

スペクトル分解を用いた3次元メッシュへの電子透かしの埋め込み

大淵 竜太郎¹, 高橋 成雄², 宮澤 貴彦¹, 向山 明夫¹

ohbuchi@acm.org, shigeo@lab.cc.gunma-u.ac.jp, k7184@kki.yamanashi.ac.jp, k7186@kki.yamanashi.ac.jp

¹ 山梨大学工学部 コンピュータ・メディア工学科, 山梨県甲府市武田 4-3-11

² 群馬大学総合情報処理センター, 群馬県桐生市天神町 1-5-1

要旨

電子透かしとは, 対象となるデータに何らかの構造を付加することで, そのデータにメッセージを埋め込む技術で, 著作権保護, 改ざん検出, 等の応用がある. 本論文では, 3次元ポリゴンメッシュに対しスペクトル領域で電子透かしの埋め込み手法を提案する.

本手法では, まず, メッシュの頂点の接続関係のみから得られるラプラシアン行列を求め, それを固有値分解して得られた固有ベクトルに頂点座標値を射影することでメッシュのスペクトルを求める. このメッシュスペクトルを特徴量とし, これを変更して透かしの埋め込み. 本手法で得られる電子透かしは相似変換(回転, 並行移動, 一様スケーリング)に対して頑強で, さらにメッシュスムージングやランダムノイズの重畳に対してもある程度の頑強性を示す.

キーワード: グラフ・ラプラシアン, メッシュスペクトル, 情報セキュリティ, 情報埋め込み.

Watermarking 3D Polygonal Meshes Using Mesh Spectral Analysis

Ryutarou Ohbuchi¹, Shigeo Takahashi², Takahiko Miyazawa¹, and Akio Mukaiyama¹

¹Computer Science Department, Yamanashi University, 4-3-11 Kofu, Yamanashi, Japan.

²Computer Center, Gunma University, 1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu-shi, Gunma, Japan

Abstract

Digital watermarking embeds structures called watermark into the target data, such as image and 3D polygonal models. The watermark can be used, for example, to enforce copyright and to detect tampering. This paper presents a new watermarking technique that adds watermark into a 3D polygonal mesh in the mesh's spectral domain.

Our watermarking algorithm starts with eigenvalue decomposition of a Laplacian matrix, which is a matrix derived only from the connectivity of the polygonal mesh. Mesh spectra can then be obtained by projecting coordinates of vertices onto the set of eigenvectors. Watermarks are embedded by modifying the magnitude of the spectra. The watermarks embedded by using this method are robust against similarity transformation. They can also be resistant to mesh smoothing and additive random noise.

Keywords: graph Laplacian, mesh spectra, information security, information hiding.

1. 初めに

データ埋め込み, または電子透かしと呼ばれる技術は, 情報を表現する watermark(透かし)と呼ばれる構造体を, 透かしの対象となるコンテンツデータに付加する. ここで, 透かしの存在が埋め込み対象コンテンツの本来の目的(例えば人による表示・鑑賞)を阻害しないこと, かつ, 透かしがコンテンツから容易には除去できないこと, が要件である. 埋め込まれた透かしは, 説明の追加, 改ざんの検出, あるいは正規の購入者の認証など, そのコンテンツを何らかの形で管理する目的

で用いられる.

これまでの電子透かしの研究の多くは「古典的」マルチメディアデータ型, 例えば文字文書, 静止画像, 動画像, および音声データに対する埋め込みを中心としていた. これらについては非常に多くの論文が発表されている([Matsui99, Katzenberger99]等を参照).

これらの古典的マルチメディアデータタイプに加え, 最近, VRML や MPEG4, さらには多種多様の CAD データを含む 3次元(3D) データがその重要性を増してきた. これを反映し, 3D モデ

ルを対象とする透かしアルゴリズムがいくつか発表された。

3D モデルの電子透かしは透かし埋め込みの対象となるデータにより分類できる。これまで発表された手法の多くはポリゴンメッシュの形状を埋め込みの対象としている [Ohbuchi97, Ohbuchi98a, Ohbuchi98b, Hartung98, Kanai98, Benedens99, Yeo99, Praun99] が、パラメトリック曲面で定義される形状を対象としたもの [Ohbuchi99] や、形状の属性であるテクスチャ座標を対象としたもの [Ohbuchi98b], MPEG-4 顔アニメーションパラメタ列を対象としたもの [Hartung98] もある。

本論文で提案する電子透かし手法は、ポリゴンメッシュで定義される 3 次元形状をスペクトル分解して得られた係数を変更することで、変換領域において電子透かしを付加する。この手法で得られる電子透かしは相似変換(回転, 並行移動, 一様スケーリング)に対して頑強である。さらに、透かしを埋め込む周波数帯域を選ぶことにより、形状のローパスフィルタリングに相当するメッシュのスムージングに対してもある程度の頑強性を示す透かしを実現することができる。

以下、第 2 節ではメッシュのスペクトル分解とそれに基づいた電子透かしの埋め込み、取り出しアルゴリズムを述べる。第 3 節では実装と実験の結果を紹介し、第 4 節で関連研究を、第 5 節でまとめと今後の課題を述べる。

2. メッシュのスペクトル分解による電子透かし

本論文で述べる電子透かし手法は、頂点座標と頂点の接続関係により形状が定義される 3 次元ポリゴンメッシュに対し、頂点座標の変換領域で透かしを付加する。用いられる変換は、ポリゴンメッシュの接続関係より定義される Laplacian 行列をもとにしたポリゴンメッシュ形状のスペクトル分解である。

スペクトル分解の結果は、大まかに言って、小さな固有値(低い周波数に対応)とその固有ベクトルがメッシュの概形を、大きな固有値(高い周波数に対応)とその固有ベクトルがメッシュの詳細を、それぞれ表現すると考えられる。本論文の電子透かし手法では、スペクトル係数の振幅を透かし情報に応じて変更して透かしを埋め込み、変更したスペクトル係数から透かしの入った形状を再構成する。本透かし手法は秘密透かしであり、取り出しには透かし入りの透かしモデルと透かし付加前の被覆モデルが必要である。透かしの取り出しは、透かしモデルと被覆モデルを共にスペクトル分解し、そのスペクトル係数を比較して行う。

2.1. メッシュのスペクトル分解

メッシュスペクトルは、頂点の接続情報で定義されたメッシュ Laplacian(ラプラシアン)行列に対し固有値分解を施し、得られた固有ベクトルに頂点座標を射影して得られた係数からなる。

メッシュのラプラシアン行列にはいくつかの定義があるが、我々は Bollobás [Bollobás 98] のメッシュラプラシアン(別名 Kirhhoff (キルヒホフ)行列)を用いた。以後、本論文では、Bollobás のメッシュラプラシアン行列をキルヒホフ行列と呼ぶ。キルヒホフ行列 K は

$$K = D - A \quad (1)$$

で定義される。 A はポリゴンメッシュの頂点の隣接行列で、以下のように定義される。

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{頂点 } i \text{ と } j \text{ が隣接} \\ 0 & \text{その他} \end{cases} \quad (2)$$

D は対角行列で、その対角要素 $D_{ii} = d_i$ は頂点 i の次数である。また、 I は単位行列である。

Karni らが形状圧縮に用いたメッシュラプラシアンは $L = I - RA$ である [Karni00]。ここで A は上記の通り、対角行列 R は対角要素に頂点 i の次数の逆数 $R_{ii} = 1/d_i$ を持つ。Karni らのラプラシアン行列 L は非対称行列であるが、これに対しキルヒホフ行列 K は対称行列である。対称行列には比較的安定で効率的な固有値分解アルゴリズムが存在し、また予備実験の結果 L と K は類似の形状近似特性を示すことがわかった。この結果、本論文で述べる実験はキルヒホフ行列 K をメッシュのラプラシアンとして使用した。

N 個の頂点からなるメッシュ M から求まるキルヒホフ行列 K を固有値分解すると、 N 個の固有値とそれに対応する N 個の N 次元固有ベクトルが得られる。 N 個の頂点座標をその x, y, z 各成分ごとに固有ベクトルに射影するとメッシュのスペクトル S が得られる。固有ベクトルをスペクトル成分倍して足し合わせたものがもとの形状である。

図1は猫のポリゴンモデル(頂点数 353, 面数 702)をキルヒホフ行列を用いてスペクトル分解し、得られたスペクトルの一部を用いて近似形状を復元してみた例である。図1(a)が元のモデルを示す。図1(b), 図1(c), 図1(d)はそれぞれ係数全体のうち固有値の小さいものから 5%, 10%, 80%のスペクトル係数を用いて近似した形状である。小さい固有値に対応するスペクトル係数は形状の概形を、大きい固有値に対応するスペクトル係数は形状の詳細を、表していることがわかる。

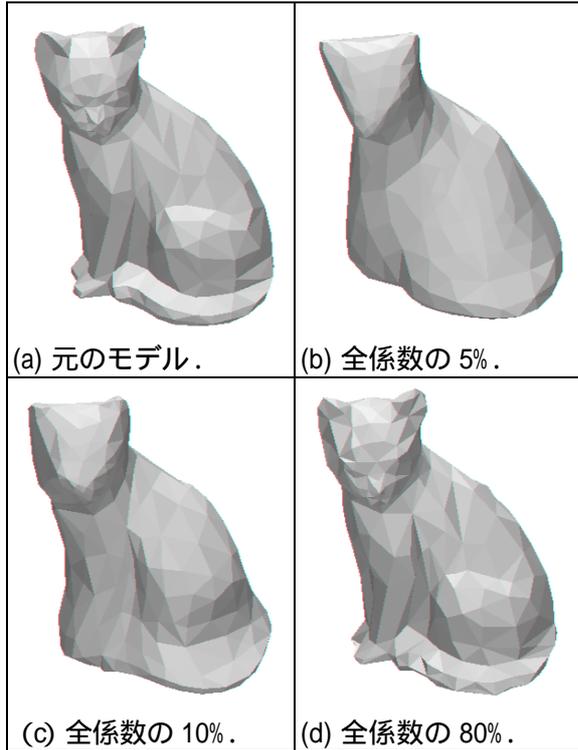


図 1. 元のモデル (a)をスペクトル分解し, 固有値の小さいほうからそのスペクトル係数の 5% (b), 10% (c), 80% (d) を使って復元した形状.

2.2. 透かしの埋め込み

本論文の透かしは, スペクトル係数値を変更して透かしを埋め込む. 数値を変化して透かしを埋め込む場合, これまでしばしば spread spectrum communication (帯域拡散通信) の考え方が採用されてきた [Katzenberger99]. かく乱に強かつ単位周波数あたりの電力が低いという帯域拡散通信の特徴は, 種々の妨害に対し頑強かつ不可知でなければならない電子透かしの要求と合致しているからである. 我々の手法も帯域拡散通信の手法を採用しており, 具体的には Hartung らが用いた手法 [Hartung98] に近い.

埋め込むデータビット列の j 番目のビット a_j (値は $\{0, 1\}$ を取る) は拡散率 C だけ複製され, 埋め込みシンボル列 b_i となる. 同じビットを C 倍繰り返して埋め込むことでノイズなどに対する耐性を高めることができる.

$$b_i = a_j, \quad j \cdot c \leq i < (j+1) \cdot c \quad (3)$$

b_i は $\{-1, 1\}$ の値をとる透かしシンボル b'_i

$$b'_i = \begin{cases} -1 & \text{if } b_i = 0 \\ 1 & \text{if } b_i = 1 \end{cases} \quad (4)$$

の列に変換される. 操作の対象となるスペクトル係数 S の i 番目の成分の振幅を s_i , 鍵 K から生成された擬似乱数系列 p_i , 変調振幅 a を用いると, 透かしによって変更されたスペクトル係数 \hat{s}_i は次のように計算される;

$$\hat{s}_i = s_i + b'_i \cdot p_i \cdot a \quad (6)$$

2次元静止画像などでは埋め込み対象となる数値が少なくとも数千個は存在するため c を大きくできる. しかし我々の場合, スペクトル係数の数が数百個 (猫のモデル 353 個) から 1000 個程度なので, c をあまり大きくすることはできない. 鍵 K は取り出しにも必要となるため公開するか, または, 何らかの手段で秘密裏に受け渡しをする必要がある. 変調振幅 a は埋め込む形の axis-aligned Bounding Box (Bbox) を計算し, その辺の長さの最大値に対する割合で指定する. 変調振幅 a は, モデルの見かけが変わらない程度に小さく, かつノイズやスムージングなどの妨害で透かしが壊れないように大きく, 選ぶ必要がある.

頂点数が N 個なら, 固有値, 固有ベクタ, およびスペクトル係数はそれぞれ N 個で, 単純には N ビットが埋め込める計算である. しかし, N 個のスペクトル係数全てを透かしの埋め込みに用いるわけではない. 固有値の小さい側 5 個程度の固有ベクトルは, 後述のように, 相似変換を加えられたモデルと元のモデルの対応を取る変換を決定するために用いる. したがって, 透かし埋め込みの対象となるのはそれ以降 (より高周波) のスペクトル係数である.

これら使用可能なスペクトル係数をどのように使うかは, ランダムノイズの重畳やスムージングなどに対する頑強性のどれを重視するかに依存する. 例えばランダムノイズに対する頑強性を上げるには拡散率 c をできるだけ大きくする. 頂点数が 1030 個の場合, 相似変換の補正に使う係数を除くと, 32 ビット長の透かしデータを埋め込むならば, 最大の拡散率 (透かしの繰り返し回数) は 32 となる. 逆に, 形状のスムージングにある程度耐える透かしを実現するためには, 低周波成分, つまり小さな固有値に対応するスペクトル係数を中心に透かしを埋め込む必要がある.

2.3. 取り出し

本論文の透かしは秘密透かしであり, 透かしの取り出しに際し, 透かしの埋め込まれたモデル (埋め込み後にノイズ重畳などの妨害をされた可能性もある) と, 透かし埋め込み前のオリジナルのモデルとを比較して透かしを取り出す.

取り出し処理では、まず、相似変換を加えられた透かしモデルと元のデータである被覆モデルを互いに合わせこむ。この合わせ込みにはそれぞれのメッシュベクトルを計算したときに得られる固有ベクトル数個を固有値の小さいほうから数個を使用する。

位置合わせが終わると、透かしの入ったメッシュ M' から計算されたスペクトル係数 \bar{s}_i とオリジナルのモデルから計算されたスペクトル係数 s_i の差分をとり、その差分に埋め込みに使用したのと同じ擬似乱数系列 p_i を掛け、その拡散率だけの和を求めると、

$$q_j = \sum_{i=j-c}^{(j+1)-c-1} (\bar{s}_i - s_i) \cdot p_i = \sum_{i=j-c}^{(j+1)-c-1} b'_i \cdot a \cdot p_i^2 \quad (7)$$

擬似乱数系列が同期していれば(透かしモデルに対して加えられたランダムノイズなどの妨害を無視できるとすると)、

$$q_j = c \cdot a \cdot b'_i \quad (8)$$

となる q_j は $\{-1, 1\}$ のいずれか値をとり、 c と振幅は常に正の数である。したがってその正負を判定することによって透かしデータ列 a_j が取り出せる。

$$a_j = \text{sign}(q_j) \quad (9)$$

3. 実験と結果

我々は2節で述べたアルゴリズムを c++ と GUI ツールキット fltk (<http://www.fltk.org>) を用いて実装し、実験を行った。本手法を実装するに当たって重要なのが固有値分解の効率的数値解法である。我々の現在の実装では、元の行列を Householder 法により相似変換した後で反復法を適用し、全ての固有値と固有ベクトルを求めている。メッシュの大きさ(頂点数)が 1000 程度まではこの手法が適用可能である。しかしメッシュの大きさがこれを大きく超えるポリゴン(頂点数 $10^4 - 10^7$)も珍しくない。このような大規模ポリゴンの場合には Karni らが行ったように[Karni00]、メッシュを 1000 程度以下のポリゴンからなる領域に区分し、それぞれの領域に対して個別に固有値分解を施す必要がある。

3.1. 透かし埋め込みの例

図 2 はウサギのモデル(VRML モデル, 頂点数 1197, 面数 2390) に透かしの埋め込みの例である。埋め込みの振幅は、座標軸に沿ったバウンディングボックスの最大長の 0.5% の振幅である。

透かしの埋め込み処理には Pentium III 700MHz の PC で 35 分 22 秒かかり、その殆どが固有値分解の時間であった。取出し時には参照形状の固有値分解を行う必要があるため、ほぼ 2 倍の時間がかかった。頂点数 1000 強のこのメッシュが、現在の実装で扱えるほぼ最大のメッシュであろう。

表1はウサギのモデルの座標値を透かし前後で比較したもので、透かし埋め込みの結果座標値が変化していることわかる。しかし、図 2 に示すように、埋め込み前(図 2(a))と後(図 2(b))でほとんど見かけに変化はない。

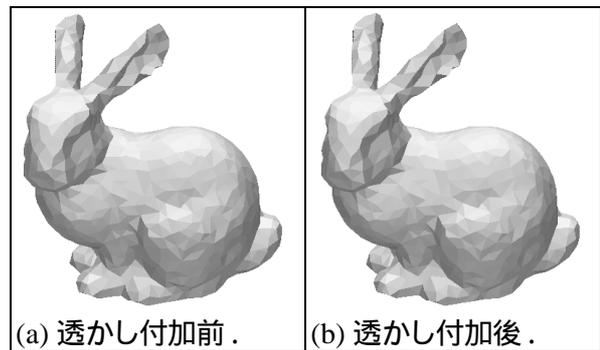


図 2. 透かし付加の前後で形状の見かけを比較。透かし埋め込みの振幅を調節すると見かけ上の変化はほとんど無い。

透かし付加前.

```
geometry IndexedFaceSet {
  coord Coordinate {
    point [
      0.8042 -0.2177 0.4689,
      1.060 0.2527 0.03369,
      -0.3814 -0.01931 0.9841,
      1.094 0.1567 0.08169,
      1.161 -0.01931 -0.1391,
      -0.6886 -0.3441 0.9537,
      -0.8086 -0.4465 0.008089,
      ...
    ]
  }
}
```

透かし付加後.

```
geometry IndexedFaceSet {
  coord Coordinate {
    point [
      0.8063 -0.2156 0.4710,
      1.0637 0.2564 0.0374,
      -0.3778 -0.0157 0.9877,
      1.0980 0.1607 0.0857,
      1.1624 -0.0179 -0.1377,
      -0.6870 -0.3425 0.9553,
      -0.8073 -0.4452 0.0094,
      ...
    ]
  }
}
```

表1. 透かし前後の座標値の変化。

3.2. 頑強性

ポリゴンメッシュに加えられる各種の変更に対する頑強性について実験を行った。

相似変換

本手法で埋め込まれた透かしは相似変換に対して頑強性を持つ。図 4(c) は虎のモデル(頂点数 254, 面数 504) に透かしを埋め込んだものを x 軸周りに 10 度, z 軸周りに 30 度, さらに 0.6 倍の等方スケールング結果である。この変換後も問題なく透かしを取り出すことができた。埋め込みに 21 秒, 取り出しにその約 2 倍の時間がかかった。

形によっては相似変換後の取り出しがうまく行かないこともある。例えば球や円筒のように点対称あるいは軸対称に近い形状では, 形状の固有値を使用した軸合わせの変換行列がうまく求まらない。特に形状のスムージングを加えた場合, 軸合わせの変換行列の誤差が大きくなり, 相似変換後に透かしが取り出せない場合がある。

ランダムノイズ重畳

埋め込みの拡散率 c が高いと, 頂点座標に重畳されるランダムノイズに対する耐性が高まる。

Bbox 最大長の 0.5%の振幅で透かしを埋め込んだ虎のモデル(図 4(b))に Bbox 最大長の 0.7%の振幅でノイズを加えると形の劣化が認められる(図 4(d))。ここで, 拡散率 $c=1$ ではデータが破壊されるが, 拡散率を $c=7$ (可能な最大値)まで高めると透かしが残る。

拡散率をさらに高めるにはメッシュ自体の頂点数が大きい必要がある。例えば頂点数が数千を超えるような複雑なメッシュをスペクトル分解して埋め込めば, 拡散率を大きくしてランダムノイズに対する耐性を高め, 同時に, スペクトル係数の低周波成分だけを用いて埋め込んでメッシュスムージングに対する耐性を高める(次節を参照)ことも可能になると予想される。

メッシュスムージング

メッシュの fairing や透かしの破壊の目的で頂点座標に対しスムージングを加える操作が加えられることがある。ローパスフィルタであるスムージングに対抗するには, スペクトル成分の中で低周波成分だけを用いて透かしを埋め込めば良いことが想像される。図 3 は, 虎のモデルについて Taubin らの手法 [Taubin95] によるスムージングの前後でのメッシュスペクトル係数の変化の絶対値を固有値に対してプロットしたものである。このグラフから, 予想どおり, スムージングが最も影響

を与えるのは高周波成分であることが解る。

虎のモデルに対し, スペクトルの低周波成分を使って 32 ビットのデータを 1 度(拡散度 $c=1$) 埋め込み, このモデルに対し Taubin のスムージングフィルタを作用させて透かしが残るかどうかが実験した。透かしを埋め込んだデータ(図 4(b))を 1 度スムージングしても透かしが取り出せるが(図 4(e)), 2 度スムージングすると(図 4(f))透かしは破壊された。スムージング前の図 4(b)とスムージング後の図 4(e)では目の付近, 耳の付近などで形状が変化し, 形状の質が低下していることに注意してほしい。

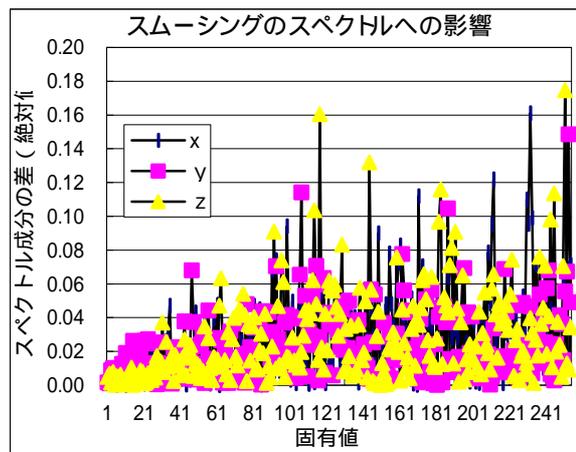


図 3. スムージングがスペクトルに与える影響。

その他の変更に対する耐性

本手法はメッシュの簡単化, 再パラメータ化, エッジフリッピングなど, 頂点接続関係を変更する操作に対しては頑強性が低い。頂点接続関係が大幅に変わると, メッシュスペクトル計算の元となるメッシュラプラシアン行列が大きく変わってしまうためである。

4. 関連研究

ポリゴンメッシュへの電子透かしにおいて, 変換領域での埋め込みを最初に提案したのが金井らである [Kanai98]。金井らは 1 対 4 の再分割連続性を持つ 3 角メッシュをウェーブレット変換し, その変換領域のデータを操作して情報を埋め込んだ。彼らの透かしはアファイン変換に耐え, かつ頂点座標に重畳されたランダムノイズに対しても頑強性を有した。Praun らの手法 [Praun99] も一種の変換領域での透かしと考えることができる。彼らの手法は相似変換, 切り取り, ノイズの重畳などに対して頑強である。この手法の欠点は, 透かし埋め込みの対象が頂点数の多い複雑なメッシュに制限される点が挙げられる。

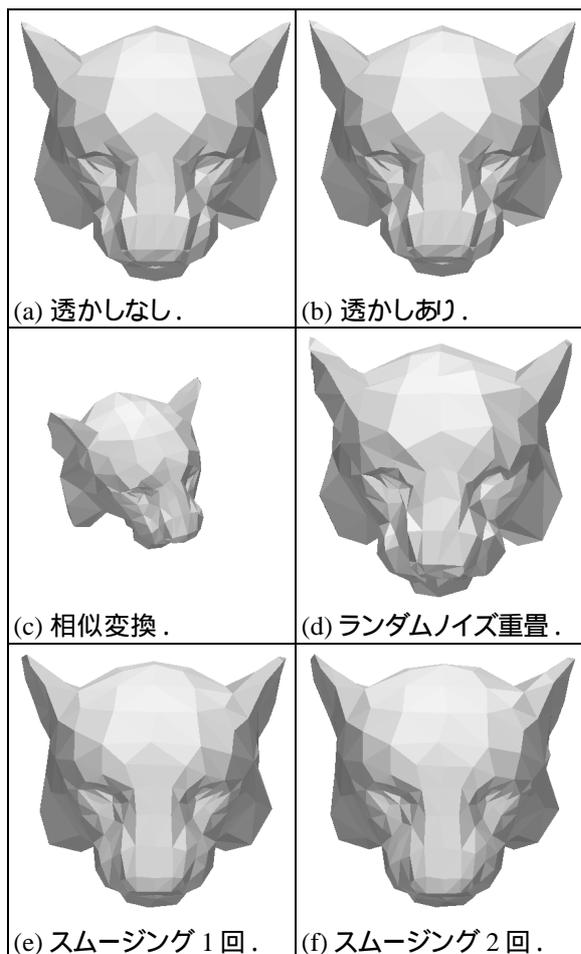


図 4. 本透かしは相似変換に対し頑強で、さらにランダムノイズ重畳やメッシュスムージングに対してもある程度の頑強性を有する。

5. まとめと今後の課題

本論文では、ポリゴンメッシュで定義された 3 次元形状をスペクトル分解し、そのスペクトル(周波数成分)を変更して透かしを埋め込む手法を提案した。メッシュの頂点の接続関係のみから得られるラプラシアン行列を求め、それを固有値分解して得られた固有ベクトルに頂点座標値を射影することでメッシュのスペクトルが得られる。このスペクトル係数を白色ノイズ化した透かしビット列で変更して透かしを埋め込んだ。

本論文で述べた手法は秘密透かしであり、相似変換(回転, 並行移動, 一様スケール)に対して頑強で、またメッシュスムージングやランダムノイズの重畳に対してもある程度の頑強性を示す。

本論文で提案した手法にはまだ幾つか限界がある。最も大きな問題は、頂点数の多い(例えば 10^4 以上)大きなメッシュの処理ができないことである。大きなメッシュを処理するには大規模なラプ

ラシアン行列を効率よく固有値分解するアルゴリズムを実装する必要がある。また, Karni ら [Karni00]のように, メッシュを区分けして処理する必要もある。

謝辞: 本研究は文部省科学研究費補助金(課題番号 12680342 および 12780185), および中山隼雄科学技術文化財団, 株式会社ミリオン, および柏森情報科学振興財団からの助成による。

参考文献

- [Bollobas98] B. Bollobás, *Modern Graph Theory*, Springer, 1998.
- [Benedens99] O. Benedens, *Geometry-Based Watermarking of 3D Models*, *IEEE CG&A*, pp. 46-55, January/February 1999.
- [Hartung98] F. Hartung, P. Eisert, and B. Girod, *Digital Watermarking of MPEG-4 Facial Animation Parameters*, *Computer and Graphics*, Vol. 22, No. 4, pp. 425-435, Elsevier, 1998.
- [Kanai98] S. Kanai, H. Date, and T. Kishinami, *Digital Watermarking for 3D Polygons using Multiresolution Wavelet Decomposition*, Proc. of the *Sixth IFIP WG 5.2 GEO-6*, pp. 296-307, Tokyo, Japan, December 1998.
- [Karni00] Zachi Karni, Craig Gotsman, *Spectral Compression of Mesh Geometry*, Proceedings of the SIGGRAPH 2000, July 2000, New Orleans, U.S.A.
- [Katzenberger00] S. Katzenbeisser, F. A. P. Petitcolas, *Digital Watermarking*, Artech House, London, 2000.
- [Ohbuchi97] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. Aono, *Watermarking Three-Dimensional Polygonal Models*, *Proc. ACM Multimedia '97*, Seattle, Washington, USA, November 1997, pp. 261-272.
- [Ohbuchi98a] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. Aono, *Watermarking Three-Dimensional Polygonal Models Through Geometric and Topological Modifications*, pp. 551-560, *IEEE JSAC*, May 1998.
- [Ohbuchi98b] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. Aono, *Geometrical and Non-geometrical Targets for Data Embedding in Three-Dimensional Polygonal Models*, *Computer Communications*, Vol. 21, pp. 1344-1354, Elsevier (1998).
- [Ohbuchi99] Ryutarou Ohbuchi, Hiroshi Masuda, and Masaki Aono, *A Shape-Preserving Data Embedding Algorithm for NURBS Curves and Surfaces*, *Proc. Computer Graphics International '99*, pp. 180-177, Canmore, Canada, June 7-11, 1999.
- [Praun99] Emil Praun, Hugues Hoppe, Adam Finkelstein, *Robust Mesh Watermarking*, MSR-TR-99-05, Microsoft Research, 1999.
- [Taubin95] G. Taubin, "A Signal Processing Approach to Fair Surface Design", *Proc. ACM SIGGRAPH '95*, pp. 351-358, 1995.
- [Yeo99] B-L. Yeo and M. M. Yeung, *Watermarking 3D Objects for Verification*, *IEEE CG&A*, pp. 36-45, January/February 1999.