

令和元年6月13日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06359

研究課題名(和文)ベクトル信号処理に基づく三次元メッシュ電子透かし技術の研究開発

研究課題名(英文)A research on 3D mesh watermarking techniques via vector signal processing

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)：三次元メッシュの次元数を踏まえたベクトル信号処理に基づく電子透かし技術を研究開発した。主に、メッシュモデルを保護対象とした3種の手法、(1)高域通過フィルタに基づく手法と(2)低域通過フィルタに基づく手法、(3)ヒストグラム操作に基づく手法を提案した。さらに、これらの研究を通して得た知見から着想して、(4)フーリエ変換やウェーブレット変換を用いた画像・グラフ信号を保護対象とした手法も提案した。これら4つの手法の有効性を計算機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

研究成果の学術的意義は、(1)既に発展を遂げている音声・二次元画像向けの電子透かしではなく、三次元画像向け電子透かしを研究して複数種類の有効な手法を開発した点と(2)一次元や二次元の信号処理手法ではなく、三次元空間を考慮した三次元メッシュ向けのベクトル信号処理を研究して三次元信号処理の有効性を実証した点にある。一方で、社会的意義として、三次元メッシュ電子透かしの研究成果から、コンテンツ保護技術である電子透かしの性能向上および基盤理論という結果が得られた。また、これらのセキュリティ機能強化により、本研究成果には三次元画像の普及を促進するという意義があった。

研究成果の概要(英文)：This study focuses on digital watermarking techniques via vector signal processing for 3D meshes. Main contributions of this work are quadripartite: (1) a watermarking scheme based on a highpass filter, (2) a watermarking method via lowpass filtering, (3) a watermarking method based on histogram shifting, and (4) watermarking schemes via the Fourier transform or a wavelet transform. 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 三次元メッシュ スペクトル拡散 ウェーブレット変換 ベクトル信号処理

1. 研究開始当初の背景

三次元メッシュモデルは頂点や辺、面の集合により定義される三次元形状情報であり、コンピュータグラフィックス分野においてはポリゴンメッシュとも呼ばれる。この三次元メッシュモデルは映画やゲーム等の三次元情報として活用されており、情報普及に伴って著作権保護の必要性が増している。一方、三次元メッシュモデルは音楽や画像といった他のメディア情報と比べて製作コストが高いため、三次元メッシュモデルは保護する価値の高い情報である。

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論文が発表されている。しかし、三次元メッシュモデルを対象情報として数理的手法に基づき分析している研究は僅かである。その結果として、三次元メッシュモデルを対象としたコンテンツ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。また、一次元空間や二次元空間上での信号処理が多用されており、三次元空間を活用したベクトル型の信号処理手法による情報隠蔽の研究は数少ない。その結果として、三次元メッシュモデルを対象とした保護手法の性能改善が制約されており、三次元情報をまとめて処理するベクトル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、三次元座標に対するベクトル信号処理を礎として三次元メッシュモデルを対象とした電子透かし手法を解析することによって、理論的に確立された効率的な電子透かし技術を開発することである。より具体的な目的は、三次元メッシュモデルの著作権を保護するために、三次元上での(1)スペクトル拡散により知覚され難く頑健な情報の生成法、(2)相関係数により検出し易い情報の検出法、(3)多重解像度解析により埋め込み可能な情報量を増大した透かし埋め込み法を開発することである。

優れた埋め込み能力・検出能力を併せ持つ三次元メッシュモデル用途の電子透かし技術を開発することによって、まだ確立されていない三次元モデルの保護技術を提案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

三次元メッシュモデルは、頂点位置に関する座標情報および平面を形成する頂点集合に関する接続情報により構成される。この座標情報は x 軸、 y 軸、 z 軸に関する3つの実数の組 (x, y, z) から成り、電子透かしではその座標情報を (x, y, z) を操作することによって署名情報を透かし情報として埋め込む。

本研究では、三次元座標情報を次元毎ではなく、その次元をまとめて処理するベクトル信号処理による数学的なアプローチから三次元画像処理を構築することを通して、汎用的かつ高効率な三次元メッシュモデル電子透かし技術を開発する。以下において、個別に研究方法の詳細を記述する。

(1)高域通過フィルタに基づく手法

三次元メッシュモデルは、音声や二次元画像と同様に、高周波成分が少なく、低周波成分が多い特徴を有している。そのため、保護対象であるポリゴンメッシュ情報の高周波成分に透かし情報を挿入することにより、電子透かしの埋め込み性能や検出性能を向上できる可能性がある。

本研究では、電子透かしの検出処理に高域通過フィルタを組み込んだ電子透かし手法を開発する。さらに、この検出処理に最適となる署名インパルス信号の導出方法も開発する。そして、高域通過フィルタに基づく電子透かし法のロバスト性を評価する。

(2)低域通過フィルタに基づく手法

三次元メッシュモデルに透かし情報を埋め込むと、その部分のモデル形状が変形するため電子透かし処理は画質劣化の原因となる。特に、透かし情報を一様に挿入すると特徴的な形状変形となり、画質劣化が顕著となる。そのため、透かし情報を非一様に変更することにより、電子透かしの画質を向上できる可能性がある。

本研究では、透かし情報を低域通過フィルタに適用することにより、三次元空間上で滑らかな形状とする透かし生成法を開発する。この非一様な透かし情報を三次元空間内で三次元メッシュモデルに付加する電子透かし埋め込み法を開発する。そして、低域通過フィルタに基づく電子透かし法の画質とロバスト性を評価する。

(3)ヒストグラム操作に基づく手法

研究分野にて注目されているメッシュ電子透かし手法として、保護対象モデルの三次元空間内での第一主成分を軸として作成したヒストグラムにおける各ビンの大小関係を利用して透かし情報を埋め込む方法がある。この方法でも透かし情報ビットを埋め込む際に、同一のビンに含まれる情報が均等に変更される。そのため、変更対象となる情報を不均一に改良することにより、電子透かしの画質を向上できる可能性がある。

本研究では、同一のビンに含まれる頂点間の距離に応じて移動する情報を選択する手法を考

案し、隣接する座標情報を移動させない評価関数を導入する。この評価関数にパラメータを組み入れることにより、画質と移動量のトレードオフ機能を開発する。そして、ヒストグラム操作に基づく電子透かし法の画質を評価する。

(4)フーリエ変換やウェーブレット変換を用いた画像・グラフ信号を保護対象とした手法

電子透かし研究では変換領域での透かし情報埋め込みが情報隠匿の性能から主流となっており、変換特性が電子透かしの性能を左右する。そのため、優れた特性を有する変換処理を利用することにより、電子透かしの画質やロバスト性、埋め込み情報量を向上できる可能性がある。

本研究では、倍密度デュアルツリーウェーブレット変換やグラフフーリエ変換を活用することにより、画像信号やグラフ信号への効率的な透かし埋め込み法を開発する。そして、これら変換を用いた電子透かし法のロバスト性や埋め込み情報量を評価する。

4. 研究成果

ベクトル信号処理に基づく三次元メッシュ電子透かし技術の研究開発を通して得た成果を個別に記述する。

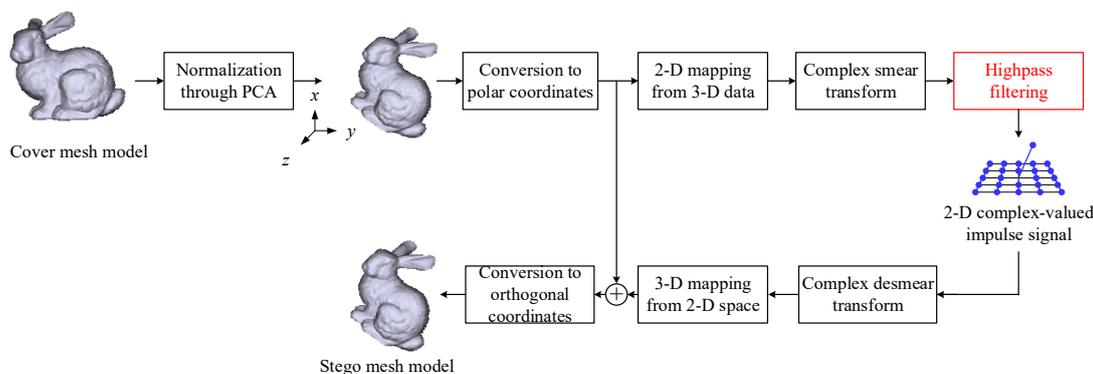
(1)高域通過フィルタに基づく手法

透かし情報の埋め込み処理および検出処理において、高域通過フィルタを採用した電子透かし法を提案し、最適な透かし情報となる署名インパルス信号の生成法を導出した。図1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。図1(b)において、最大値インデックス検出の前に高域通過フィルタ (Highpass filtering) を組み入れている点が特徴である。

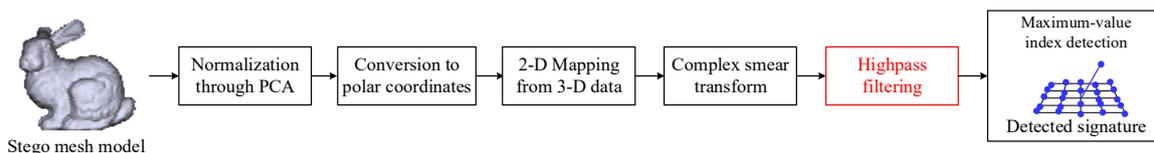
表1は、三次元メッシュモデルの Stanford Bunny (頂点数: 65538, 面数: 131072) に異なる強度 f で透かし情報 7[bit] を埋め込んだモデルから、透かし情報を正しく検出できた割合を示す。なお、従来法は高域通過フィルタを用いていない手法であり、提案法は高域通過フィルタを用いた手法である。提案法の結果は従来法よりも高い検出割合であるため、高域通過フィルタを活用し最適な透かし情報と組み合わせることにより透かし情報の検出性能が向上することを明らかにした。

(2)低域通過フィルタに基づく手法

透かし情報の埋め込み処理において、透かし情報に低域通過フィルタを適用した電子透かし法を提案し、滑らかな形状を保持する透かし情報の埋め込み法を開発した。図2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。図2(a)において、加算器の前に低域通過フィルタ (Smoothing) を組み入れている点が特徴である。



(a) 電子透かし挿入法

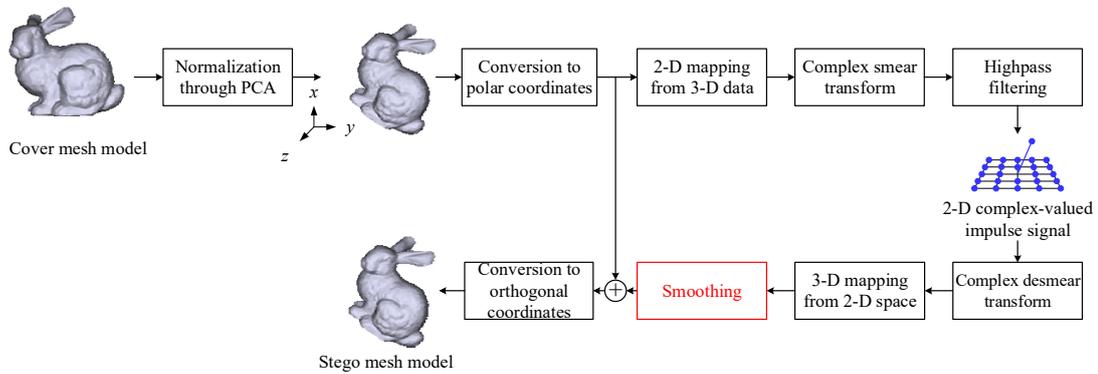


(b) 電子透かし抽出法

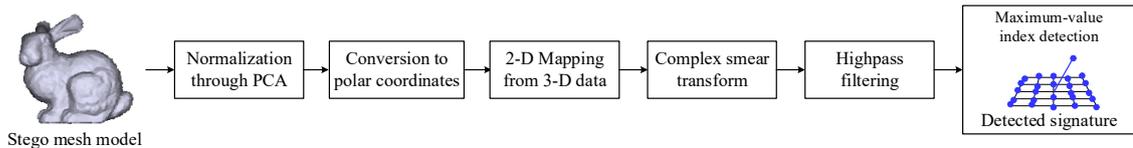
図1 高域通過フィルタに基づく手法

表1 各手法の透かし検出割合

ゲイン強度 f	0.005	0.01	0.02	0.04
高域通過フィルタを用いた提案法	3.9	13.3	52.3	100
高域通過フィルタを用いない従来法	1.6	3.1	10.2	19.5



(a) 電子透かし挿入法



(b) 電子透かし抽出法

図2 低域通過フィルタに基づく手法

表2 各手法の透かし検出割合

ゲイン強度 f	0.013	0.020	0.026	0.033
低域通過フィルタを用いた提案法	22.65	53.12	89.94	100
低域通過フィルタを用いない従来法	21.87	48.43	85.93	100

表2は、三次元メッシュモデルの Stanford Bunny に異なる強度 f で透かし情報 7[bit] を埋め込んだモデルから、透かし情報を正しく検出できた割合を示す。なお、従来法は低域通過フィルタを用いていない手法であり、提案法は低域通過フィルタを用いた手法である。提案法の結果は従来法よりも高い検出割合であるため、低域通過フィルタを活用したことにより透かし情報の検出性能が向上することを明らかとした。

(3) ヒストグラム操作に基づく手法

ヒストグラムにおける隣接ピンの大小関係によって透かし情報を埋め込む処理において、移動頂点の総移動量に加えて隣接頂点の頂点間距離を組み入れた評価関数を提案し、隣接頂点が連続して移動し三次元形状が顕著に変形することを抑制する移動頂点の選択法を開発した。

図3は、三次元メッシュモデルの Stanford Bunny に透かし情報 8[bit] を埋め込んだモデルを示す。なお、従来法は単に移動頂点の総移動量を最小化する頂点選択法に基づく手法であり、提案法は総移動量と隣接頂点間距離から成る頂点選択法に基づく手法である。提案法による透かし埋め込みモデルは従来法による透かし埋め込みモデルよりも原モデルに似ており、従来法により埋め込まれた透かし情報がより顕著となっている。そのため、隣接頂点間距離を考慮することにより、電子透かし挿入による画質劣化が低下し、三次元メッシュモデルの画質が改善することを明らかとした。



(a) 原モデル

(b) 提案法による埋め込みモデル

(c) 従来法による埋め込みモデル

図3 Stanford Bunny モデル



図4 Lena 画像

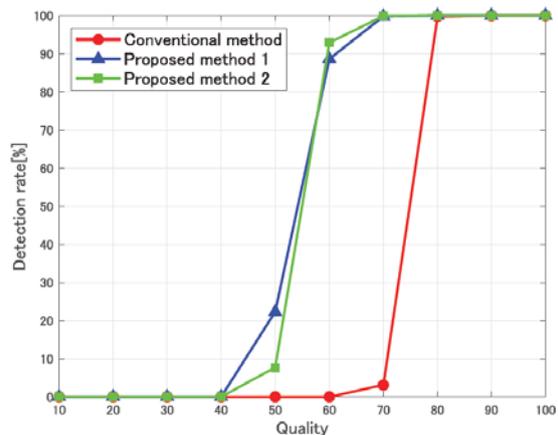


図5 JPEG 圧縮に対する署名検出率

(4) フーリエ変換やウェーブレット変換を用いた画像・グラフ信号を保護対象とした手法

多くの電子透かし研究で利用されてきたウェーブレット変換の代わりに、倍密度デュアルツリーウェーブレット変換を用いた画像電子透かし法を開発した。また、ラプラシアン行列および隣接行列に基づくラグフーリエ変換を用いたグラフ電子透かし法を開発した。

図4は、標準画像のLenaに透かし情報192[bit]を埋め込んだ画像を示す。また、図5はJPEGによる圧縮・解凍をQualityを変えながら施した後に、埋め込んだ透かし情報を正しく検出した割合を示す。なお、従来法はハールウェーブレット変換を用いた手法であり、提案法1は実数型の倍密度デュアルツリーウェーブレット変換を用いた手法、提案法2は複素数型の倍密度デュアルツリーウェーブレット変換を用いた手法である。提案法の結果は従来法よりも高い検出割合であるため、倍密度デュアルツリーウェーブレット変換を活用したことにより透かし情報の検出性能が向上することを明らかとした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

- ① Koki Taniguchi, Toshiyuki Uto, “A 3-D Mesh Watermarking Scheme with Highpass Filter,” Journal of Signal Processing, Vol. 21, Issue 4, 2017, pp. 195-198, 査読有, DOI: 10.2299/jsp.21.195.

〔学会発表〕 (計 11 件)

- ① 松尾友, 宇戸寿幸, “リフティングウェーブレット変換を用いたグラフ電子透かし法,” 平成30年度電気関係学会四国支部連合大会, 2018年9月22日, 愛媛大学 (愛媛県松山市).
- ② Chiho Onuma, Yu Matsuo, Toshiyuki Uto, “Digital Watermarking Method by Graph Signal Processing Using Adjacency Matrix,” In Proc. of the 33rd International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC) 2018, 2018年7月6日, Bangkok (Thailand).
- ③ Ryota Watanabe, Koki Taniguchi, Toshiyuki Uto, “An Image Watermarking Scheme Based on the Double-Density Dual-Tree DWT,” In Proc. of the 33rd International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC) 2018, 2018年7月6日, Bangkok (Thailand).
- ④ Naoki Kashida, Rei Tanaka, Toshiyuki Uto, “Histogram-based 3-D Watermarking with Adjacent Vertex Control,” In Proc. of the 33rd International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC) 2018, 2018年7月6日, Bangkok (Thailand).
- ⑤ 田中伶, 宇戸寿幸, “平滑化を用いた三次元モデル電子透かし法,” 平成29年度電気関係学会四国支部連合大会, 2017年9月23日, 愛媛大学 (愛媛県松山市).
- ⑥ 松尾友, 宇戸寿幸, “スペクトル拡散技術を用いたグラフ電子透かし法,” 平成29年度電気

関係学会四国支部連合大会, 2017年9月23日, 愛媛大学(愛媛県松山市).

- ⑦ Yu Matsuo, Rei Tanaka, Toshiyuki Uto, Kenji Ohue, "A 3-D Mesh Watermarking Technique via a Smoothed Watermark," In Proc. of the 2018 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'18), 2018年3月5日, Hawaii (USA).
- ⑧ Yu Matsuo, Toshiyuki Uto, Kenji Ohue, "Graph Watermarking Method Using Spread Spectrum Technique," In Proc. of the 2018 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'18), 2018年3月5日, Hawaii (USA).
- ⑨ 田中伶, 宇戸寿幸, "ハイパスフィルタを用いた三次元電子透かし法," 平成28年度電気関係学会四国支部連合大会, 2016年9月17日, 徳島大学(徳島県徳島市).
- ⑩ Koki Taniguchi, Rei Tanaka, Toshiyuki Uto, Kenji Ohue, "Multiplicative Watermarking Scheme with Bandlimited Smear Transform," In Proc. of the 2017 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'17), 2017年3月1日, Guam (USA).
- ⑪ Koki Taniguchi, Rei Tanaka, Toshiyuki Uto, Kenji Ohue, "A 3-D Mesh Watermarking Technique via Highpass Filtering," In Proc. of the 2017 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'17), 2017年3月1日, Guam (USA).

{その他}

<http://aiweb.cs.ehime-u.ac.jp~uto/>

6. 研究組織

(1)研究分担者

なし