

令和 5 年 5 月 9 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04467

研究課題名（和文）グラフ領域でのスペクトル拡散処理に基づくグラフ信号電子透かし技術の研究開発

研究課題名（英文）A research on graph watermarking via graph spread spectrum techniques

研究代表者

宇戸 寿幸（UTO, Toshiyuki）

愛媛大学・理工学研究科（工学系）・准教授

研究者番号：90380261

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：鋭い自己相関を有するグラフ拡散符号の生成法ならびに画像・メッシュモデル向けの電子透かし法を研究開発した。主として、(1)有向グラフにおけるスペクトル拡散符号の生成法と(2)グラフ構造を持つ三次元メッシュの電子透かし手法を提案した。さらに、これらの研究に応用できる(3)画像特徴に応じた画像電子透かし手法を提案した。これら3つの手法の有効性を計算シミュレーションにより明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スペクトル拡散技術は一次元空間や二次元空間において主に研究され、各次元領域での拡散符号が生成・応用されてきた。そこで、本研究ではグラフ領域でのスペクトル拡散技術の研究に焦点を当て、優れた自己相関特性を持つグラフ拡散符号の生成や性質を解明することに取り組んだ。結果として、サイクルグラフの生成法や有向グラフの性質を明らかにした。これらの知見からグラフ拡散符号の研究開発を進展するための基礎を構築できた。また、グラフやメッシュモデルを対象とした電子透かし手法も開発した。これらの知見は身の回りにあるアニメやCG等の著作権保護に活用でき、データの安全安心な流通を促進する効果を発揮する。

研究成果の概要（英文）：This study focuses on digital watermarking via graph spread spectrum techniques. Main contributions of this work are three-fold: 1) generation methods of graph spread codes, 2) watermarking schemes for 3D mesh models, and 3) watermarking algorithms for images. I presented the aforementioned approaches and demonstrated their validity.

研究分野：工学

キーワード：電子透かし 情報隠蔽 グラフ処理 スペクトル拡散 三次元メッシュ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

スペクトル拡散技術は、電子透かしや通信方式、レーダ、ソナーなどに応用される信号処理技術である。これらの対象信号は一次元の時系列信号や二次元の空間信号であるため、スペクトル拡散を実装する拡散符号として一次元または二次元である拡散符号の生成法や応用法が研究されてきた。一方で、映画やゲームで活用されているポリゴンメッシュまたは交通網やIoTセンサなどのネットワークはグラフを用いて表現され、グラフ情報やグラフ信号と呼ばれる。このグラフはグラフ信号処理技術の発展に伴って普及が進行しており、グラフ信号を対象とした著作権保護技術の必要性が増している。

これまで、音声や静止画像、動画像を保護対象としたセキュリティ技術に関する研究論文が発表されている。しかし、グラフ信号を保護対象とした研究は僅かであり、その解決手段としてグラフ領域でのスペクトル拡散技術に着目した研究は無い。その結果として、グラフ信号を対象とした保護手法の性能が十分に評価されず、性能要因も解明されないまま残されている。そのため、スペクトル拡散能力を有するグラフ信号処理技術の研究開発が求められていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、グラフ信号の周波数特性を操作することによりグラフ拡散符号を生成し、生成したグラフ拡散符号を透かし情報として埋め込むことにより知覚され難く頑健なグラフ電子透かしを開発することである。より具体的な目的は、グラフにより表現される情報を効果的に保護する技術を解明するために、(i)鋭い自己相関を有するグラフ拡散符号の生成法、(ii)生成された拡散符号によるグラフ信号への挿入法・検出法、さらに、(iii)周波数領域での生成された拡散符号のグラフ信号への挿入法・検出法を考案することである。

グラフ領域でのスペクトル拡散を要素技術として、優れた埋め込み能力・検出能力を併せ持つグラフ信号用途の電子透かし技術を開発することにより、三次元メッシュモデルに代表されるグラフ情報の保護技術を確立する役割を担うことが、本研究の大きな目的である。

3. 研究の方法

グラフ拡散符号はグラフのノードとエッジ、エッジに付与される重み、ノードに付与される信号値によって定義される。信号値以外は保護対象のグラフ信号により与えられるので、信号値をどのように導出するかがグラフ拡散符号における設計問題となる。

本研究では、空間的自己相関および非スパース性を評価基準として優れたグラフ拡散符号の生成法を開発し、そのグラフ拡散符号を透かし情報とした電子透かし法を開発する。以下において、個別に研究方法の詳細を記述する。

(1)有向グラフ上での拡散符号の生成法

まず、有向グラフの一種であるサイクルグラフ上でのグラフ拡散符号の生成法から始める。このサイクルグラフの知見を参考として、少ないノード数で構成される有向グラフ上でのグラフ拡散符号の生成法や性質を導出できる可能性がある。

本研究では、チャープ系列の一種であるスミア系列を信号値として持つサイクルグラフは理想的な空間的自己相関を有することを実証する。そして、そのスミア系列から生成されるグラフ信号を初期値とした最適化により、小さいグラフ上での空間的自己相関を分析し、優れた空間的自己相関を有するグラフ信号の性質を解明する。

(2)三次元メッシュを対象とした電子透かし

メッシュモデルはノードとエッジにより構成されるグラフの一種である。この三次元メッシュの保護技術として射影したヒストグラムを操作する手法が主流となっており、ヒストグラムを複数生成することで透かしの頑健性や情報量を増加できる可能性がある。また、三次元メッシュのクラウドサーバを介したデータ管理においてセキュリティを強化した暗号領域の電子透かし手法が注目されており、グラフに特有のエッジ情報を活用することで情報劣化を低減できる可能性がある。

本研究では、保護対象となるメッシュモデルから異なる特徴を有する2つのヒストグラムの生成法ならびにスペクトル拡散符号の埋め込み法を開発する。そして、透かし情報を埋め込まれた三次元メッシュの劣化度合いを評価する。また、メッシュモデルを暗号化した後、可逆情報隠蔽を用いたエッジへの透かしの挿入法を開発する。

(3)画像を対象とした電子透かし

一般画像は非定常信号であるため、画像の特徴に応じて透かし情報を埋め込む、または、抽出することにより電子透かし性能を向上できる可能性がある。特に、画像は大部分が低周波数成分であり、エッジ情報から領域ごとに分割すれば領域内では変動が少ない点とスパースな高周波数成分を分離すれば少ないインパルス信号の集合体が残差として残る点に着目する。

本研究では、Watershed (分水嶺) アルゴリズムにより画像領域を分割した電子透かし手法ならびにモルフォロジー成分分析によりスパース成分と非スパース成分に分割した電子

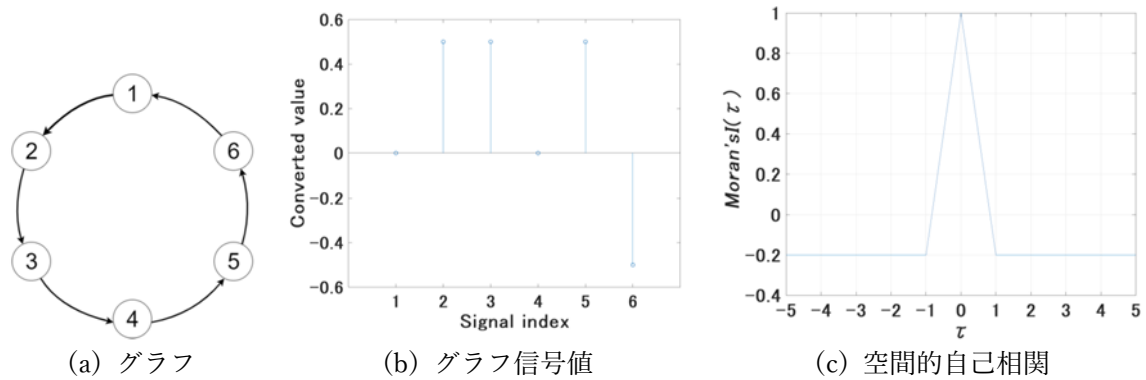


図1 スミア系列を信号値とするサイクルグラフ (ノード数6).

透かし手法を開発する. そして, JPEG 圧縮などの攻撃に対する電子透かしのロバスト性を評価する.

4. 研究成果

グラフ領域でのスペクトル拡散処理に基づくグラフ信号電子透かし技術の研究開発を通して得られた成果を個別に記述する.

(1)有向グラフ上での拡散符号の生成法

スミア変換により生成した実数スミア系列を信号値とするサイクルグラフ信号を生成し, この信号の空間的自己相関が理想的, つまり唯一のピークを持ち, そのピーク以外は0であることを証明した.

図1(a)はノード数6のサイクルグラフ, 図1(b)は各ノードに割り当てたスミア系列, 図1(c)は生成したグラフ信号の空間的自己相関をそれぞれ表す. 図1(c)から生成したグラフ信号が理想的な空間的自己相関を有することを明らかとした. ノード数が6以外の場合にも, 理論的には理想的な空間的自己相関を持つことを確認しており, 鋭いピークを持つグラフ信号の一生成法を開発できた.

一方で, サイクルグラフにエッジを加えて生成したグラフにおいては理想的な空間的自己相関が得られないことも確認していた. そこで, どういったグラフ, つまり, ノード数が幾つで, エッジがどういう接続であれば理想的な空間的自己相関を持つのかを, 頂点数がノード数が12以下の有向グラフ全てに対する最適化により調査した. 信号値を複素数値とした場合, グラフの頂点数が4の剰余に応じて信号値の偏角が各象限に存在する個数に特徴的な性質があることを発見し, 2つの性質を仮説として導出した. これらの仮説は12以下の有向グラフ全てにおいて成り立つことを明らかにした.

(2)三次元メッシュを対象とした電子透かし

メッシュモデルから2つのヒストグラムを生成し, 各ヒストグラムのビンを移動させることにより透かし情報を埋め込み, 検出する電子透かし手法を開発した. 4種のメッシュモデルに対して, 1つのヒストグラムのみを用いた従来法と比べて, 提案法による相関値が高くなることを明らかにした. 結果として, ヒストグラムを複数用意することによって, 三次元メッシュの透かし情報が頑健になることを実証した.

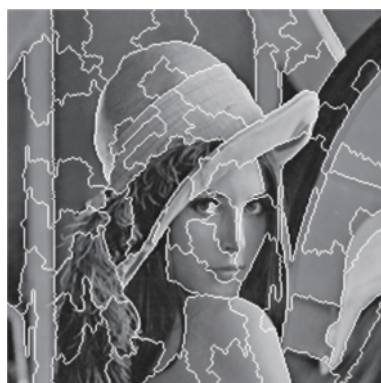
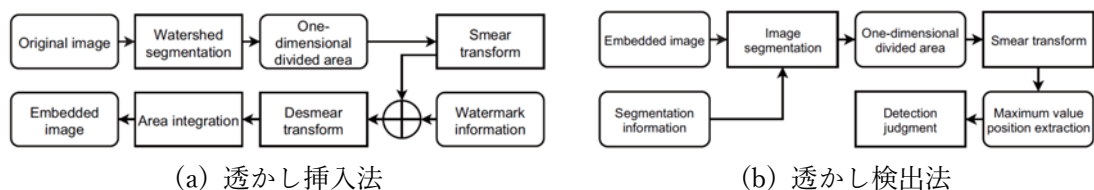
また別に, メッシュモデルの接続情報を活用して, 暗号領域において電子透かしにより保護する隠蔽手法を開発した. 三次元メッシュのエッジに透かし情報を埋め込むことによって, ノードに埋め込む従来法に対して, 提案法は無損失で透かし情報を抽出できることを明らかにした. 結果として, ノードの代わりにエッジに埋め込むことの有用性を実証した.

(3)画像を対象とした電子透かし

電子透かしの埋め込み処理の前に Watershed アルゴリズムを採用し, 画像を領域分割した領域ごとに透かし情報を挿入する電子透かし手法を開発した. 図2(a)および図2(b)は提案する電子透かしの挿入処理および抽出処理を示す. なお, 図2(a)における Watershed を電子透かし技術に組み入れている点の特徴であり, 図2(c)は $8 \times 8 = 64$ 領域に Watershed アルゴリズムを用いて領域分割した Lena 画像を示す.

正方形領域に64領域分割した従来法と比べて, Watershed により領域分割し拡散符号を透かし情報として埋め込んだ提案法は透かし挿入による画質劣化を PSNR で $0.4 \sim 0.9$ [dB]程度低減できることを明らかにした.

さらに, スペクトル拡散符号の相関特性がピークを持つインパルス信号である点と一般画像が低周波成分と少量のインパルス成分により構成される点を踏まえて, モルフォロジー成分分析によりホスト画像(保護画像)の影響を削減する電子透かし手法を開発した. 図3は提案する電子透かし処理を示す. なお, 図3において透かし信号がインパルス信号であることから, 検出側においてスパースモデリングのモルフォロジー成分分析によりホスト信号干渉を低減した透かし抽出処理を提案している.



(c) 64 領域への分割画像

図 2 Watershed アルゴリズムに基づく電子透かし手法.

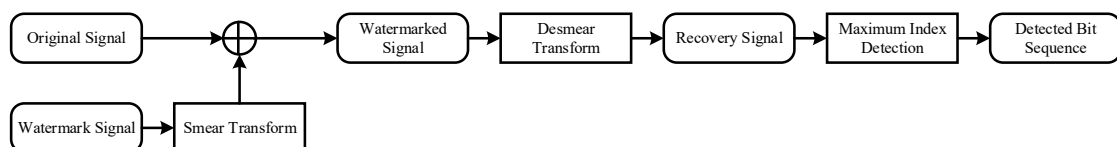


図 3 モルフォロジー成分分析に基づく電子透かし手法.

このモルフォロジー成分分析を利用することにより、単なる逆変換で構成される従来法よりも提案法の透かし検出性能は高くなることを明らかにした。例として、埋め込み容量が 1024[bit] の場合に、従来法が 72[%] 程度しか検出できないのに対して、提案法は 88[%] 程度も検出できていることから、モルフォロジー成分分析によるホスト信号干渉の削減が電子透かし性能の向上に重要であることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 徳永 篤也, 宇戸 寿幸
2. 発表標題 有向グラフ上での拡散符号生成
3. 学会等名 令和3年度電気・電子・情報関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Yamada, Atsuya Tokunaga, Hiroki Okazaki, and Toshiyuki Uto
2. 発表標題 Spread Spectrum Based Image Watermarking with Morphological Component Analysis
3. 学会等名 2022 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Atsuya Tokunaga, Kazuki Hasegawa, and Toshiyuki Uto
2. 発表標題 Graph Spread Code Generation Method Based on Smear Transform
3. 学会等名 2021 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Yamada, Kazuki Hasegawa, and Toshiyuki Uto
2. 発表標題 Reversible Data Hiding with Embedding in Connectivity Data for Encrypted 3D Models
3. 学会等名 2021 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuki Hasegawa and Toshiyuki Uto
2. 発表標題 Image Watermarking Based on the Watershed Segmentation
3. 学会等名 35th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naoki Kashida, Kazuki Hasegawa, and Toshiyuki Uto
2. 発表標題 3-D Mesh Watermarking Based on Optimized Multiple Histograms
3. 学会等名 35th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shota Moriguchi and Toshiyuki Uto
2. 発表標題 Robust Image Hashing Based on Wavelet Decomposition
3. 学会等名 37th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroki Inatsuki and Toshiyuki Uto
2. 発表標題 Graph Wavelet Convolutional Network with Graph Clustering
3. 学会等名 37th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

愛媛大学工学部情報工学科 | 宇戸研究室
<http://aiweb.cs.ehime-u.ac.jp/~uto/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------