Fiなど屋内の無線通信機器が発する電波に着目し人の動きや位置変化に伴う電波変動を利用して活動推定を行う手法が研究・開発されている。屋内無線通信のうち Bluetooth は普及の進む IoT 家電など一般家庭内に発信源が多く存在する。このため、Bluetooth 電波を活用することで、大掛かりな機器導入なしに複数発信源からの電波変動特徴を用いた効果的な活動推定の実現が期待される。これまでに Bluetooth 電波を用いることで、非接触に屋内の人の位置や活動を推定できる可能性が示唆されている¹⁾²⁾。しかし、送受信端末の設置や送受信方式が特殊であるという課題や電波変動から位置を推定するための学習データ取得に労力がかかるといった課題¹⁾、屋内活動の把握において重要な情報の1つである「位置」を取り扱うことができていないといった課題²⁾などが存在していた。

本研究では、屋内に既設の Bluetooth 端末が発する電波を活用し、端末の装着・保持なしに人の屋内位置を推定する手法を提案する。本手法では、既設端末を活用するため特別な送受信方式を用いず、ま

た、位置推定モデル構築のための学習データ取得に電波吸収体を搭載したロボットを用いることでシステムの構築・導入の容易さの向上を図る。

2. 提案手法

提案手法による位置推定モデル構築の流れを図1に示す。提案手法では、学習データ取得の労力を低減するため、電波吸収体を搭載したロボットを用いて人の位置変化を模擬し、それに伴い変動する電波を取得する。受信電波から復調により送信端末を特定し、各送信端末の受信電波強度(Received Signal Strength Indication: RSSI)を算出する。特徴量として、時間窓ごとの RSSI の平均値を各サンプル、特徴量軸方向に標準化したものを用いる。得られた特徴量から x 座標と y 座標をそれぞれ推定するモデルを構築する。推定モデルには回帰モデルである多重線形回帰(Multiple Liner Regression: MLR)、主成分回帰(Principal Component Regression: PCR)、ランダムフォレスト(Random Forest: RF)、ニューラルネット

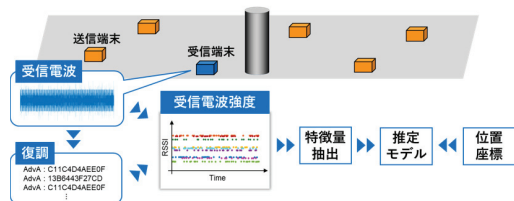


図1 位置推定モデル構築の流れ

トワーク (Neural Network: NN) を用いた。以上のようにロボットで取得したデータに基づき位置推定モデルを構築した後、人が立った状態での電波から得られた特徴量を推定モデルに入力することで人の屋内位置推定を行う。

3. 実験1: 屋内位置推定の基礎検証

提案手法を用いた屋内位置推定の基礎検証を目的とし、ロボットで取得したデータで推定モデルを構築し、ロボットで取得した別データによる検証と人で取得したデータによるテストを行った。実験環境を図2に示す。基礎検証を行うにあたり2.0 m×2.0 mの測定範囲を設定し、送信端末9台を50 cm 間隔でランダムに配置した。データを取得する際は、ロボットまたは人が静止と移動を測定範囲内で繰り返し、静止時20秒間のRSSIから算出された特徴量をその位置のデータとして抽出した。ロボットでは学習・検証用に5時間(計339箇所)、人(被験者1名)ではテスト用に1時間半(91箇所)のデータを取得した。

5分割交差検証により得られた距離誤差平均値を図3に示す。ロボットデータでの検証では43.0±25.0~75.6±36.7 cm, 人データによるテストでは45.1±29.7~71.0±33.1 cmとロボットと人どちらも同程度の位置推定精度となった。位置推定誤差が最小となった推定器はRFであり、人データで45.1±29.7 cmであった。先行研究¹⁾と遜色ない推定精度が得られたことから、提案する既設送信端末とロボットを活用する手法により人の屋内位置を推定できる可能性が示唆された。一方、x座標とy座標の絶対距離誤差平均値を比較するとy座標の方がx座標に比べ大きい傾向もみられた。

4. 実験2: 測定範囲を広げた屋内位置推定

実験1では提案手法による位置推定可能性が示された。しかし、測定対象範囲が2.0 m×2.0 mであるなど限定的な実験環境であった。そこで実験2では測定範囲をより実用的な広さにした場合の検証を行った。

実験環境を図4に示す。6.5 m×4.5 mの測定範囲を設定し、送信端末9台を設置した。受信端末は2箇所に並べて3台設置した。実験1で奥行方向y座標の距離誤差が大きくなったことから、この誤差の低減を狙ってy軸に直交する箇所に受信端末を追加設置した。本実験では静止時10秒間のRSSIから算出された特徴量をその位置のデータとして抽出した。ロボットでは3時間(193箇所)、人(被験者1, 2)では1時間(61, 69箇所)のデータを取得した。

2箇所を受信端末群で取得した特徴量を用いて5分割交差検証により得られた距離誤差平均値を図5に示す。位置推定の距離誤差平均値が最小となった推定器はRFであり、162.2±78.5~174.2±78.6 cmであった。ある程度の位置推定を行っているものの測定範囲を広げたことで実験1より推定精度は低下した。また、被験者1及び2のデータでは、MLR, PCR, RFによるy座標の絶対距離誤差平均値はx座標より大きくなり、受信端末設置個所の追加効果がみられなかった。この原因としては、今回用いた特徴量や推定モデルが、位置由来の電波変動と実際の位置を十分に対応付けられていなかった可能性が考えられる。よって今後は、用いる特徴量や推定モデルの更なる検討が必要である。

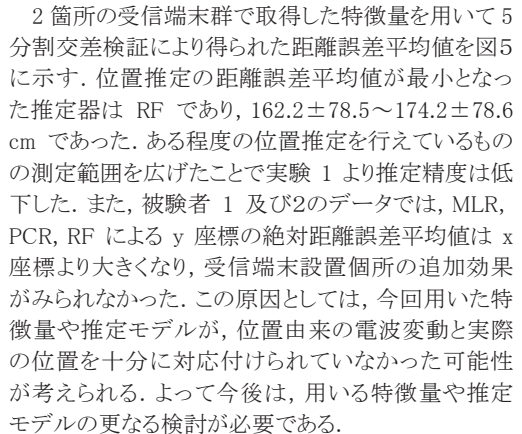


図4 実験2の実験環境

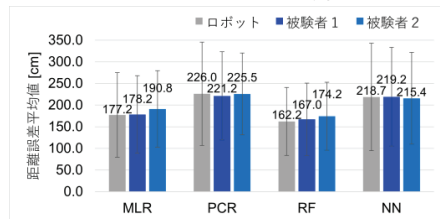


図5 実験2の推定結果

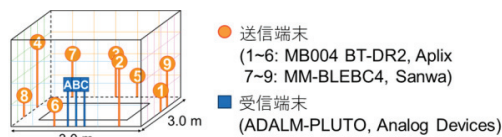


図2 実験1の実験環境

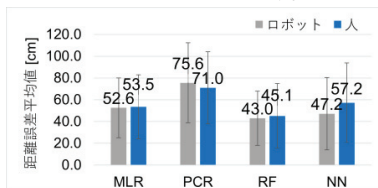


図3 実験1の推定結果

5. おわりに

本研究では端末装着が不要なBluetooth信号を用いた人の屋内位置推定手法を提案した。実験の結果、提案手法により人の屋内位置を数十cm精度で推定できる可能性が示唆された。測定範囲の拡大による推定精度低下の抑制が今後の課題である。

文献

- 1) N. Kuxdorf-Alikirata et al., "A Device-free Indoor Localization System Based on Supervised Learning and Bluetooth Low Energy", IEEE MeditCom 2021, pp.412-418, 2021.
- 2) 内田未央ほか, "通信機器の電波強度による室内身体活動推定に関する研究", 第54回日本生体医工学会東北支部大会論文集, pp. 24, 2021.

修士学位論文要約（令和5年3月）

長尺中空光ファイバガスセルを用いた中赤外吸収分光法による 高感度ガス計測の研究

大村 勇索

指導教員：松浦 祐司

Highly sensitive gas measurement by mid-infrared absorption spectroscopy using a long hollow optical fiber gas cell

Yusaku OMURA

Supervisor: Yuji MATSUURA

Since human exhaled breath contains hundreds of volatile compounds, and their composition and concentration reflect the body's metabolism, breath analysis is expected to be applied to non-invasive diagnosis. In this paper, we report the development of a compact and inexpensive system using a quantum cascade laser (QCL) for ammonia, which is considered a biomarker gas for kidney failure, liver failure, gastric cancer, and other diseases. We also aimed to improve sensitivity by increasing the optical path length utilizing the high output power of the QCL. A distributed feedback QCL and a fiber with an inner diameter of 1 mm were used for the measurement. The detection limit was 0.9 ppm when a transmission loss of 1.0 dB/m and a 4.4 m long fiber were used. Next, the transmission loss was reduced by reviewing the fiber fabrication process. As a result, we succeeded in fabricating a fiber with a transmission loss of 0.75 dB/m and successfully detected 0.3 ppm of ammonia. In fact, when we created and measured patient-level ammonia-containing exhaled air, we succeeded in detecting 1 ppm.

1. はじめに

生体の呼気中には数百種類の揮発性化合物が含まれており、その成分や濃度は体内の代謝を反映している。その中でも病気の指標となる揮発性化合物をバイオマーカーガスと呼び、濃度によって健康状態を把握したり、疾病の有無を判断したりすることができる[1,2]。しかし、これらのガスは肺胞で生成されるため、その検出には終末呼気と呼ばれる呼吸の吐き終わりの呼気の採取および計測が必要であり、その容量は100 mL以下と小さいうえ、濃度はサブppmオーダーと希薄である。そのため、高感度な検出系が必要となる。

本報告では呼気中のアンモニアガスに着目し、内容積の小さい中空光ファイバを使用した中赤外吸収分光法による高感度な分析系の構築と測定を行った。

2. アンモニアガス吸収スペクトル測定

光源として、最大出力 200 mW, 1071-1077 cm⁻¹ で発振するDFB-QCLと、伝送損失 1.0 dB/m, 長さ 4.4 m のファイバを用いて、アンモニアの測定を行った。図1に検出されたスペクトルを示す。

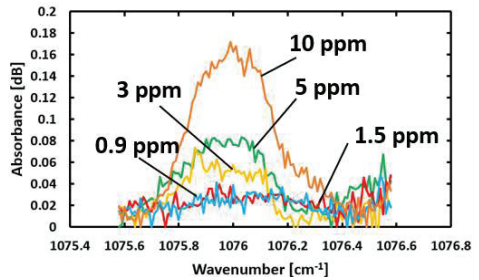


図1 中空光ファイバ（損失 1.0 dB/m）を用いて測定したアンモニアガス吸収スペクトル

0.9 ppm までのアンモニアの吸収スペクトルの取得に成功した。次に、10 ppm のアンモニアを測定したときのスペクトルの SNR を用いて、長さごとの検出限界の推定を行った。その結果を図2に示す。

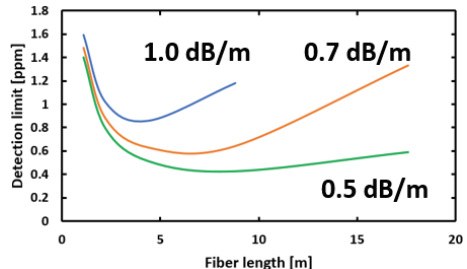


図2 予想検出限界とファイバ長の関係

1.0 dB/m のままでは更なる検出感度の向上は見込めないことが分かった。健康者呼気レベルのアンモニアを測定するためには伝送損失の低減が必要になる。そこで、製作工程を工夫することで、0.75 dB/m の損失を持つファイバを作成した。また、水蒸気と吸収帯が重ならない 1034 cm⁻¹ のDFB-QCL を使用し、再度アンモニアの測定を行ったスペクトルを図3に、ピーク面積値を用いて作成した検量線を図4に示す。

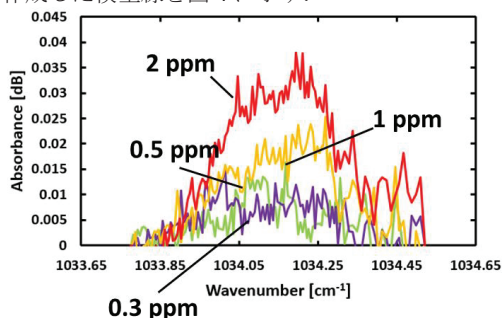


図3 中空光ファイバ（損失 0.75 dB/m）を用いて測定したアンモニアガス吸収スペクトル

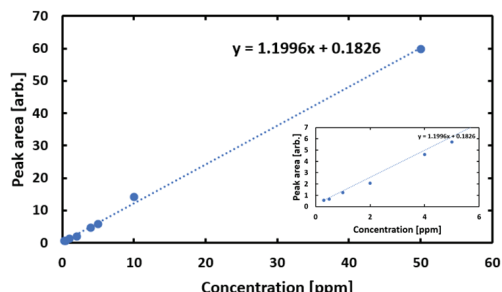


図4 吸収ピーク面積をもとに作成したアンモニアガス検量線

伝送損失を 0.75 dB/m とすることで、健康者レベルのアンモニアの検出に成功した。

3. 呼気の測定

次に、実際の呼気を用いた測定を行った。終末呼気の測定には水蒸気除去の目的で酸化カルシウムを用いた。しかしながら、このような処理を施した終末呼気からはアンモニアを検出することができなかった。そこで、腎不全患者レベルのアンモニアが含まれている終末呼気を作成し、測定を行った。腎不全患者レベルの呼気中アンモニアは 1.5-15 ppm[3]であると言われているため、

1, 2, 3, 5 ppm それぞれで 5 回ずつ測定を行った。

図5にその結果を示す。

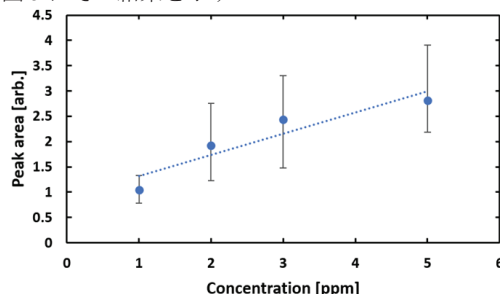


図5 腎不全患者疑似呼気を用いて作成した検量線

検量線が線形になったことで、腎不全患者レベルの呼気の測定が可能であることが示された。

5. まとめ

中空光ファイバガスセルと QCL を用いたシステムでアンモニアの高感度な検出を目指し、実験を行った。伝送損失を低減することで検出感度を向上させることができ、腎不全患者レベルの呼気中アンモニアの検出に成功した。

文献

- 1) W Cao and Y Duan, “Breath analysis: Potential for clinical diagnosis, and exposure assessment,” Clinical Chemistry, vol. 52, no. 5 pp. 800-811, May 2006
- 2) B. de Lacy Costello, A. Amann, H. Al-Kateb, C. Flynn, W. Filipiak, T. Khalid, D. Osborne, and N. M. Ratcliffe, “A review of the volatiles from the healthy human body,” J. Breath Res., vol. 8, no. 014001, pp. 1-29, March 2014
- 3) Sanduru Thamarai Krishnan, Jasmine Pramila Devadhasan, Sanghyo Kim, “Recent analytical approaches to detect exhaled breath ammonia with special reference to renal patients,” Analytical and Bioanalytical Chemistry, no. 409, pp. 21-31, September 2017

修士学位論文要約（令和5年3月）

転移リンパ節に対する局所放射線免疫療法に関する研究

栗生 晏暉

指導教員：小玉 哲也， 研究指導教員：小玉 哲也

A Study on Local Radioimmunotherapy for Metastatic Lymph Node Shizuki KURIU

Supervisor: Tetsuya KODAMA, Research Advisor: Tetsuya KODAMA

Lymphatic drug delivery system (LDDS) is novel technology that injects drugs into sentinel lymph nodes (SLNs) in the early stage to treat metastatic lymph nodes (LNs). However, further development is required to maintain the long-term anti-tumor effect. Recently, it has been reported that immune checkpoint inhibitors (ICIs) have sustained clinical efficacy compared to conventional anticancer drugs and that local irradiation alters immune responses and tumor microenvironment. Therefore, local irradiation of LNs and ICI administration using LDDS may enhance anti-tumor effects by stimulating T cells. Here we show that anti-tumor effects of local radio-immunotherapy to tumor bearing LN using metastatic LN mouse model. Tumor cells were inoculated into subiliac LN (SiLN), and metastasis was induced in proper axillary LN (PALN) and lung. Local irradiation inhibited lung metastasis and 1 Gy local irradiation increased type I immunity in the spleen and lung. Furthermore, local radio-immunotherapy with 1 Gy and anti-PD-1 antibody inhibited tumor growth in PALN and lung. Anti-tumor effects of local radio-immunotherapy were found to be higher than that of radiotherapy or immunotherapy alone. This paper shows that local radio-immunotherapy has a synergistic effect, and suggests the possibility of a new treatment method with lower doses of radiation and drugs.

1. はじめに

リンパ行性薬剤送達法 (lymphatic drug delivery system: LDDS) は、センチネルリンパ節 (SLN) に薬剤を注入し、転移初期段階の SLN およびその下流の LN を治療する新規技術である¹⁾。LDDS は従来の全身化学療法と比較して、転移 LN に対して有効であることが示された^{2,3)}。しかし、根治的治療法として確立するためには、さらなる技術開発が求められる。近年、放射線局所照射が免疫応答や腫瘍微小環境の変化を誘導し、全身性抗腫瘍免疫の獲得や免疫チェックポイント阻害薬 (ICI) による抗腫瘍効果の向上が期待できるアブスコパル効果が報告されている⁴⁾。また、先行研究では、低線量の全身放射線照射後に CD4, CD8, PD-L1 および I 型免疫の活性化が確認された⁵⁾。よって、担がん LN への放射線局所照射と LDDS を用いた ICI 投与の併用療法 (局所放射線免疫療法) は、抗腫瘍効果を活性化させ、より低侵襲に抗腫瘍効果を向上させる可能性がある。本研究は、転移 LN モデルマウスを用いて、担がん LN への放射線局所照射および局所放射線免疫療法による転移 LN および遠隔転移に対する治療効果について検討した。

2. 腫瘍細胞の放射線感受性と遺伝子発現特性

本実験では H2^k の腫瘍細胞 (FM3A-Luc, LM8-Luc, KM-Luc/GFP) の放射線感受性および遺伝子

発現特性を評価した。放射線感受性評価では、異なる線量の X 線を細胞に照射し、生存率を測定した。遺伝子発現特性では、VEGF, PD-L1, Estrogen (Esr), Progesterone receptor (PR), Her2 および HGF をアガロースゲル電気泳動によって調査した。図 1 は放射線感受性評価の結果を示す。すべての細胞において、照射線量に依存して生存率が低下した。

遺伝子発現特性の結果、すべての腫瘍細胞において、PD-L1, PR, Her2 が発現していた。また、LM8-Luc においては、VEGF-A が発現していた。

本研究は免疫介在の抗腫瘍効果を確認するため、抗腫瘍効果の評価は、FM3A-Luc が適している。また、PD-L1 の発現から、抗 PD-1 抗体との併用による抗腫瘍効果の向上が示唆された。

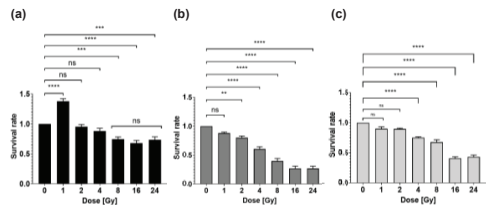


図 1 X 線照射後の細胞生存率 (a) FM3A-Luc, (b) LM8-Luc, (c) KM-Luc/GFP

3. 担がんリンパ節への放射線局所照射による抗腫瘍効果

リンパ節腫脹マウス MXH10/Mo-lpr は腸骨下LN(SiLN), 固有腋窩LN(PALN)を有する。これらはリンパ管で吻合しており、リンパ液の流れはSiLN→PALNである⁶⁾。SiLNにFM3A-Lucを接種し、PALNと肺に転移を誘導した。本実験は2回の実験をおこなった。1回目は腫瘍細胞を接種してから4日後 (Day 4) に担がんLN (SiLN) に対して1 Gy, 4 Gy および8 GyのX線を局所照射し、2回目はDay 4に担がんLNに対して1 Gy, 2 Gy, 4 Gy および8 GyのX線を局所照射した。1回目はDay 28にPALNと肺を摘出して生物発光強度を測定した。2回目はDay 7に脾臓と肺を摘出して、定量PCRによって、CD4, CD8, PD-L1, サイトカイン (IL-1β, IL-6, IL-12α, IL-12β, TNF-α, IFN-γ) およびヒートショックプロテイン (Hsp70, Hsp90) の発現量を測定した。図2はDay 28におけるPALNと肺の正規化した生物発光強度を示す。PALNにおける生物発光強度は、Control群と比較して、有意差を認めなかった。一方で、肺における生物発光強度は、すべての放射線局所照射群において、Control群と比較して有意に低かった。

図3はDay 7における脾臓と肺の定量PCRの結果を示す。脾臓においては、2 Gy以外の放射線局所照射群でCD4, CD8, PD-L1 およびサイトカインの発現量が増幅した。特に、4 Gy および8 Gy群におけるIL-12βの発現量はControl群と比較し、有意に増幅した。肺においては、1 Gy群でCD4, CD8, PD-L1 およびサイトカインの発現量が増幅した。特に、IFN-γの発現量はControl群と比較し、有意に増幅した。

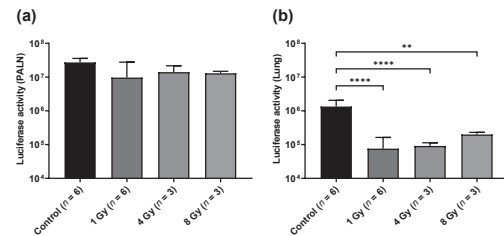


図2 (a) PALNにおけるex vivo生物発光強度
(b) 肺におけるex vivo生物発光強度

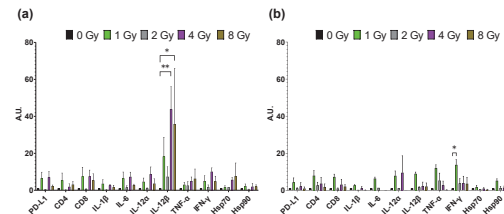


図3 (a) 脾臓における定量PCR
(b) 肺における定量PCR

本実験によって、担がんLNへの放射線局所照射は、抗腫瘍免疫を活性化させ、肺における腫瘍増殖を抑制することが明らかとなった。

4. 担がんリンパ節に対する局所放射線免疫療法の抗腫瘍効果

SiLNにFM3A-Lucを接種し、PALNと肺に転移を誘導した。抗PD-1抗体はDay 7に、抗CTLA4抗体はDay 7とDay 11に担がんLNに投与した。局所放射線免疫療法は1 Gy + 抗CTLA4抗体群および1 Gy + 抗PD-1抗体群を設定した。

図4に各群のPALNにおける正規化した生物発光強度の経時変化を示す。Day 28ではControl群と比較して、1 Gy + 抗PD-1抗体群の生物発光強度が有意に低く、腫瘍増殖を抑制した。これは担がんLNへの1 Gy抗PD-1抗体の局所放射線免疫療法によって、転移LNにおける治療効果が向上することを示唆している。

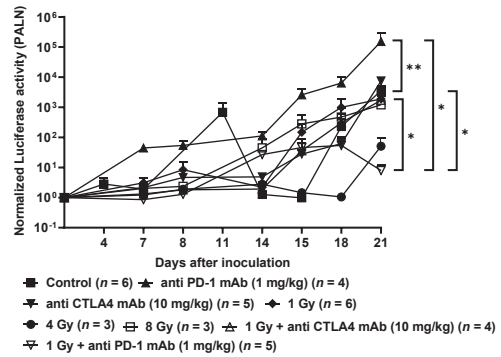


図4 PALNにおける生物発光強度の経時変化

5. まとめ

担がんLNへの放射線局所照射は転移LNモデルマウスにおける肺の腫瘍増殖を抑制した。また、担がんLNへの局所放射線免疫療法では、放射線局所照射単独およびICI投与単独と比較して、転移LNにおける治療効果が向上することが明らかとなった。担がんLNへの局所放射線免疫療法が、放射線療法と免疫療法の相乗効果をもたらし、より微量の累計照射線量かつ薬剤量で転移LNおよび遠隔転移を抑制する新たな治療法「局所放射線免疫療法」となる可能性が示唆された。

文献

- 1) Fujii H, *et al.*, *Cancer Med*, **8** (2019).
- 2) Tada A, *et al.*, *Cancer Sci.*, **108** (2017).
- 3) Fukumura R, *et al.*, *Cancer Sci.*, **112** (2021).
- 4) Y Liu, *et al.*, *J. Hematology & Oncology*. **11** (2018).
- 5) Sora S, *et al.*, *Cancer Sci.*, **114** (2023).
- 6) L Shao. *et al.*, *J. Immunol Methods*, **424** (2015).

修士学位論文要約（令和 5 年 3 月）

粒子フィルタに基づく X 線動画像中の 3 次元体内構造変動の推定法に関する研究

篠原 匠

指導教員：本間 経康

A Study on Particle Filter-based Estimation Method for Three-dimensional Motion of the Internal Body Structures in X-ray Image Sequence

Takumi SHINOHARA

Supervisor: Noriyasu HOMMA

X-ray imaging is important for measuring target lung tumors moving with respiration during radiotherapy. Machine learning-based estimation methods have been proposed to track the moving tumor obscurely captured in X-ray images due to overlapping organs. However, these conventional methods often work poorly in various patient and imaging situations not included in their training data. This study proposes a new method to estimate 3D target motion and images from X-ray images. The proposed method adopts a particle filter with an explicit model that represents the unobservable organ motion and observable images for covering various situations without training data dependency. Experimental results showed that the proposed method could better estimate the tumor motion and images in simulated images and the same potential for clinical images.

1. はじめに

肺がん放射線治療では、標的腫瘍の位置や形状が刻一刻と変動するため、正確な放射線照射の実現には、治療中の腫瘍位置・形状の計測が重要である。計測には治療中に撮影される X 線画像が使用可能であるが、腫瘍は他の臓器と重畳して描出されるため、腫瘍を直接計測することは困難な場合がある。

腫瘍位置計測を容易にするため、X 線動画像から腫瘍像を強調・推定する手法が研究・開発されている¹⁾²⁾。隠れマルコフモデル (Hidden Markov model, HMM) に基づく手法¹⁾では、X 線画像上の輝度成分の時間発展と観測輝度値との関係性をモデルに学習させることにより、X 線動画像から腫瘍像を抽出する。また、畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional neural network, CNN) に基づく手法²⁾では、X 線画像と体内構造配置との関係性をモデルに学習させることにより、X 線画像から体内構造を推定する。しかし、これらの手法では学習時のデータへの依存性が高く、学習時と異なる体内構造配置を推定することに困難が伴う。

本研究ではモデル構築・学習時のデータ依存性を低減し、より効果的な X 線動画像からの体内構造推定の実現に向けて、三次元体内構造の時間発展とその二次元観測輝度空間分布を明示的にモデリングし、粒子フィルタに基づき推定する手法を提案する。

2. X 線動画像中の三次元体内構造推定法

2.1. 三次元体内構造を用いた X 線画像の表現

X 線画像 Y_t は X 線透視装置を用いて、三次元の体内構造 V_t を二次元に投影した画像である。しかし、一枚の X 線画像 Y_t から体内構造 V_t を直接推定することは困難である。そこで、現在の体内構造 V_t は治療前に取得可能な CT データ CT_{ref} を体内構造の変動を表すベクトル場 $D_{ref \rightarrow t}$ により変形させた状態と考え、X 線動画像から体内構造変動を推定する。

2.2. 粒子フィルタを用いた体内構造変動推定

粒子フィルタを用いた体内構造変動推定の概要を図 1 に示す。以下では各ステップについて述べる。

2.2.1. X 線画像を出力とした状態空間モデルの構築

各体組織は運動しているため、これら組織の変位ベクトル同士の関係性を利用すると、体内構造変動の状態を縮約して推定を容易にできると考えられる。各体組織の呼吸性変動の関係性は治療前に取得可能な 4 次元 CT データをもとに推定可能である。4 次元 CT データにおける各呼吸位相間の体内構造変

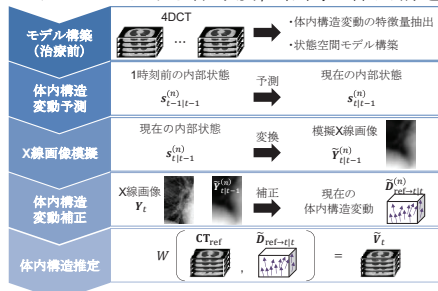


図1: 提案する体内構造変動推定法の概要

動を表すベクトル場を算出し、これらに対して主成分分析を適用する。取得される主成分係数は各位相間共通する体内構造変動を表し、主成分スコアはその変動の大きさを表す。この主成分スコアの値を変更すると様々な体内構造変動を表現できるため、主成分スコアを内部状態ベクトル \mathbf{s} 、X 線画像を出力 \mathbf{Y} とした状態空間モデルを構築する。

2.2.2. 粒子フィルタを用いた状態推定

粒子フィルタ (Particle filter, PF) は、多数の粒子 $n = 1, \dots, N$ を用いて観測された出力と状態空間モデルの内部状態の確率密度を近似し、観測出力から内部状態を推定する手法である。まず、PF では時刻 $t-1$ の内部状態 $\mathbf{s}_{t-1|t-1}^{(n)}$ に式(1)のシステムモデルを適用し、時刻 t の内部状態 $\mathbf{s}_{t|t-1}^{(n)}$ を予測する。

$$\mathbf{s}_{t|t-1}^{(n)} = \mathbf{s}_{t-1|t-1}^{(n)} + \mathbf{v}_t, \mathbf{v}_t \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{\Sigma}) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{\Sigma}$ は主成分分析時に取得される主成分スコアの値から導出した分散共分散行列である。

次に予測された内部状態 $\mathbf{s}_{t|t-1}^{(n)}$ より、式(2)の観測モデルを用いて模擬 X 線画像 $\mathbf{Y}_{t|t-1}^{(n)}$ を出力する。

$$\mathbf{Y}_{t|t-1}^{(n)} = h(\mathbf{s}_{t|t-1}^{(n)}) \quad (2)$$

ここで、関数 $h(\cdot)$ は内部状態から現在の体内構造を予測し、模擬 X 線画像を作成する関数である。

各粒子で予測した模擬 X 線画像 $\mathbf{Y}_{t|t-1}^{(n)}$ の観測 X 線画像 \mathbf{Y}_t に対する尤もらしさを位相限定相関に基づいた尤度関数で評価し、各粒子が現在の体内構造をどれだけ適切に表現しているかを表す重み $w_t^{(n)}$ を計算する。重み $w_t^{(n)}$ に基づいて、内部状態をリサンプリングし、内部状態 $\mathbf{s}_{t|t}^{(n)}$ を取得する。この一連の流れを繰り返して、内部状態の変化を推定する。

2.2.3. 体内構造及び腫瘍像の推定

時刻 t の各粒子の内部状態 $\mathbf{s}_{t|t-1}^{(n)}$ と重み $w_t^{(n)}$ から、式(3)に基づき現在の内部状態を推定する。

$$\tilde{\mathbf{s}}_t = \sum_{n=1}^N \mathbf{s}_{t|t-1}^{(n)} w_t^{(n)} \quad (3)$$

推定された内部状態 $\tilde{\mathbf{s}}_t$ から現在の体内構造変動 $\tilde{\mathbf{D}}_{\text{ref} \rightarrow t}$ を再構成する。現在の体内構造変動 $\tilde{\mathbf{D}}_{\text{ref} \rightarrow t}$ を用いて、参照用の CT データ \mathbf{CT}_{ref} と腫瘍のみをマスクしたデータ $\mathbf{CT}_{\text{ref}, \text{tumor}}$ を変形することにより、現在の体内構造 $\tilde{\mathbf{V}}_t$ と腫瘍像 $\tilde{\mathbf{V}}_{\text{tumor}, t}$ を推定する。

3. X 線動画像からの腫瘍像推定実験

提案法 (PF) の有効性を検証するため、X 線動画像からの腫瘍像推定実験を行い、従来法 (HMM, CNN) と比較した。図 2 に撮像角の回転を伴うシミュレーション X 線動画像からの腫瘍像推定結果の例を示す。図 2(b) の PF により推定された腫瘍像は図 2(c) の CNN により推定された腫瘍像と比較して正しい位置に描出されており、図 2(d) の HMM により推定された腫瘍像と比較して形状が明瞭となっていることが見て取れる。腫瘍像の真値と各手法で推定された二次元腫瘍像のオーバーラップ率 (Intersection over Union, IoU) は PF で 0.63 ± 0.16 、CNN で $0.48 \pm$

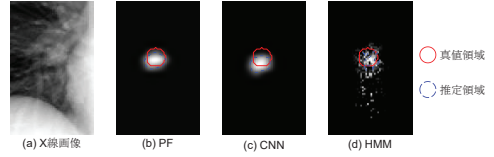


図 2: シミュレーション画像での推定結果例

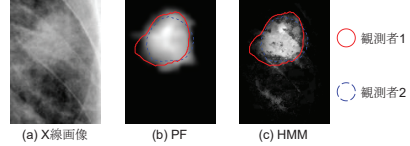


図 3: 臨床画像での推定結果例

0.20, HMM で 0.49 ± 0.19 であった。また、推定腫瘍重心座標と真値腫瘍重心座標のユークリッド距離誤差は PF で 2.01 ± 1.18 mm, CNN で 3.11 ± 1.62 mm, HMM で 2.53 ± 2.40 mm であり、PF による腫瘍像推定性能の改善がみられた。

図 3 に臨床画像からの腫瘍像推定結果の例を示す。CNN では、呼吸性の体内臓器変動を学習できなかったため、評価から除外した。PF では HMM で生じていたノイズ状の輝度成分が生じず、腫瘍像の形状が明瞭であることが見て取れる。3 例の臨床画像において手動追跡した腫瘍像と各手法で推定された二次元腫瘍像の IoU を評価したところ、3 例平均で、PF で 0.64 ± 0.07 、HMM で 0.61 ± 0.10 であった。また、手動追跡結果との腫瘍重心座標のユークリッド距離誤差は 3 例平均で、PF で 2.27 ± 0.97 mm, HMM で 1.80 ± 0.59 mm であった。PF では HMM と比較して IoU は改善したものの、追跡性能は低下した。この原因として、臨床画像における評価基準座標に使った手動追跡結果の観測者間のばらつきが挙げられる。このため、今後、定量的評価が可能で、かつ体内構造の複雑な変動を柔軟に表現可能なファントムを用いた検証が必要だと考える。

4. おわりに

本研究では、粒子フィルタに基づく新たな X 線動画像からの三次元体内構造推定手法を提案した。シミュレーション画像による実験結果より、提案法ではモデル構築・学習用データへの依存性低減による腫瘍像推定性能の改善がみられた。また、臨床画像での実験結果からも提案法による腫瘍像推定が有用である可能性が示唆された。

文献

- 1) 新藤雅大 他 “肺がん放射線治療のための隠れマルコフモデルを用いた X 線動画像中の物体輝度抽出”, 電気学会論文誌 C (2020)
- 2) R. Wei et al., “Real-time tumor localization with single x-ray projection at arbitrary gantry angles using a convolutional neural network (cnn)”. Physics in Medicine and Biology (2020)

修士学位論文要約（令和5年3月）

血管壁粘弾性特性の血圧依存性の超音波計測に関する研究

鈴木 沙綺

指導教員：金井 浩， 研究指導教員：荒川元孝

A Study on Ultrasonic Measurement of Blood Pressure Dependence
on Viscoelastic Properties of Vascular Wall

Saki SUZUKI

Supervisor: Hiroshi KANAI, Research Advisor: Mototaka ARAKAWA

Previously, we proposed an ultrasonic measurement method of arterial wall elasticity for the early detection of arteriosclerosis. Since vascular wall elasticity depends on blood pressure, in this study, the elasticity and viscosity were estimated using the hysteresis loop determined between the incremental strain in the wall and internal pressure by altering the lowest pressure in the phantom and *in vivo* experiments. Consequently, both the estimated elasticity and viscosity increased with the minimum internal pressure. Moreover, the slope of each hysteresis loop was larger than that of the approximated curve for the lowest blood pressures of the hysteresis loops with different internal pressures, caused by the blood pressure changes in the order of several hertz within a single heartbeat. Hence, we conclude that measuring both the blood pressure and the elastic and viscous moduli would be beneficial in comprehensively investigating more vessel wall properties that change with the progression of arteriosclerosis.

1. はじめに

動脈硬化症の早期発見のために、血管壁の粘弾性特性の評価が重要である。本研究グループの先行研究において、超音波プローブを用いて、橈骨動脈壁の増分歪みと増分内圧の間のヒステリシス特性を計測し、粘弾性率を推定する方法が提案された[1]。

摘出血管に対する準静的な計測では、血管径と血圧の関係は非線形となる[2]。生体内における血管の弾性率の血圧依存性が分かれば、血圧が血管に与えている定常的な負荷の程度が分かり、粘弾性特性計測による動脈硬化の診断指針の確立につながる可能性がある。本論文では、血管壁の粘弾性特性の拡張期血圧依存性を *in vivo* 計測し、血管壁の粘弾性特性評価において、脈圧だけでなく拡張期血圧の計測が重要であることを示すことを目的とした。ファントム実験と *in vivo* 実験において、最低内圧を変化させて、内圧と血管内径の間のヒステリシス特性を計測し、血管壁の粘弾性率の拡張期血圧依存性について検討した。

2. 弾性率と粘性率の推定原理

ファントム実験および *in vivo* 実験において、血管模擬ファントムまたは血管の内径変化から壁の粘弾性率を推定した。拍動に伴って生じる内径変化 $\Delta d_i(t)$ は、位相差トラッキング法[3]により計測できる。ファントムまたは血管の壁は、

壁厚が周方向に均一、非圧縮性で、弾性的に等方性であり、長軸方向の伸縮はないと仮定する。内径変化 $\Delta d_i(t)$ により生じた歪み $\Delta d_i(t)/d_{i0}$ と増分内圧 $\Delta p(t)$ との関係は、Voigt モデルを仮定すると式(1)で表される。

$$E \frac{\Delta d_i(t)}{d_{i0}} + \eta \frac{\partial \Delta d_i(t)}{\partial t} = \frac{3(h_0 + d_{i0})(2h_0 + d_{i0})}{8h_0 d_{i0}} \Delta p(t) \quad (1)$$

ここで、 h_0 と d_{i0} は、それぞれ最低内圧時の壁の厚さと内径、 E, η は、それぞれ壁の弾性率と粘性率である。式(1)の導出には、壁の厚さ変化 $\Delta h(t)$ はそれぞれ最低内圧時の厚さ h_0 より十分小さいという仮定を用いている。式(1)より、計測した $\Delta d_i(t)/d_{i0}$ と $\Delta p(t)$ に対し、最小二乗法を用いて弾性率 E と粘性率 η を推定した。

3. 実験方法

ファントム実験では、閉経路中に水柱を立てて定常的な圧力をかけた。水柱の高さ ΔH は、130 cm (拍動時の最低圧力: 70 mmHg) (生体条件)、100 cm (45 mmHg)、60 cm (20 mmHg)、30 cm (0 mmHg) とした。ファントムの上流側と下流側に設置した圧力センサで圧力波形 $p(t)$ を計測し、ファントムの内径変化を中心周波数 7.5 MHz のリニアプローブを用いて計測した。

in vivo 実験では、20代健康者の橈骨動脈を対象に、血圧波形と血管径を同時に計測できる超音波プローブ[4]を用いてそれらを計測した。血

圧の絶対値校正には、手首で計測できる血圧計を用いた。異なる拡張期血圧で計測するために、(A) 橈骨動脈が心臓より 20 cm 低いとき($\Delta H = -20$ cm), (B) 心臓と同じ高さ($\Delta H = 0$ cm), (C) 心臓より 15 cm 高いとき($\Delta H = 15$ cm)の3通りで計測した。

4. 結果・考察

図 1 に、ファントム実験における、(a) 水柱の高さ ΔH が 130 cm, 100 cm, 60 cm, 30 cm のときの連続する 4 拍分の内圧 $p(t)$ と内径 $d_i(t)$ の間のヒステリシス特性, (b) 弾性率 E と粘性率 η の推定結果を示す。図 1(a) より、水柱の高さが高くなると、ヒステリシス特性の傾きが大きくなった。また、準静的な計測での内圧 $p(t)$ と内径 $d_i(t)$ の関係は指数関数で表されるが、各内圧で計測した内圧 $p(t)$ と内径 $d_i(t)$ の間のヒステリシス特性は、準静的な計測のように 1 つの曲線では表されなかった。図 1 (b) より、水柱の高さ ΔH が 30 cm と 60 cm では、弾性率 E と粘性率 η はほとんど変化しなかったが、100 cm, 130 cm では内圧が大きくなるにつれて弾性率 E と粘性率 η が増加した。

図 2(a) に、*in vivo* 実験における、(A) 橈骨動脈が心臓より 20 cm 低いとき($\Delta H = -20$ cm), (B) 心臓と同じ高さのとき($\Delta H = 0$ cm), (C) 心臓より 15 cm 高いとき($\Delta H = 15$ cm)のそれぞれの連続する 2 拍分の血圧 $p(t)$ と内径 $d_i(t)$ の間のヒステリシス特性, 図 2(b) に、弾性率 E と粘性率 η の推定結果を示す。

図 2(a) では、ファントム実験と同様に、拡張期血圧が高いほどヒステリシス特性の傾きが大きくなった。図 2(a) 中の破線は、それぞれの腕の高さでのヒステリシス特性における、一心拍中の拡張期血圧の指数関数での近似曲線を示す。各ヒステリシス特性における拡張期血圧とそのときの内径の関係は、指数関数で表されることが確認できた。しかし、ヒステリシス特性の傾きは、点線で示す各ヒステリシス特性の拡張期血圧を通る曲線の傾きより大きくなった。

Voigt モデルでは、周波数が大きくなると複素弾性率の虚数部が大きくなる。一心拍内の数 Hz オーダーの血圧変化により複素弾性率の絶対値が大きくなり、ヒステリシス特性の傾きが大きくなったと考えられる。図 2(b) では、ファントム実験と同様、拡張期血圧が高くなるほど、弾性率 E と粘性率 η は高く推定され、弾性率 E と粘性率 η に拡張期血圧依存性があることが確認できた。

5. まとめ

ファントム実験と *in vivo* 計測において、拡張期血圧を変化させて血圧と歪みの間のヒステリシス特性を計測した。その結果、腕の高さごとのヒステリシス特性の傾きは、各ヒステリシス特性の拡張期血圧を通る曲線の傾きより大きく

なった。さらに、ヒステリシス特性から粘弾性率を推定すると、粘弾性率には拡張期血圧依存性があることが確認できた。以上より、動脈硬化症の進行に伴う血管壁特性の変化を鋭敏に検出するために、拡張期血圧の計測および拍動下における血管壁粘弾性特性の評価が重要である。

文献

- 1) T. Saito, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **59**, SKKE04 (2020).
- 2) K. Hayashi, et al., J. Biomech. **13**, 175 (1980).
- 3) H. Kanai, et al.: IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control **43**, (1996) 791.
- 4) M. Arakawa, et al., Sens. Actuator A: Phys. **297**, 111487 (2019).

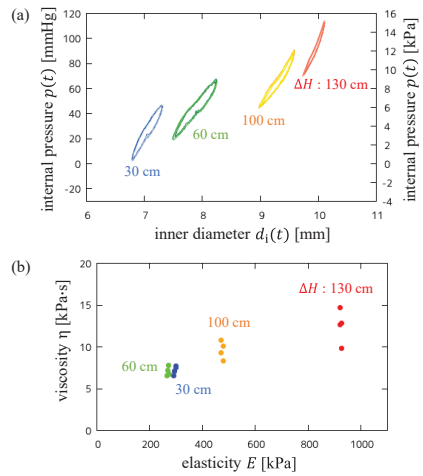


図 1: ファントム実験における、(a) 連続する 4 拍分の内圧 $p(t)$ と内径 $d_i(t)$ の間のヒステリシス特性, (b) 弾性率 E と粘性率 η の推定値。

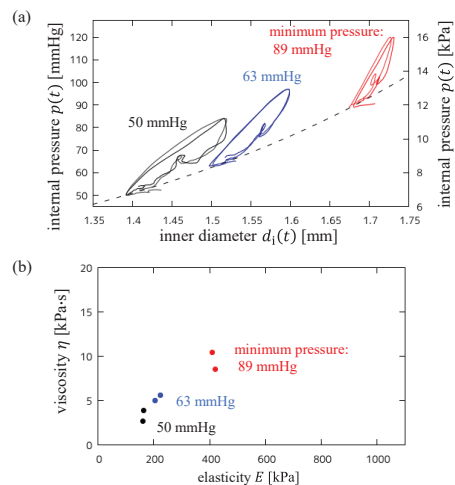


図 2: *in vivo* 実験における、(a) 連続する 2 拍分の血圧 $p(t)$ と内径 $d_i(t)$ の間のヒステリシス特性, (b) 弾性率 E と粘性率 η の推定値。

修士学位論文要約（令和5年3月）

微小流路内における細胞層バリア機能のインピーダンス評価に関する研究

阪東 怜奈

指導教員：吉信 達夫， 研究指導教員：宮本 浩一郎

Characterization of the barrier function of a cell layer in terms of its impedance measured in a microfluidic channel

Reina BANDO

Supervisor: Tatsuo YOSHINOBU, Research Advisor: Ko-ichiro MIYAMOTO

Barrier functions due to intercellular adhesion, called tight junctions, play important roles in biology and pathology. The trans-epithelial electrical resistance (TEER) measurement, which has been conventionally used to evaluate the barrier function, has a problem of not being able to perform position-selective measurement. In this study, we used a method based on a semiconductor sensor. This method detects the impedance distribution of the cell layer formed on the sensor surface in the form of a photocurrent generated by a scanning light and can measure the morphological change of the cell layer in a position-selective manner. In this study, we aimed to observe changes in the barrier function when the cell layer on the sensor was stimulated by a reagent.

1. はじめに

タイトジャンクションと呼ばれる細胞間接着により生じるバリア機能は、生物学的、病理学的に重要な役割を果たす。従来、バリア機能の評価に利用されていたTEER測定では、位置選択的な測定ができないという課題があった。そこで本研究では、半導体センサを用いる方法を検討した。この方法は、センサ表面に形成した細胞層のインピーダンス分布を、走査光により発生する光電流として検出することで、細胞層の形態変化を位置選択的に測定できる。本研究では、センサ上の細胞層に試薬による刺激を与えた時のバリア機能の変化の観察を目的とした。

2. 原理

本研究で用いた半導体センサは、電解質-絶縁層-半導体のEIS構造を有している。測定手法はSPIM (Scanning photo-induced impedance microscopy)⁽¹⁾と呼ばれる。EIS構造にバイアス電圧を印加しながら変調光を照射すると、外部回路に交流光電流が流れる。この光電流はセンサ上のインピーダンスによって変化する。細胞層が存在する場合は、そのインピーダンスにより、細胞層のない場合より電流値は小さくなる。また、バリア機能が弱まると、細胞層のもつインピーダンスが小さくなるため、健全な細胞層に比べて電流値は大きくなる。SPIMは、照射領域で測定領域を制御しているため、変調光を二次元的に走査することでインピーダンスの分布をイメージングすることが可能である。

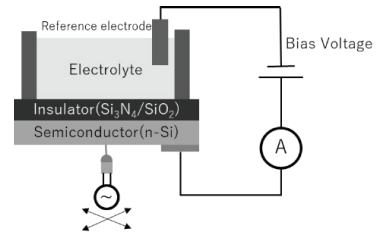
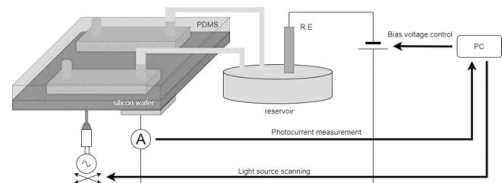


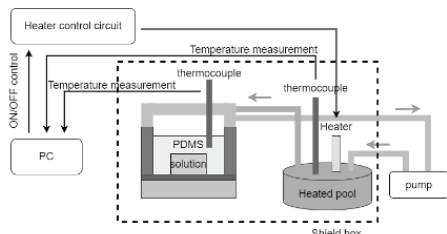
図 1 SPIM の模式図

3. 測定系

本研究では、細胞培養に低温によるストレスを与えず、その場観察可能な測定系を構築した(図2)。測定系は、SPIM測定系と温度制御機構の2つで構成されている。SPIM測定に使用するセンサ上にはPDMS製のチャンバが形成されている。流路外部には液溜めを設置して流路と接続し、液溜め内に参照電極を挿入することで、流路にバイアス電圧を印加できるようになっている。温度制御機構では、測定試料を覆うカバーの壁面中で温水を循環させることで内部空間を加熱している。本研究では、 $36.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ の範囲で温度制御を行った。



(a)SPIM 測定系



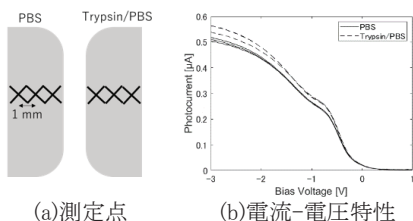
(b)温度制御機構

図 2 本研究における測定系

4. 結果

4.1 細胞層剥離時のその場観察

本研究では、センサ上に 2 つのチャンバを形成し、両方で MDCK 細胞を培養した後、片側のみに試薬を投与することで健全な細胞層と試薬による刺激を与えた細胞層の比較を行えるようにした。左側のチャンバには PBS を、右側のチャンバに Trypsin-EDTA 溶液と PBS を 1:1 で混合した溶液 (Trypsin/PBS) を注入した。Trypsin-EDTA には細胞層を剥離する働きがある。溶液を入れ替えてから 60 分間温度制御を行いながら静置し、細胞層を剥離した。細胞層を剥離した後の電流-電圧特性を図 3 (b) に示す。電流-電圧特性から、右側のチャンバの電流値が左側よりも大きくなっていることが確認でき、細胞層の有無を判別することができた。

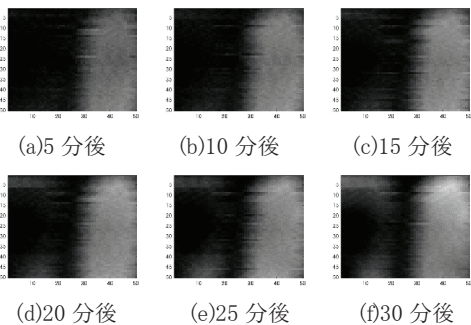


(a)測定点

(b)電流-電圧特性

図 3 細胞層有無による電流値の違い

細胞層剥離時の電流分布イメージを 5 分に 1 回取得した。取得した各時間における電流分布イメージから、高温による電流値のドリフトを減算した後、Trypsin/PBS 注入前の電流分布イメージを減算した結果を図 4 に示す。時間経過とともに Trypsin/PBS を注入した右側のチャンバの電流値が上昇する様子が確認できた。



(a)5 分後

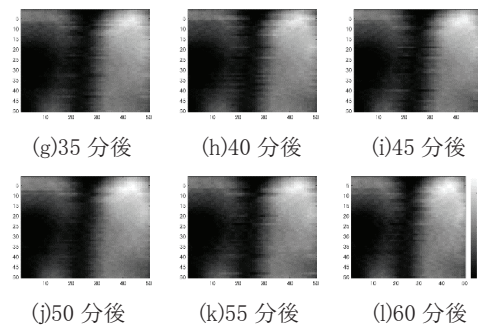
(b)10 分後

(c)15 分後

(d)20 分後

(e)25 分後

(f)30 分後



(g)35 分後

(h)40 分後

(i)45 分後

(j)50 分後

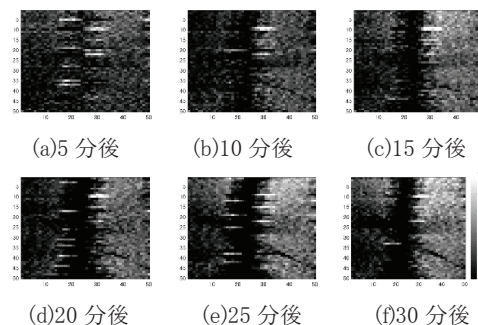
(k)55 分後

(l)60 分後

図 4 細胞層剥離時の電流分布イメージの経時変化

4.2 バリア機能低下時のその場観察

2 つのチャンバ内で細胞培養を行った後、左側のチャンバに HBSS を、右側のチャンバに 1 mM 4-ノニルフェノールを注入して 30 分間電流分布イメージを取得した。4-ノニルフェノールは細胞層のバリア機能を弱める働きがある⁽²⁾。取得した各時間における電流分布イメージから、高温による電流値のドリフトを減算した後、4-ノニルフェノール注入前の電流分布イメージを減算した結果を図 5 に示す。時間経過とともに 1 mM 4-ノニルフェノールを注入した右側のチャンバの電流値が上昇する様子が確認できた。



(a)5 分後

(b)10 分後

(c)15 分後

(d)20 分後

(e)25 分後

(f)30 分後

図 5 バリア機能低下時の電流分布イメージの経時変化

5. まとめ

本研究では、SPIM 測定系に温度制御機構を取り付けることで、細胞層のインピーダンス変化をその場観察可能な測定系を構築した。また、この測定系で得られた電流分布イメージから、時間経過に伴う細胞層の剥離およびバリア機能の低下の様子を観察することに成功した。

文献

1) S Krause, H Talabani, M Xu, W Moritz, J Griffiths, "Scanning Photo-Induced Impedance Microscopy —Resolution studies and polymer characterization," *Electrochimica Acta.*, 47(13-14), pp.2143-2148.

修士学位論文要約（令和5年3月）

慣性センサを用いた深層学習による歩行事象検出法の 片麻痺者への適用に関する基礎研究

樋口 健

指導教員：渡邊 高志

A Basic Study on Application of Gait Events Detection Method by Deep Learning Using Inertial Sensor to Hemiplegics

Ken HIGUCHI

Supervisor: Takashi WATANABE

Hemiplegia is motor dysfunction caused by cerebrovascular disease, reducing the patient's quality of life and therefore it is necessary to implement gait rehabilitation. Detection of gait events is necessary for various systems in the quantitative evaluation of walking ability. Recently, gait events detection methods using deep learning have been studied. However, the acquisition of learning data is a problem in the abnormal gait of hemiplegics with large individual differences, and one or two types of gait events are often detected. Therefore, this study examined methods for detecting the four types of gait events in hemiplegics without using the data of hemiplegic patients. Multiple learning models were created using the gait of healthy subjects walking and simulated hemiplegic walking measured by an inertial sensor and force-sensitive resistors attached to the foot, and the detection rate and timing error of gait events for each detection model were verified. The model trained only on healthy gait data (Model H) was found to have relatively good accuracy. Then, Model H was examined on an actual hemiplegic gait (with/without AFO). The results suggest that Model H has good detection rates and detected timing errors, especially for the hemiplegic gait with AFO. However, the standard deviations of the detected timing errors were particularly large for the toe-off, and gait events tended to be detected earlier for hemiplegic gait without AFO. In order to reduce such errors, the conditions for gait phase transitions and the input signals to the model need to be investigated. Detecting the four gait events in hemiplegic gait could be applied to a variety of devices.

1. 序論

脳血管疾患による運動機能障害である片麻痺は患者の生活の質の低下につながるため、歩行リハビリテーションが必要となる。慣性センサ(IMU)を用いた歩行分析の研究は広く行われており、歩行事象の検出は歩行能力の定量的な評価などに必要である。近年では機械学習を用いた歩行事象検出法の開発が行われているが、片麻痺者の異常歩行では個人差が大きく、多くの患者からの学習データの取得も課題になる。また、1、2種類の歩行事象検出¹⁾²⁾やパーキンソン病患者の歩行分析³⁾などが多いが、脳血管疾患患者に対する臨床応用の例が少ない。したがって本研究では、健常者歩行、健常者による片麻痺模擬歩行を学習データに用いて、片麻痺患者における4種類の歩行事象検出法について検討した。

2. 歩行計測および教師データ作成方法

健常者9名の健常者歩行、健常者5名による片麻痺者模擬歩行(模擬歩行)の歩行データを学習および評価に用い、片麻痺者4名による短下肢装具(AFO)なし/ありの歩行計測データを評価に用いた。片側足部にIMU、感圧センサを装着し、それぞれ3

軸加速度・3軸角速度、歩行相を計測した。なお、模擬歩行、片麻痺者歩行では麻痺脚に装着した。

3. 深層学習による歩行事象検出モデル

本研究では、代表的な歩行事象である足底接地開始(FFs)、踵離地(HO)、爪先離地(TO)、初期接地(IC)の検出を対象とした。これらの歩行事象の検出のため、各歩行事象間の区間であるFF、HO-TO、TO-IC、IC-FFsを4種類の歩行相とし、時系列データに対する歩行相の分類を行うモデルを構築した。足部に装着されたIMUから得られた信号に対し正規化・オフセット除去を行い、固定長の窓幅で切り出した信号をモデルへの入力として用いた。モデルの出力として、各時刻につき4種類の歩行相それぞれに属する確率が得られ、歩行相の遷移が生じた時刻を歩行事象として検出した。歩行相分類モデルにはU-Net、双方向LSTM(Bi-LSTM)を用いた。

4. 片麻痺者模擬歩行における歩行事象検出法の検討

U-Net、Bi-LSTMにおいて、健常者歩行(9名)のみで学習したモデル(Model H)、健常者歩行(9名)および模擬歩行(4名)で学習したモデル(Model

H&S-Hemi)、健常者歩行と模擬歩行の被験者数を等しくして学習したモデル(Model H(4)&S-Hemi)、模擬歩行(4名)で学習したモデル(Model S-Hemi)、Model Hを模擬歩行(4名)でファインチューニングしたモデル(Model H+FT)の5種類のモデルを検証した。なお、学習データに模擬歩行を含むモデルは leave-one-subject-out 交差検証を行った。

ストライドの誤検出率は、U-Net, Bi-LSTM 共に Model H, H(4)&S-Hemi において 96%以上であった。これらのモデルの全歩行事象の検出時刻の誤差は、いずれも平均約 2 ms – 約 14 ms となった。これらの結果より、健常者歩行のみで学習した Model H は比較的高い検出率と小さい検出誤差であることが確認できた。また、U-Net と Bi-LSTM の検出精度に大きな違いは見られなかった。

5. 片麻痺者歩行における歩行事象検出法の検討

片麻痺者 4 名の AFO なし/ありの歩行を対象に評価を行った。ストライドの検出率は、AFO の有無にかかわらず、U-Net, Bi-LSTM 共に Model H, H&S-Hemi, H(5)&S-Hemi において約 100%であった。これら 3 種のモデルの全歩行事象の検出時刻の誤差は、AFO なし歩行では平均約-35 ms – 約-82 ms でリファレンスよりも早く、U-Net よりも Bi-LSTM の方が大きい誤差の傾向が見られた。全体的に検出が早まった原因の 1 つとして、歩行相が遷移する条件が挙げられた。本研究では現在と次の歩行相の確率が逆転した時刻と定めており、両者が同程度の状態での遷移には問題があると考えられる。一方 AFO あり歩行では、平均約-1 ms – 約-30 ms となり、特に Model H は 5 種類のモデルの中で最小だった。AFO あり歩行における Model H の 4 事象の検出誤差の分布を図 1 に示す。いずれの歩行事象においても誤差の平均値の絶対値は約 20 ms 以下であり、U-Net, Bi-LSTM 間の差も約 20 ms 以下であった。このように、AFO ありの片麻痺者歩行では Model H の検出誤差が特に小さく、U-Net と Bi-LSTM の検出精度は同程度であった。しかし、図 1 に示すように TO 検出では誤差のばらつきが大きく、これは AFO の可動域の個人差の影響が考えられる。

健常者歩行および片麻痺者歩行(AFOあり)における足部 IMU の矢状面角速度と感圧センサによる歩行事象検出時刻との対応関係をストライド毎に正規化し、HO を例に図 2 に示す。図のように、両者の対応関係が健常者歩行と片麻痺者歩行(AFOあり)で類似している傾向が見られた。これは、歩行事象検出というタスクにおいて、Model H が学習データとは異なる歩行に対しても比較的高精度で検出可能であった要因として考えられる。

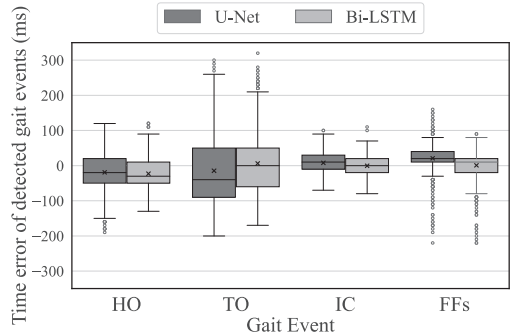


図 1 片麻痺者歩行(AFOあり)における Model H の各歩行事象検出時刻誤差 (ms)

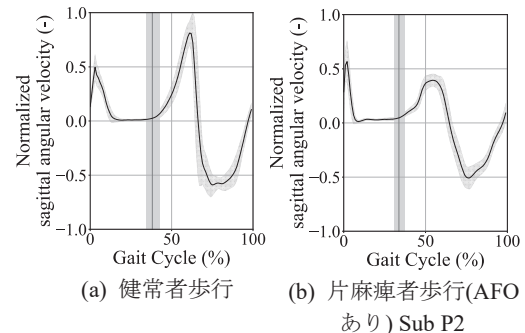


図 2 足部 IMU の矢状面角速度と感圧センサによる歩行事象(HO)との対応例

6. まとめ

本研究では、健常者歩行および健常者による片麻痺模擬歩行を学習データとし、足部慣性センサ信号による深層学習を用いた 4 種類の歩行事象検出方法の検討を目的とした。健常者歩行のみの学習モデルが片麻痺者歩行に対しても比較的高精度で検出可能であり、特に AFO あり歩行では 5 種類のモデルの中で最小の検出誤差であった。片麻痺者歩行における 4 事象を検出することで、患者らの簡便なモニタリングだけでなく、歩行分析と機能的電気刺激による歩行トレーニングを同時に行うなど、様々なデバイスに応用できる可能性がある。

文献

- 1) Fu-Cheng Wang et al., Realtime detection of gait events by recurrent neural networks. IEEE Access, Vol. 9, pp. 134849–134857, 2021.
- 2) Yu Lou et al., IMU-based gait phase recognition for stroke survivors. Robotica, Vol. 37, No. 12, pp. 2195–2208, 2019.
- 3) Taiki Ogata et al., Foot trajectory features in gait of parkinson’s disease patients. Frontiers in physiology, Vol. 13, p. 726677, 2022.

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
斎藤 浩海	西山 大樹	佐藤 茂雄
金井 浩	田中 和之	吉田 真人
堀尾 喜彦		

令和5年7月20日 作成 令和5年7月21日 発行 東北大学電通談話会記録 第92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