

氏名（本籍）	そのだ こうたろう 蘭田 光太郎（福島県）
学位の種類	博士（情報科学）
学位記番号	情博第316号
学位授与年月日	平成17年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科、専攻	東北大学大学院情報科学研究科（博士課程）システム情報科学専攻
学位論文題目	放送型配信に適した音楽信号用電子指紋の研究
論文審査委員	（主査）東北大学教授 鈴木 陽一 東北大学教授 静谷 啓樹 東北大学教授 牧野 正三 東北大学助教授 西村 竜一 （工学研究科）

## 論文内容要旨

### 第1章 序論

不特定多数の利用者を想定した同時放送型配信時の「電子指紋」を実現する方式として、東京大学の青木らにより CoFIP (Content FIngerPrinting) 方式が提案されている。この方式では、オリジナルコンテンツを複数の「部品」と部品要素以外の「主体部」で構成されているものと想定し、ユーザにわからない微少な変化を与えた各「部品」全てと主体部をまとめて放送型配信する。その「部品」に与えた変化の組み合わせから個体化を図るので、部品毎に  $N$  通りずつの変化を与えれば、 $N$  (部品数) 人のユーザを相手に独立した指紋が付されたコンテンツを与えることが可能となる。ユーザは、別途入手した鍵 (CoFIPkey) に基づき、そのうちの一つのみを合成できるようにする。これにより、コンテンツに電子指紋が付され、個体化が実現される。

本論文では、音楽信号の放送型配信における電子指紋として、この CoFIP 方式を音楽信号に適用することにより、次世代ネットワークを担う放送型配信における音楽信号用電子指紋の埋め込み、検出を含むシステムを実現することを目的とし、そのために必要な電子透かし手法の埋め込み手法、検出手法の検討、および実用化を念頭に置いた配信方法について検討を行う。

### 第2章 音楽信号における CoFIP 方式の実現

CoFIP 方式を音楽信号で実現するためには、音楽信号中の「部品」となるべき要素を定めなければならない。そこで、音楽信号の時間周波数平面を画像にみだてて、特徴的な領域を「部品」オブジェクトとして扱い、部品を抜いた全領域を主体部として扱うこととした。このような部品抽出・分離の方略は、コンテンツ利用者が指紋構成情報を含む部品オブジェクトを集めずに主体部のみで利用することを試みた場合において、オリジナルコンテンツから大幅に劣化されたコンテンツを作成させることができる、という点でも、電子指紋実現方法として有効であると考えられる。また、部品に与える特徴付け操作としては、これまで提案されてきた音信号用電子透かしを使用することにする。

ただし、上述した部品信号は、時間的にも、周波数的にも局在した信号である。したがって、埋め込み・検出処理に広い周波数帯域を必要とする手法は適用できない。これまでに提案された手法の主なアプローチである、低位ビットの置換を用いた手法、ディザ信号を用いた手法、エコーを用いた手法、位相の変形を用いた手法、ス

ベクトル拡散変調を用いた手法をそのような観点で検討すると、位相の変形を用いた手法が最も CoFIP への適用に親和性があると考えられる。また、エコー法とスペクトル拡散変調を用いる方法も、上述の問題点を回避軽減できるならば、CoFIP への適用が可能である。

位相の変形を用いた手法では、原信号の位相を置き換えるため、原信号において存在していた周波数方向の相対的な位相関係を大きく変えることになり、それがひずみとして知覚されるという問題を抱えている。この問題を解決する手法として、東北大学の西村らによる周期的位相変調法が提案されている。この手法では、原信号の位相を置き換えるのではなく、位相に対して周期的な位相遅延を加えるものである。したがって、原信号の位相特性は徐々に変化が加えられることになり、ひずみとして知覚されることはなくなる。

### 第3章 周期的位相変調法を用いた音楽信号用 CoFIP の提案

本章では、音楽信号用 CoFIP における部品への指紋構成情報の埋め込み手法として、周期的位相変調法の適用を検討した。音楽信号用 CoFIP で想定している部品は、時間周波数平面の中に局在した信号であるため、周期的位相変調法は音楽信号用 CoFIP に親和性のある電子透かし手法と期待された。ただし、音楽信号用 CoFIP における検出処理には、オリジナル信号の参照をせずに検出を行う、ブラインド検出が望まれるが、周期的位相変調法では、ブラインド検出法が実現されていない。そこで、ホストである音楽信号中の定常音成分の存在に着目した、周期的位相変調法のブラインド検出手法を提案した。周期的位相変調法を施された信号の定常音成分における位相特性は、ある時刻のホスト信号の位相特性に、周期的位相変調による位相遅延と、時間経過による位相遅延が加わった形とみなすことができる。したがって、その時間的な差分から、周期的位相変調によって与えられた位相変調パターンの時間差分を得ることが可能となる。設定した位相変調パターンは正弦波的なものであるから、時間差分の形になっても、埋め込まれた位相変調の周期を正しく検出できるはずである。また、埋め込みフィルタを平坦な群遅延特性をもつように設計することで、時々刻々の定常音の移り変わりに対応できるようにした。通常の音楽に対して全帯域に埋め込みを行なった場合には、ブラインド検出が可能であることを示唆する結果を得た。しかし、音信号 CoFIP に適用するために帯域を狭めた信号への埋め込みを行った場合には、ブラインド検出が困難であることがわかった。広帯域な信号を CoFIP における部品として使用すると、部品数を多く取れなくなるため、電子指紋構成情報である透かしを埋め込めるビットレートが低下するばかりでなく、配信時のデータサイズも大きくなる。このような理由から、音楽信号用 CoFIP の実現に周期的位相変調を用いるのは、必ずしも最適ではない。

しかし、電子指紋の性質上、オリジナル信号を参照せずに指紋検出を行えるブラインド検出の要求は高い。そこで、次章では完全なブラインド手法では無いものの、PN 系列を検出鍵として用意することで、非常に高い検出性能を持つエコー拡散法を音信号 CoFIP に適用することを検討する。

### 第4章 エコー拡散法を用いた音楽信号用 CoFIP の提案

本章では、音信号用 CoFIP における部品の変形に用いるために、エコー拡散法の適用を検討した。エコー拡散法は東北大学の高らにより提案された手法であり、従来のエコー法のカーネルである単一エコーを PN 系列を用いて時間的に拡散させたものをカーネルとして利用する。埋め込みの対象とする信号が広帯域にわたって振幅スペクトルを持つことで、より高い検出性能が望めることから、CoFIP 方式の適用にあたり、部品領域の抽出には、広帯域をサポートする解析窓として Daubechies ウェーブレットを用い、時間周波数平面に展開を行い、部品と主体部の分割を行うこととした。

また、実現した音楽信号用 CoFIP の、各種信号処理攻撃に対する電子指紋検出耐性の評価実験、及び聴取実験による音質評価実験を行った。検出耐性については、STEP2000 プロジェクトで検査項目に挙げられた攻撃と同様の攻撃を行ったところ、ピッチ伸縮攻撃以外の攻撃に対しては十分な耐性が示された。ピッチ伸縮攻撃は、エコー拡散法が元来弱点とする攻撃であるため、高の提案しているように、透かし検出の際の自己相関処理を対

数スケーリングした周波数軸上で行うことによって検出耐性を高めることが可能と考えられる。音質評価実験については、限られた条件での簡易実験ではあったが、本章で実現した音信号用 CoFIP が、オリジナル信号の聴取品質を衰えさせないものであることを示した。

## 第5章 音楽信号用 CoFIP の性能改善に関する検討

本章では、前章までに実現した音楽信号用 CoFIP において、実用化に際して残された課題として、配信データの小容量化と、個体化コンテンツの結託攻撃に対する対策を検討した。

配信データの小容量化については、配信データ中の部品信号表現における時間軸方向、周波数軸方向にある冗長性に着目し、その各々を排除することで小容量化が可能となる。特に周波数軸方向における冗長性を排除するために、本章では、電子透かしの埋め込みをウェーブレット係数上で行うことを提案した。一般の音楽信号は比較的周波数帯にパワーが集中することから、ウェーブレット係数で表現することにより部品信号に割かれるデータ容量を大幅に抑えることができる。計算機による評価実験の結果、検出性能に大きな低下を及ぼさずに配信データを小容量化できることが確認できた。

また、結託攻撃に対する対策として部品信号に畳み込むエコーカーネルの位相を透かしパターンごとに相異なるものにするすることで、結託があった場合に、部品信号の直接波成分を弱めることとした。この操作によりオリジナル信号の主要成分であった部品信号は劣化され、結託して新たに作られるコンテンツの品質を大きく劣化させることが可能となる。結託コンテンツに対する聴取実験のまた、結託攻撃に対する対策として部品信号に畳み込むエコーカーネルの位相を透かしパターンごとに相異なるものにするすることで、結託があった場合に、部品信号の直接波成分を弱めることとした。この操作によりオリジナル信号の主要成分であった部品信号は劣化され、結託して新たに作られるコンテンツの品質を大きく劣化させることが可能となる。結託コンテンツに対する聴取実験の結果、オリジナルコンテンツからの劣化が容易に検知されることが確認され、結託攻撃に対する対策として有効であることが示唆された。

## 第6章 結論

以上、本論文では、音楽信号コンテンツの放送型配信において、電子指紋を実現するシステムの構築を目標にした上で、CoFIP 方式に基いた電子指紋の発行、検出を可能とする音楽信号用 CoFIP の開発を行った。第3章、第4章を通じて実現した音楽信号用 CoFIP システムは、検出性能、聴取品質、ともに良好であり、第5章で行った実用化を想定した検討を通じた提案システムの性能改善から、本論文で掲げた目的は、ほぼ達成できたものと考えられる。

「利用者の管理を可能とする電子指紋のコンテンツへの埋め込み」と「ネットワーク帯域の効率的利用を可能とするデジタルマルチメディアの放送型配信システム」という、2つの課題は、音楽信号に留まらずあらゆるマルチメディアコンテンツにおいて、これまで相容れない課題であり、未だ、実現したシステムは実用に到っていない。しかし本論文を通じて、これら2つの課題は両立して達成できることが証明され、今後の、コンテンツ産業の発展に大きく寄与できたと考えられる。

## 論文審査の結果の要旨

近年の情報通信技術の発展に伴うネットワーク配信の急速な広まりにより、デジタルコンテンツの著作権保護の必要性が高まっている。そのための有効な方法として、個々のコンテンツの配送先ごとに異なる電子透かし情報を付与する電子指紋が考えられる。しかし、放送型配信においてこれを実現するのは困難であった。そこで著者は、音楽信号の放送型配信において電子指紋を付与する技法について研究を行った。本論文は、その研究成果をまとめたものであり、全編6章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、画像信号の放送型配信において電子指紋を実現する技術として提案された CoFIP (Content FingerPrinting) の原理を紹介し、音信号についても時間・周波数平面での信号処理を導入することにより、CoFIP の考えに基づいて電子指紋が実現できることを初めて示している。

第3章では、CoFIP の原理を音情報信号に対して適用するために、信号を短区間フーリエ変換して時間-周波数平面で表現することを着想し、時間・周波数平面で局在する信号に透かしを埋め込むのに適した手法として周期的位相変調法を採用し、音信号用 CoFIP を実現している。さらに、原音信号を参照せずに電子指紋情報を抽出するブラインド検出手法について提案している。

第4章では、電子指紋の照会を行う際に秘密鍵の使用が許される場合を想定し、PN 系列を用いた電子透かし埋め込み法であるエコー拡散法と Wavelet 変換とを組み合わせた、新たな実現法を提案している。また、計算機シミュレーションにより、高い検出性能と攻撃耐性が実現できていることを示している。これは、実用的な技法の提案として高く評価できる。

第5章では、前章の提案法の問題点の解決法を提案している。配信データサイズの増大に対し、Wavelet 係数に対して直接エコー拡散処理を行い、時間軸信号に変換しないまま配信することで配信データサイズを大幅に削減している。また、結託攻撃に対する脆弱性に対し、個々の配信データの位相を違えることで、結託攻撃時に音質劣化を生じさせるという、有効な対策を考案している。これは、音信号用 CoFIP の実用化に向けた提案として評価できる。

第6章は、結論である。

以上要するに本論文は、デジタル音信号の放送型配信を行う際に、電子指紋を実現する技法の提案を行い、その有効性を示すとともに実用化のための検討を行ったもので、システム情報科学ならびに音情報工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(情報科学)の学位論文として合格と認める。