ウェーブレット変換に基づく3次元ポリゴンモデルへの 「電子透かし」埋め込み*

伊達 宏 昭** 金 井 理*** 岸 浪 建 史***

Digital Watermarking for 3D Polygons Based on Wavelet Transform

Hiroaki DATE, Satoshi KANAI and Takeshi KISHINAMI

Recently, much interest is being taken in method to protect the copyright of digital data and preventing illegal duplication of it. However, in the area of CAD/CAM and CG, there are no effective ways to protect the copyright of the 3D geometric models. As a first step to solve the problem, a new digital watermarking method for 3D polygonal models is introduced in this paper. Watermarking is one of the copyright protection methods where an invisible watermark is secretly embedded into the original data. The proposed watermarking method is based on the wavelet transform (WT) for the polygonal model. The watermark can be embedded in the large wavelet coefficient vectors at various resolution levels of the transformed model. The method makes the embedded watermark imperceptible and invariant to the affine transformation. And also makes the control of the geometric error caused by the watermarking reliable. Finally, the effectiveness of the proposed watermarking method is shown through several simulation results.

Key words: digital watermarking, data hiding, copyright protection, polygonal model, three-dimensional geometric model, wavelet transform

1. は じ め に

デジタルメディアの急速な普及と共に、テキスト・画像・動画などの貴重なデジタル著作物の複製・編集が容易になるにつれ、それらの著作権保護が必要になってきている。さて、形状モデルの一種として3次元ポリゴンモデルはCAD/CAM、CG、RP等の分野に多く用いられ、近年、ソリッドモデル、サーフェスモデルと並んで重要さが増している。それに伴い、貴重な3次元ポリゴンモデルデータに対し、著作権保護のための手法が要求されてきている。

近年、テキスト・画像・動画・音声信号に対する著作権保護のための有効な手法として、電子透かし手法の研究が多くなされている^{1)~5)}。電子透かし手法とは、まず、オリジナルデータに著作権情報などのデータを、オリジナルデータの情報を微小に変化させ透かしとして埋め込み、そのデータを流通データとする(図1(a))。その後、必要に応じてこの透かしの抽出する(図1(b))ことにより著作権を証明するものである。3次元ポリゴンモデルを対象とする電子透かし手法は、大淵ら⁶⁾、Benedens⁷⁾、Yeoら⁸⁾によって、近年研究が行われつつあり、3次元ポリゴンモデルに対する著作権保護のための有効な手段になる可能性が高いと考えられる。大淵ら、Benedensの手法は、3次元ポリゴンモデル内の座標値を微小に操作することで、特定の面積比・体積比⁹⁾、法線方向⁷⁾等を変化させ、透かしを埋め込むものである。一方、Yeoらの手法⁸⁾は、3次元ポリゴンモデルに対する透かし埋め込みの問題を、写像により画像に対する問題に帰着させたものである。

画像等に対する既存の電子透かし手法は、大きく分けて空間領域法、変換領域法の2つに分類できる。空間領域法は、対象となるオブジェクトの持つ要素(画像では画素値に対応する)に直接透かしの埋め込み手法である。これに対し変換領域法では、対象となるオブジェクトをDCT、FFT、ウェーブレット変換(WT)

等を用いて一度周波数領域に変換し、その変換係数に対し透かしの埋め込み。空間領域法に対し変換領域法は、変換係数の持つ性質を有効に利用することにより、透かしの秘匿効果、保存効果に対し優れた特性を持たせることが可能となると報告されている^{9)~11)}。この観点で分類すると、3次元ポリゴンモデルを対象とした既存の電子透かし手法^{6)~8)}は空間領域法に分類される。

現在、3次元ポリゴンモデルのデータ圧縮・通信等を目的とし、WTを用いて3次元ポリゴンモデルを周波数領域へ変換する手法が提案されている¹²⁾。このWTを3次元ポリゴンモデルに対する電子透かし手法へ適用可能であるならば、画像等に対する変換領域法と同様に幾つかの優れた特性を持たせることが実現可能であると考えられる。

そこで本論文では以下を研究目的とし報告を行う。

- 1) 3次元ポリゴンモデルを対象としたWTに基づく変換領域法ベースの電子透かし手法の有効性について議論する。
- 2) WTを用いた3次元ポリゴンモデルへの電子透かし埋め込み・抽出アルゴリズムを新たに提案する。
- 3) 提案するアルゴリズムを実装し、シミュレーションにより本手法の有効性を検証する。

2. 3次元ポリゴンモデルへの電子透かし及び手法 に対する要求特性と必要条件

一般的に電子透かし手法には、以下のような要求特性があり、

Fig.1 General digital watermarking process

* 原稿受付 平成11年2月22日

** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科(札幌市北区北13条西8丁目)

*** 正会員 北海道大学大学院工学研究科

これらは3次元ポリゴンモデルの場合にも当てはまる。

1) 第三者への見つけにくさ・取り出しにくさ

透かしがオブジェクト内に含まれていることを第三者に悟られてはならない。また、透かしが埋め込まれていることが悟られても、その抽出が困難であればよい。

2) 様々な操作に対する耐性

透かし入りオブジェクトの部分的な切り取り、ノイズ付加等の操作に対し透かしは耐え残らなければならない。

3) 透かしの容量

限られた大きさのオブジェクト内に、できる限り多くの情報を埋め込むことが可能であることが望ましい。

変換領域法を用いることにより、上記の要求特性に対し優れた特性を得ることができる。本論文では、3次元ポリゴンモデルを対象とする電子透かし手法に、WTに基づく変換領域法を用いた場合、上記の要求にどの程度こたえられるかについて4章で定性的に議論し、6章で評価する。

さらに3次元ポリゴンモデルへの電子透かし手法は、次のような特有の必要条件を満足しなければならない。

4) アフィン変換に対する透かしの保存

3次元ポリゴンモデルに対して多く用いられるアフィン変換に対して透かしは100%保存されなければならない。

5) 実数値への透かし埋め込み

画像等では、整数値データの単純な下位ビットの置き換え、ビット加算で透かしを埋め込む。これに対し、実数値で表現された座標値に対し透かしを埋め込む手法が必要である。

6) 誤差の定量的な管理

埋め込みにより生じるモデルデータ内の幾何情報の変化量を、指定した許容誤差量以内に抑えなければならない。

本論文では、4)~6)の必要条件に関しては、独自の手法により解決しており、5章で詳しく議論する。更に、6章でシミュレーションにより評価する。

3. ウェーブレット変換による3次元ポリゴンモデルの多重解像度表現

3.1 空間の階層化とウェーブレット

提案する手法はWTによって階層表現された3次元ポリゴンモデルに対して透かしを埋め込むための処理を行う。この階層化の理論は多重解像度解析と呼ばれる¹⁰⁾。

式(1)のような階層化された関数空間 V^j を仮定する。

$$V^d \subset \dots \subset V^j \subset V^{j-1} \subset \dots \subset V^0 \quad (1)$$

W^j を V^j における直交補空間とすると、 $0 \leq j \leq d-1$ において関数空間 V^j は式(2)のように表される。

$$V^j = V^{j-1} \oplus W^j \quad (2)$$

ここで $\oplus$ は直交和を表す。 W^j は、低解像度の空間 V^{j-1} から V^j を構成するのに必要な詳細部分を意味している。式(2)を再帰的に用いることにより式(3)を得る。

$$V^j = W^j \oplus \dots \oplus W^0 \oplus V^0 \quad (3)$$

式(3)は、ある解像度の関数空間はその詳細部分及び最低解像度の関数空間の直交和として表現可能であることを表している。

次に、各々の解像度レベル j の関数空間を構成する関数を式(4)、式(5)で定義する。

$$f^j(x) = \sum_i c_i^j \phi_i^j(x) = \sum_i c_i^j \phi(2^{-j}x - k) \quad (4)$$

$$g^j(x) = \sum_i d_i^j \psi_i^j(x) = \sum_i d_i^j \psi(2^{-j}x - k) \quad (5)$$

Fig.2 Overview of WT for 3D polygonal model

$f^j(x)$ は高解像度の関数 $f^{j-1}(x)$ の近似を表し、 $g^j(x)$ は近似の際に失われた細部を表す関数、 c_i^j, d_i^j は各々の関数の係数を表す。ここで ϕ_i^j は V^j を構成する基底関数でスケーリング関数、 ψ_i^j は W^j を構成する基底関数でウェーブレットと呼ばれる。解像度レベル $j-1$ の関数 $f^{j-1}(x)$ は $f^j(x), g^j(x)$ の和で表現でき、オリジナル関数 $f^0(x)$ は式(6)のように階層的に表現できる。

$$f^0(x) = g^1(x) + \dots + g^d(x) + f^d(x) \quad (6)$$

ここで、 d は最低解像度レベルを表し、式(6)の表記を $f^0(x)$ の多重解像度表現という。

3.2 3次元ポリゴンモデルの多重解像度表現

3次元ポリゴンモデルを周波数領域へ変換し、多重解像度表現を得るための手法として、WTを用いた手法が Lounsbery らによって提案されている⁹⁾。基本概念は、図2に示すように、3次元ポリゴンモデル内の三角形の4対1統合によりモデルを低解像度へ近似すると同時に、その際に失われた詳細部をウェーブレット係数ベクトル (WCV, 図2中矢印) として分離し、保存することである。本論文ではこのWT手法を透かし埋め込みに応用する。

3次元ポリゴンモデルのWTは行列の積(式(7),(8))で行われる。

$$V^{j+1} = A^{j+1} V^j \quad (7)$$

$$W^{j+1} = B^{j+1} V^j \quad (8)$$

ここで V^j は解像度レベル j における頂点座標値を各行に持つ行列 $V^j = [v_1^j, \dots, v_{m^j}^j]^T$ (m^j は解像度レベル j における頂点数) である。 A^{j+1} は低解像度への近似 V^{j+1} (低周波成分) を取り出す行列である。 B^{j+1} は近似の際失われた詳細を表す WCV を各行に持つ行列 $W^{j+1} = [w_1^{j+1}, \dots, w_{m^{j+1}}^{j+1}]^T$ (高周波成分) を取り出す行列で、それぞれ解析フィルタと呼ばれる。

又、逆ウェーブレット変換 (IWT) は式(9)で行われる。

$$V^j = P^{j+1} V^{j+1} + Q^{j+1} W^{j+1} \quad (9)$$

P^{j+1} は V^{j+1} の頂点間に新たに中点を作り出し、 Q^{j+1} は生成された中点の位置を補正する行列で、それぞれ合成フィルタと呼ばれる。式(9)を再帰的に用いることにより、図3に示すような、3次元ポリゴンモデルの多重解像度表現が得られる。

フィルタとなる行列の成分は、使用するウェーブレットの種類によって決定される。本論文では、ウェーブレットの種類として Lazy ウェーブレット¹⁰⁾を用いる。Lazy ウェーブレットは、高解像度レベルのスケーリング関数を、そのまま低解像度レベルのウェーブレットとして用いるものである。3次元ポリゴンモデルを対象とした場合、 V^j 内のスケーリング関数 ϕ_i^j 、 W^j 内のウェーブレット ψ_i^j を図4に示す区分的に線形な関数を用い、それぞれ

Fig.3 Wavelet based decomposition and multiresolution representation of 3D polygonal model

Fig.4 Piecewise linear functions in each space
(a) scaling functions in V^{j-1} , (b) scaling functions in V^j ,
(c) lazy wavelets in W^j

の関係は式(10), (11)で定義される。

$$\phi_i^j = \frac{1}{2}\phi_{i-1}^{j-1} + \phi_i^{j-1} + \frac{1}{2}\phi_{i+1}^{j-1} \quad (10)$$

$$\psi_i^j = \phi_i^{j-1} \quad (11)$$

式(10),(11)はブロック行列表現を用いて式(12)で表される。

$$[\Phi^j | \Psi^j] = \Phi^{j-1} [P^j | Q^j] \quad (12)$$

ここで、 $\Phi = [\phi_1^j, \dots, \phi_n^j]$, $\Psi = [\psi_1^j, \dots, \psi_{n-1}^j]$ である。また、解析・合成フィルタ間には式(13)の関係がある。

$$\begin{bmatrix} A^j \\ B^j \end{bmatrix} = [P^j | Q^j]^T \quad (13)$$

式(10)~式(13)よりわかるように、Lazy ウェーブレットは、希薄な解析・合成フィルタの行列を作る。従って、頂点数に対し線形時間で解析・合成処理を高速に実現することが可能である。Lazy ウェーブレットを用いた場合のWCVは、図2に示すような、WT時に消去される頂点と、それに隣接する低解像度レベルの頂点間を中点分割し生成される頂点を結ぶベクトルとなる。

4. ウェーブレット変換を用いた電子透かし手法の特徴

既存の3次元ポリゴンモデルに対する電子透かし手法⁹⁻¹⁰⁾に対しWTに基づく電子透かし手法では、ポリゴンモデルが4対1統合可能な位相構造を持っていない限りという制約がある¹⁰⁾。またポリゴンモデルに対しWT-IWTを行うため埋め込みに要する時間は多くなる。しかし、WTを用いた周波数領域における電子透かし手法は以下のような利点がある。

- 1) モデル表面の凹凸に応じた目立たない部分への選択的な透かし埋め込みが可能である。
- 2) Lazy ウェーブレットを用いた場合、WCVと頂点移動量の間に明確な関係があるため、透かし埋め込みにより生じる頂点移動量（誤差）の制御が容易に可能である。
- 3) 低解像度のWCVは空間的な存在確率が低いため、モデルの局所的な切り抜き・編集等に比較的耐性を持つ透かしを埋め込むことが可能である。
- 4) 多重解像度表現された3次元ポリゴンモデルの各解像度レベルに透かし埋め込みが可能のため、ポリゴンモデルのデータ圧縮との親和性が高い。

以上の理由からWTを用いた周波数領域における電子透かし

手法は、3次元ポリゴンモデルにおいても、画像・音声信号等への手法と同様に、空間領域法に比較して優れた特性を有する。

5. 透かし埋め込み・抽出手法

5.1 概要

提案する電子透かし埋め込み手法の流れを図5に示す。まず、透かしを埋め込むためのポリゴンモデル V^0 、及び透かしとなるbinaryビット列 B を用意する。更に、埋め込みの特性を決定する埋め込みパラメータ、埋め込みキー C をビット列として用意し、オリジナルのポリゴンモデル V^0 に対しLazy ウェーブレットによるWTを適用する。次にWTにより得られるWCVに対し透かしを埋め込む。埋め込みは、1レベルごとのIWT時に各解像度レベルのWCVに対して以下で述べるアルゴリズムを用いて行う。これを繰り返すことにより透かし入りポリゴンモデル $\hat{V}^0$ を得る。また、埋め込みパラメータは1頂点あたりの埋め込みビット数 k 、埋め込みにより生ずる誤差の許容量 ϵ 、埋め込みの最低解像度レベル d である。

2章、4章の議論に基づき、本論文で提案する透かし埋め込みアルゴリズムは、次の要求機能を満足するように設計した。

- 1) モデル内の目立ちにくい部分への選択的な埋め込み
- 2) 埋め込みにより生ずる誤差の定量的管理
- 3) アフィン変換に対する透かしの保存
- 4) 実数値データへの透かし埋め込み

以下ではこれらの機能を満たす透かし埋め込み手法の詳細について述べる。

5.2 目立ちにくい部分への選択的透かし埋め込み

一般に、人間の目はモデル表面の凹凸が小さな部分のノイズは検知しやすく、凹凸の大きな部分のノイズは検知しにくいとされている¹²⁾。WTにより得られるWCVのノルムはモデル表面の凹凸の程度を定量的に表している。そこで、モデル内の目立ちにくい部分へ透かしを埋め込むため、あるしきい値 ρ より大きなノルムを持つWCVを埋め込みの対象とする。更に、WCVの列に一つ一つに対応する成分を持つ埋め込みキー $C = (c_1^{j-1}, \dots, c_{n-1}^{j-1}, \dots, c_1^0, \dots, c_{n-1}^0)$ ($c_i^j = 1$ or 0) の1が対応するWCV w_i^j のみに透かしを埋め込み、秘匿効果を高くする。

5.3 アフィン変換に対する透かしの保存

アフィン変換に対し保存されるモデル内の不変量へ透かしを埋め込むことで透かしの保存性を持たせる。アフィン変換に対する不変量は、線分比・面積比・体積比などのある物理量間の比である。本論文ではWCVのノルムと別の線分長との比に透かしデータを埋め込む。比の対象とする線分長は、図6に示すような、WCV w_i^j の終点となっている頂点に隣接した低解像度レベルの頂点間距離 l_i^j を用いる。

透かしを線分比へ埋め込むために、WCVのノルムと図6に示す線分長 l_i^j を用いて線分比 α_i^j を式(14)で算出する。

Fig.5 Outline of the proposed wavelet-based watermarking method

Fig.6 A WCV and its partner edge for calculating the ratio

Fig.7 Manipulation of the decimal digits for embedding the watermark

$$\alpha_i^j = \|w_i^j\| / l_i^j \quad (14)$$

得られた線分比に対し、5.4節で述べる手法により透かし入り線分比 $\hat{\alpha}_i^j$ を得る。この $\hat{\alpha}_i^j$ を用いてWCVを修正することにより、IWT 時に用いる透かし入りWCV $\hat{w}_i^j$ を式(15)より得る。

$$\hat{w}_i^j = (\hat{\alpha}_i^j / l_i^j) w_i^j / \|w_i^j\| \quad (15)$$

得られた透かし入りWCVを用いて1レベルのIWTを行う。

5.4 誤差の定量的管理及び実数値への埋め込み

透かし埋め込みは最終的にポリゴンモデルの頂点座標値の移動により行うため、この時に生じる誤差をユーザ指定の誤差の許容量内に保証する必要がある。

ユーザ指定の誤差の最大許容量 ε 、埋め込みの最低解像度レベル d が与えられたとき、Lazy ウェーブレットを用いた場合の1 WCV 当たりの移動可能量 δ は式(16)より得られる。

$$\delta = \frac{2\varepsilon}{d+1} \quad (16)$$

透かしデータ埋め込みにより生じる WCV の移動量を δ 以内に抑えれば、透かし入りモデルの誤差は指定した誤差の最大許容量 ε 内に収まる。次に、図 7 に示すように δ の範囲を考慮し、透かしデータ B 内の k ビットの部分ビット列 $(b_1, \dots, b_k)$ を、式(17)を用いて線分比に埋め込むための信号 β_i^j に変換する。

$$\beta_i^j = b_1 \times 10^{r-p+s} + b_2 \times 10^{r-p+s-1} + \dots + b_k \times 10^{r-p+s-k+1} \quad (17)$$

ここで、
 $p = \text{Trunc}(\log_{10} \|w_i^j\|)$
 $r = \text{Trunc}(\log_{10} \delta)$
 $s = \text{Trunc}(\log_{10} \alpha_i^j)$

$\text{Trunc}(x)$ は x の小数点以下を切り捨てた値を取る関数である。式(17)より得られる信号を用いて、式(18)による加算を行い、透

かしデータ入りの線分比 $\hat{\alpha}_i^j$ を得る。

$$\hat{\alpha}_i^j = \alpha_i^j + \beta_i^j \quad (18)$$

式(18)の透かし入り線分比を用いて、式(15)より透かし入りWCV $\hat{w}_i^j$ を得る。最後に、得られた透かし入りWCVを用いて1レベルのIWTを行う。以上の操作を解像度レベル d から0に向かった各解像度レベルで適用し、得られた透かし入りポリゴンモデル $\hat{V}^0$ を流通モデルとする。WCV への埋め込みアルゴリズムの詳細を図 8 に示す。

5.5 透かし抽出手法

まず流通モデル、オリジナルモデルのそれぞれにWTを適用し、式(14)によりオリジナルモデルと透かし入りモデルの線分比 $\alpha_i^j, \hat{\alpha}_i^j$ を得、それらの差分 $\beta_i^j = \hat{\alpha}_i^j - \alpha_i^j$ をとる。著作者のみの知る埋め込みパラメータ、埋め込みキーから埋め込みを行ったWCV、各線分比への埋め込み場所及びそのビット数が分かるため、式(17)に基づき、各 β_i^j より透かしの k ビットのビット列が抽出できる。これをすべてのWCV に対し適用することにより、全透かしデータを抽出できる。この透かし抽出には、オリジナルモデル、埋め込みキー、及び埋め込みパラメータの組合せを必要とし、これらのすべてを知らなければならないため、第三者が透かしを抽出することは非常に困難となる。

6. 適用結果及び評価

本手法を図 9(a)のモデル (HEAD, 面数 2048, 頂点数 1026, $-10 \leq x, y, z \leq 10$) に適用した。埋め込みのための透かしデータは図 9(b)に示す2値画像 (60×60 画素) を用いた。

透かし入りモデルに対しアフィン変換を行った後、透かしを抽出した結果、透かしデータが100%保存されることが確認できた。

図 10 に、モデルの誤差の最大許容量 ε を変化させた時の透かし入りモデルの視覚的な変化を示す。誤差の最大許容量を小さくするに連れオリジナルモデルに対する視覚的な差異は知覚不可能となることがわかる。

図 11 に ε を固定し、埋め込み条件 (各頂点の埋め込みビット数 k 、埋め込みの最低解像度レベル d) を変化させた時のオリジナルモデルに対する透かし埋め込みにより生じた誤差の分布を示す。透かし埋め込みにより生ずる誤差がユーザ指定の誤差の最大許容量内に抑えられていることから、誤差の定量的な管理が行われていることが確認できる。

Fig.8 Detail flow of the wavelet-based watermarking embedding algorithm

Fig.10 The change of appearance of the watermarked polygon at different tolerance settings

Fig.11 Error distribution of the vertices at different settings of the embedding condition

Fig.12 Average positional error of vertices caused by the watermark embedding

Table 1 Bit error rate of the watermark at different rounding off error settings

Rounding off error	Bit error rate %	
	k = 2	k = 5
10^{-3}	28.92	32.79
10^{-4}	25.66	26.01
10^{-5}	23.31	21.58
10^{-7}	14.43	12.70
10^{-9}	0	7.61
10^{-11}	0	0.81
10^{-13}	0	0

図12にWCV1個当たりの埋め込みビット数 k の変化と誤差の総和を示す。埋め込みビット数を増加しても、誤差の増加量は少ない。よって誤差のみを考慮した場合に、埋め込み容量を多くすることが可能であり、有限の大きさのポリゴン内に多くの情報を埋め込むことができる望ましい特性が得られている。しかし、ポリゴンモデルデータの座標値の有効けたは有限長であり、透かしデータの損失なしに埋め込み可能なビット数には上限があるため、表1に示すような有効けたの丸めによる透かしの破壊が行われる。WCV1個当たりの埋め込みビット数 k を大きくすると埋め込み可能ビット数が多くなるが、けた丸めによる破壊の影響が大きいことがわかる。よってWCV1個当たりの埋め込みビット数は、有効けたの上限値を考慮してユーザが適当に選ぶ必要がある。

また、透かし入りモデルに対し図13に示すような局所的な編集を行い透かしデータの破壊の程度を埋め込みレベル別に比較した結果を、同図及び表2に示す。埋め込みパラメータは $\epsilon=10^{-3}$ 、 $d=4$ 、 $k=5$ であり、埋め込みキーを用いずにすべての頂点に透かしを埋め込んでいる。低解像度レベル(j が大)の透かしは、透かし入りモデルの編集によって破壊されたビット数が少ない。これは、4章で述べたように、低解像度レベルの透かしは空間的な存在確率が低いため、局所的なモデル編集による影響を受ける可能性が低いためである。このことは、透かし埋め込みの対象モデルの頂点数が多くなるに連れ、低解像度レベルの透かしデータの保存性が高まることを意味している。

7. おわりに

3次元ポリゴンモデルの著作権保護を目的とした電子透かし手法に関する研究を行い以下の結論を得た。

- (1) 3次元ポリゴンモデルを対象としたウェーブレット変換に基づく変換領域法ベースの電子透かし手法の有効性について検討し、その優れた特性を明らかにした。
- (2) ウェーブレット変換を用いた3次元ポリゴンモデルへの電子透かし埋め込み・抽出手法を新たに提案した。
- (3) 本手法を計算機に実装し以下の特性を確認した。
 - ・アフィン変換に対し透かしは100%保存される。
 - ・透かし埋め込みにより生ずる誤差の定量的管理が可能である。
 - ・透かしをモデル内の比較的目立たない場所へ選択的に埋め込むことが可能である。
 - ・局所的なモデルの編集に対して低解像度レベルに埋め込まれた透かしデータは影響を受けにくい。

今後の課題としては、埋め込み容量の向上、透かしへの様々な攻撃に対する耐性の強化などがある。更に、CAD/CAMシステムで現実によく用いられている自由曲面・ソリッドモデルへの電子透かし技術の拡張が考えられる。

Fig.13 Influence of local model modification on the watermark

Table 2 The destroyed bits in embedded watermark by model modification

	Number of edited vertices	Bit error rate %	Number of destroyed bits			
			j = 4	j = 3	j = 2	j = 1
(a)	22	3.18	0	5	30	110
(b)	30	4.82	5	30	55	130
(c)	20	3.95	5	30	30	115

謝 辞

本研究の遂行に当たり支援をいただいたNK エクサ(株)、終作(株)の古島終作氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) W. Bender, D. Gruhl, N. Morimoto and A. Lu: Techniques for Data Hiding, IBM System J., 35, 3-4, (1996) 313.
- 2) 大西淳児, 松井甲子雄: ウェーブレットを利用した著作権保護のための画像符号化, 情報処理学会論文誌, 38, 3 (1997) 534.
- 3) 大西淳児, 松井甲子雄, 中村康弘: ウェーブレット変換における画像への署名データの埋め込み, 電子情報通信学会論文誌, 79, 6 (1996) 1017.
- 4) D. Kundur and K. Hatzinakos: Digital Watermarking Using Multiresolution Wavelet Decomposition, IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing, 5, (1998) 2969.
- 5) D.M. Swanson, B. Zhu, B. Chau and A.H. Tewfik: Robust Data Hiding for Images, Proc. IEEE Digital Signal Processing Workshop, (1996) 37.
- 6) R. Ohbuchi, H. Matsuda and M. Aono: Watermarking Three-Dimensional Polygonal Models, ACM Multimedia '97, (1997) 261.
- 7) O. Benedens: Geometry-Based Watermarking of 3D Models, IEEE Computer Graphics and Applications, 19, 1, (1999) 46.
- 8) B. Yeo and M. Yeung: Watermarking 3D Objects for Verification, IEEE Computer Graphics and Applications, 19, 1, (1999) 36.
- 9) M. Lounsbery: Multiresolution Analysis for Surfaces of Arbitrary Topological Type, PhD thesis, University of Washington, (1994).
- 10) E. J. Stollnitz, T. DeRose and D. H. Salesin: Wavelets for Computer Graphics: Theory and Applications, Morgan Kaufmann, San Francisco (1996).
- 11) M. Eck, T. DeRose, T. Duchamp, H. Hoppe and M. Lounsbery: Multiresolution Analysis of Arbitrary Meshes, Computer Graphics, (1995) 173.
- 12) 原島 博監修: 画像情報圧縮, オーム社, (1990) 75.