

視覚的影響を考慮した 3次元モデルへの電子透かし

中沢 真一[†] 高橋 成雄[†]

デジタルコンテンツとしての3次元モデルの重要性が高まるにつれて、3次元モデルに対する電子透かしを用いた著作権保護技術の需要はますます高まっている。しかし、従来の電子透かし手法では、透かし情報を埋め込んだ際に生じる3次元モデルの形状に対する視覚的影響を考慮していないため、形状の歪みにより埋め込まれた透かしが認知されてしまう、あるいはコンテンツとしての価値が損なわれてしまうなどの問題を回避できずにいた。そこで、本研究では透かし埋め込みによる視覚的影響を考慮した新しい3次元モデルへの電子透かし手法を提案する。

Visual-Saliency-Based Digital Watermarking for 3D Models

Shinichi Nakazawa[†] Shigeo Takahashi[†]

In the field of digital contents, with the increasing application of 3D model, the importance of copyright protection with digital watermark for 3D mesh object has been growing considerably. However, the visual error of the watermarked 3D model is not deal with well in the general methods, which leads to some serious problems. For example, the embedded watermark information might be recognized due to the distortion of shape; another one is that the quality of contents may be ruined. For all these problems, a new digital watermark method for 3D model is proposed, which can carefully deal with the visual error.

[†]東京大学
The University of Tokyo

1. はじめに

近年、デジタルメディアやネットワークの普及により、文字文書、静止画像、動画、音声などに代表されるデジタルコンテンツの入手、複製、保存や配布が容易となった。しかし、これは同時に貴重なコンテンツの複製などを容易にしてしまうという新たな問題も生じてしまうことになる。こういったデジタルコンテンツの許可されていない操作や再利用は、最近では当たり前ようになってしまい、非常に危機的な状況と言える。そこで、デジタルコンテンツの著作権保護技術の重要性が高まっている。

データそのものに情報を埋め込むことで、著作権の通達や保護を行う電子透かしもその著作権保護技術の1つである。電子透かしにおいて、コンテンツに埋め込む情報(透かし)とは、コンテンツが著作物であることを示唆するロゴや符号といった情報を含んでいるものである。透かしそのものは、秘密ではなく、コンテンツ内に容易に除去されないように存在しなければならず、また、埋め込み対象となるコンテンツの本来の目的(人による表示や観賞)を阻害しないことが要件である。

電子透かしにはいくつかの分類法があるが、その中で重要なものに頑強性と透かし検出方法がある。著作権保護などを目的とし、なるべく攻撃に耐えて残ることを目標とするのが頑強な電子透かしである。これに対し、積極的に透かしが壊れることで改ざんなどを検出する、脆弱な電子透かしも存在する。また、透かしの検出に、透かしの入ったデータと、他の分類法として、透かしの入っていない元データの両方を必要とするのがnon-Blind電子透かしであるのに対し、透かしデータのみで透かしを検出できる手法をBlind電子透かしと分類もされる。Blind電子透かしの方が汎用性は高く実用上の制限は少ないが、non-Blind電子透かしと比較すると頑強性が乏しいことが多い。

これまでの電子透かしの研究のほとんどは1次元データ(音声など)あるいは、2次元データ(静止画像や動画など)に対する埋め込みを中心としていた。しかし最近、MPEG4やCADデータなどの3次元データがその重要性を増してきたことにより、3次元データを対象とする電子透かしの研究が数多く行われるようになってきた。

本研究では、3次元ポリゴンメッシュに埋め込む電子透かしを扱っている。1次元や2次元データにおける電子透かし技術と比較すると、3次元データ、特にポリゴンメッシュデータには、画像のように輝度値や色相など多くの透かし情報を埋め込めるシグナルが存在しないため、電子透かしの適用は非常に困難であるといえる。

2. 関連研究

3次元メッシュモデル（以後、「3次元モデル」）への電子透かしの研究の第1人者として Ohbuchi ら[1]がいる。Ohbuchi らは、頂点座標値を変更する透かしと頂点接続性を変更する透かしをそれぞれ発表した。前者の透かしは、頂点座標値の変更（ノイズ追加や形状の平滑化など）や頂点接続性の変更でも破壊される。後者の頂点接続性を変更する透かしは、任意の座標変換に耐えるが、頂点の埋め込み情報量（以後、「透かし密度」）が相対的に低いものであった。Ohbuchi らの仕事の後、より頑強性の高い non-Blind 手法が提案された。Benedens の手法[2]は相似変換に耐え、また頂点座標値へのノイズ追加や頂点接続性への変更にも耐える強さを持っていたが、透かし密度が低いものであった。次に Ucchedu ら[3]は、ポリゴンメッシュ上にウェーブレット変換を施し、その変換領域のウェーブレット係数を操作することで、透かし情報を埋め込む Blind 手法を提案した。相似変換や頂点再配置などの変更に耐える強さをもっていたが、ポリゴン単純化や再分割化などの頂点接続性の変更に対しては脆弱なものであった。このような Blind 手法の弱点を克服すべく、Cho ら[4]は、モデルから大局的に得られる統計量を変調させることで相似変換や頂点再配置はもちろんのこと、頂点座標値の変更や頂点接続性の変更など、幅広い攻撃に耐えることのできる Blind 手法を提案した。

これまでの電子透かし手法は、頑強性や検出方法の改善に焦点を当てた研究が中心となっていた。それ故、透かし情報を埋め込んだ際に生じる3次元モデルの形状に対する視覚的影響を考慮していないため、形状の歪みにより埋め込まれた透かしが認知されてしまう、あるいはコンテンツとしての価値が損なわれてしまうなどの問題を回避出来ずにいた。



図 1 : Ucchedu 手法

図 2 : Cho 手法

例えば、Ucchedu らの手法[3]は、透かしを埋め込むことで全体的に歪みが生じてしまう（図 1）。Cho らの手法[4]では、目で見てもすぐに分かるほどの大きな歪みが生じてしまうことが分かる（図 2）。

最近、3次元モデルにおける視覚的特徴を評価する手法が多く提案されてきている。Lee ら[5]が提案した曲率を用いて 3次元モデルに対する人の注視点分布を表す Saliency（顕著度）を計算する手法や、Lavoue[6]が提案した 3次元モデルの歪みの大きさを計算する手法などが代表例である。

そこで本研究では、従来の電子透かし手法に 3次元モデルにおける視覚的特徴を評価する手法を適用することで、視覚的影響を考慮した新たな電子透かし手法を開発することを目的としている。

3. 提案手法

本手法は、主に 2つのステップを経て 3次元モデルに透かし情報を埋め込む。まず、モデル上の視覚注意を集める強さを表す Saliency を計算する手法[5]を用いることで、透かし情報を埋め込む領域を選択的に限定する（図 3. (b)-(d)）。次に、選択的に限定された領域に、歪みを与えない攻撃（相似変換など）には不変であり、歪みを与える攻撃（ノイズ追加や頂点接続性の変更など）にもあまり影響を受けることのない統計量を用いた電子透かし手法[4]を用いることで 3次元メッシュモデルに透かしを埋め込む（図 3. (e)）。

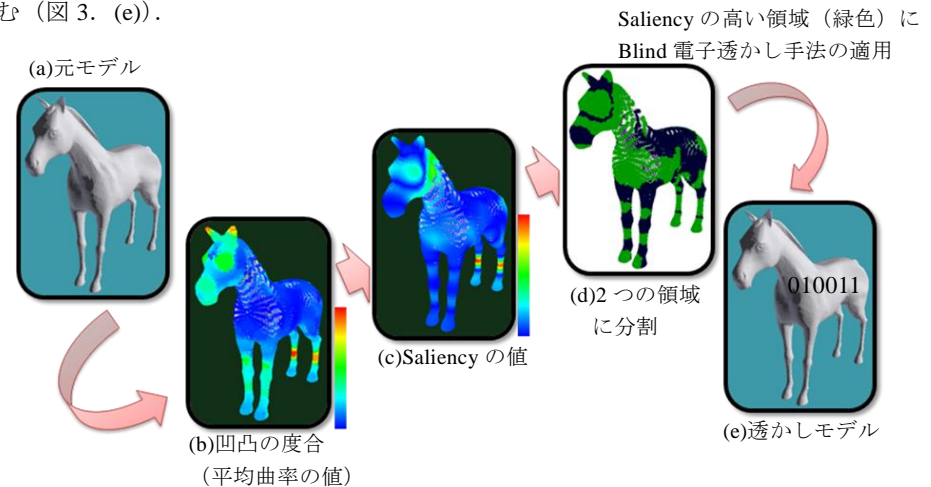


図 3 : 提案手法の概要

3.1 Saliency による領域の限定

3次元モデルにおける凹凸の大きさの変化を1つのパターンとして考え、連続して同じようなパターンの並ぶ領域に存在する異なるパターンを Saliency が高い部分と判断する。その曲面の凹凸の大きさを表す1つの指標として、平均曲率がある。まず、その平均曲率から求める (図3. (b)).

平均曲率は、曲面における最も高い曲率 κ_1 と最も低い曲率 κ_2 を用いることで、

$$\text{平均曲率} = \frac{(\kappa_1 + \kappa_2)}{2} \quad (1)$$

と定義される。ここでは、Meyer らの手法[7]により、ポリゴン曲面上の平均曲率を求めていく。Meyer らの手法は、曲面を頂点 x_i を中心としたポリゴンに拡張することで、

$$\overline{K_H} = \frac{1}{2A} \sum_{j \in N_i(i)} (\cot \alpha_{ij} + \cot \beta_{ij})(x_i - x_j) \quad (2)$$

を得る。この式より、対峙する三角形の2つの角度 (α_{ij}, β_{ij}) と1つのベクトルと赤線内の領域面積 A から頂点 x_i 上 (図4) の平均曲率を求めることができるようになる。

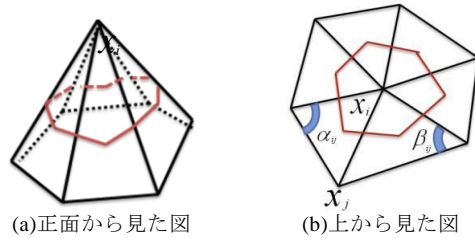


図4：頂点 x_i を中心としたポリゴンの集まり

次に、Lee らの手法[5]により、3次元モデルの各頂点の平均曲率が周辺の頂点と比較してどれくらい異なっているのかをあるスケール値で評価することで Saliency の値を計算していく (図3. (c)).

まずモデルの Bounding Box を求める (図5)。そして、得られた Bounding Box の対角線に0.3%を掛けた値を ε とし、その ε から σ を定義する。

$$\begin{aligned} \varepsilon &= |\text{対角線の長さ}| \times 0.3\% \\ \sigma &= \{2\varepsilon, 3\varepsilon, \dots\} \end{aligned} \quad (3)$$

次に頂点 v から 2σ 内に存在する頂点群 x を探索する (図6)。その頂点群 x の平均曲率よりガウス重み付き平均、

$$G(K_H(v), \sigma) = \frac{\sum_{x \in N(v, 2\sigma)} K_H(x) \exp[-\|x-v\|^2 / (2\sigma^2)]}{\sum_{x \in N(v, 2\sigma)} \exp[-\|x-v\|^2 / (2\sigma^2)]} \quad (4)$$

$N(v, 2\sigma)$: 頂点 v から範囲 2σ 内に存在する頂点数

を計算する。さらに2倍の範囲でガウス重み付き平均を求め、2つのガウス重み付き平均の差分

$$\text{Saliency}(v) = |G(K_H(v), \sigma) - G(K_H(v), 2\sigma)| \quad (5)$$

から各頂点のスケール別の Saliency の値を求める。



図5：Bounding Box

図6：ポリゴンの集まり

ここでどのスケールの Saliency を領域の2分割に用いるのかを説明する。図7(a)(b)は、 2ε 時の平滑化前と後の2次元ヒストグラムを、図7(d)(e)は 10ε 時の平滑化前と後の2次元ヒストグラムを表している。図7(c)(f)は、 2ε と 10ε 、それぞれの平滑化前と後の差分を取ることで、どのくらい頂点数が変化したのかを示している。この図7(c)(f)より、スケールを広げていくことで、平滑化による影響を抑えられることがわかる。

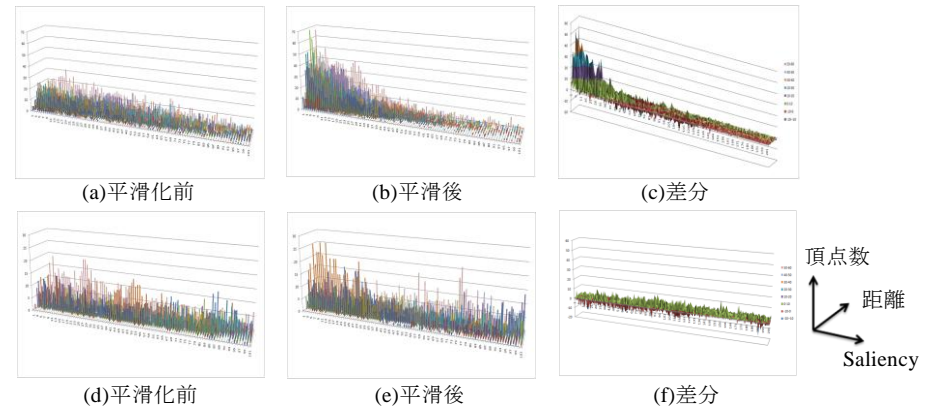
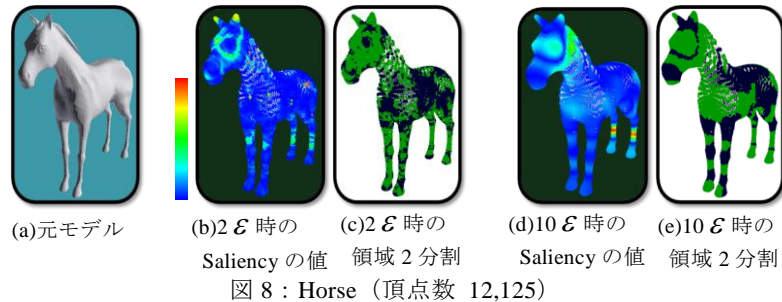


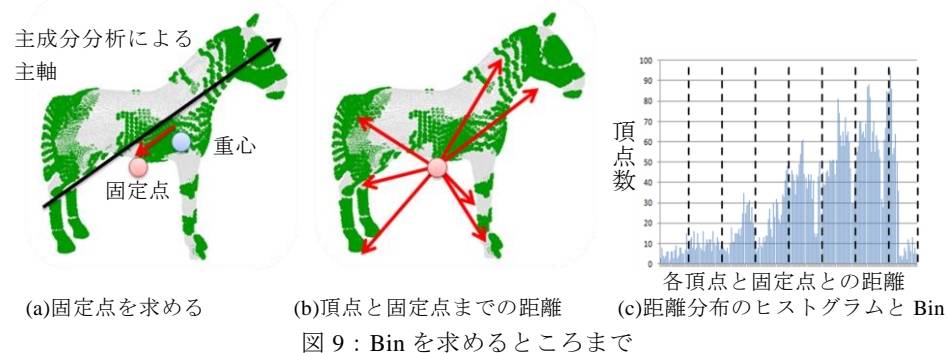
図7：2次元ヒストグラム

また図 8 より, スケール別の Saliency の値と領域を 2 分割した結果を示す. 領域を 2 分割した図(c)(e)は, 緑色が Saliency の高い側, 紺色が Saliency の低い側を示す. スケール σ を広げていくことにより, より大きく湾曲している箇所が高い Saliency が集中していく様子が見える. 本手法では, より電子透かしによる視覚的影響を小さくし, かつ頑強性を高めるために, スケール値として 10σ を用いて計算した Saliency の高い領域 (緑色) に透かし情報を埋め込む方針をとる (図 3. (d)).



3.2 統計量を用いた電子透かし手法の適用

まず, 3 次元モデル全体から得られる重心を主成分分析による主軸方向へ平行移動させた点である固定点を求める (図 9. (a)). 次に, 選択的に指定された領域に含まれる頂点と固定点との距離を求め (図 9. (b)), その距離分布のヒストグラムを得る. 得られたヒストグラムを, 埋め込みたい Bit 数だけ距離に関して均等な区間に分割し, この均等な区間それぞれをここでは Bin と定義する (図 9. (c)). 最初に固定点をずらすのは, 球状のモデルでも, 距離分布の幅を広げることで本手法を適用できるように汎用性を高めるためである.



Bin 内の距離を $[-1,1]$ に正規化し, -1 から 1 の範囲の分散の平均である $1/3$ を閾値と設定する. そして, ある程度の頑強性を持たせるために, 許容範囲 α を設定し, 透かし情報+1 を埋め込む場合は分散値を $1/3+\alpha$ より大きく, -1 を埋め込む場合は分散値を $1/3-\alpha$ より小さくなるように式(6)を用いて距離分布に変調を加える (図 10).

$$Y = \text{sign}(X)|X|^k \quad (6)$$

X : 処理前の頂点と固定点との距離 k : 実数値($0 < k$)

Y : 処理後の頂点と固定点との距離

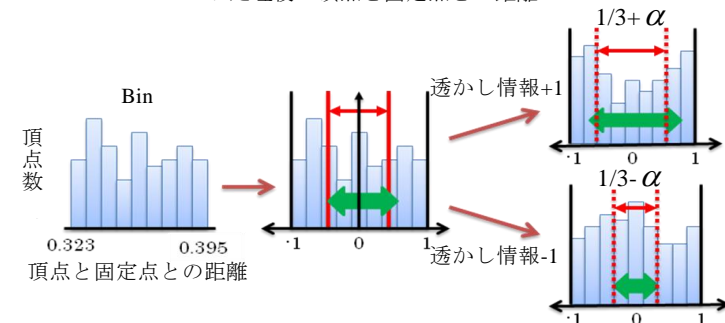


図 10 : 各 Bin に透かし情報を埋め込む方法

以上の作業により 3 次元モデルに透かし情報を埋め込む.

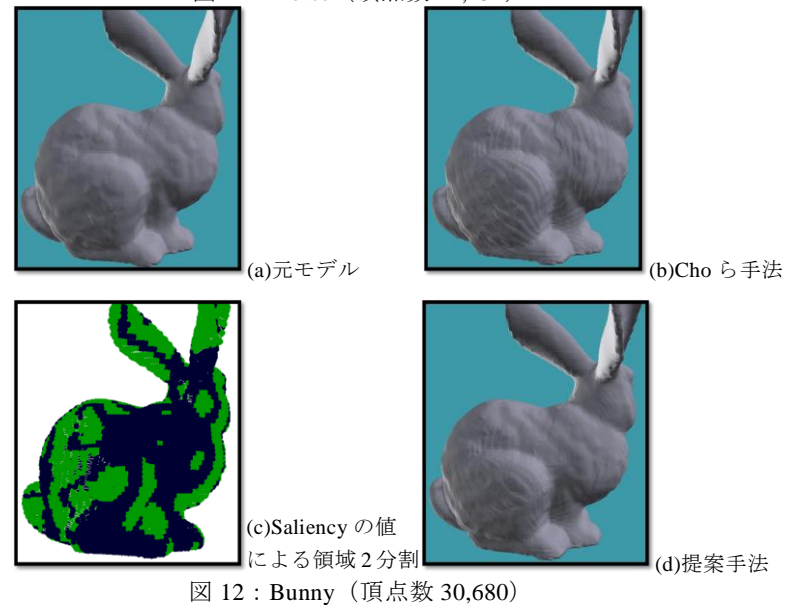
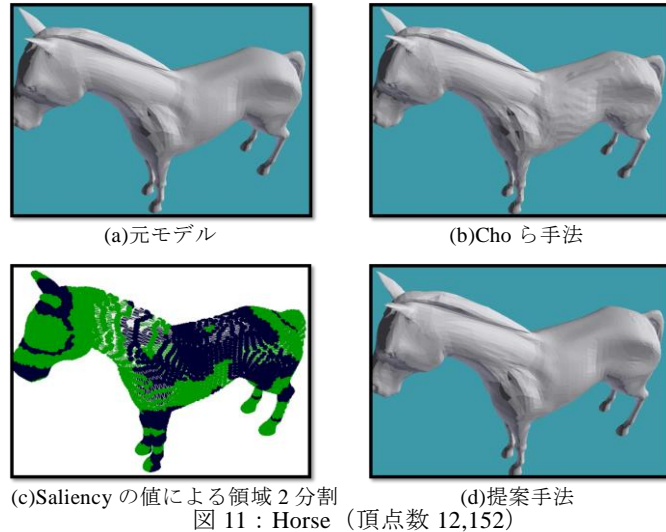
3.3 透かし情報の検出

最後に, モデルに埋め込んだ透かし情報を検出する方法を説明する. 検出過程は埋め込み過程とほぼ同じ手順を踏む. まず, 透かしを埋め込まれたモデル (以後「透かしモデル」) の平均曲率を求めて, その平均曲率から Saliency の値を計算し, 領域を 2 分割する. 次に, 透かしモデル全体から得られる重心を主成分分析による主軸方向へ平行移動させた点である固定点を求め, 固定点と頂点との距離によるヒストグラムを得る. 得られたヒストグラムを, 埋め込まれた Bit 数だけ距離に関して均等な区間に分割し Bin を作成する. この各 Bin 内の分散値が $1/3$ より上か, あるいは下かによって透かし情報+1, -1 を検出する.

4. 実験結果

実験は, Horse (頂点数 12,152), Bunny (頂点数 30,680) に 32Bit の透かし情報を埋め込んで行った. 許容範囲 α は今回 0.08 に設定して行った. 結果画像が図 11, 12 で

ある。図 11 より、(b)の Cho らの手法[4]と比較すると、(d)の提案手法の方が歪みを大きく抑えられていることがわかる。



しかし、図 12 の Bunny のモデルでは、既存手法よりも歪みを抑えられてはいるが、Horse のときほど、歪みを抑えられていない。これは、凹凸の多いモデル形状であることから、透かしを埋め込む領域が図 12(c)のように分散してしまうことが原因と考えられる。

次に、3次元モデルにおける計量的誤差を測るために、以下の式、SNR を用いた。

$$SNR = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}{\sum_{i=0}^{N-1} (x_i' - x_i)^2 + (y_i' - y_i)^2 + (z_i' - z_i)^2} \quad (7)$$

x_i, y_i, z_i : 元モデルの座標 x_i', y_i', z_i' : 透かしモデルの座標

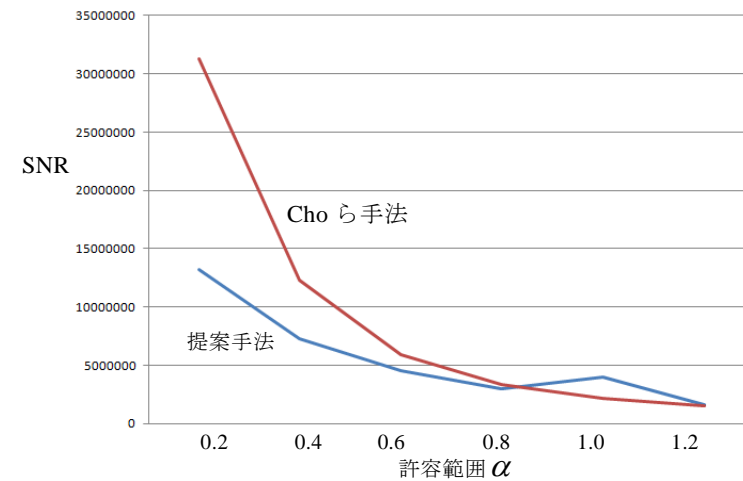


図 13 : Horse を用いた時の SNR と許容範囲 α との関係

Horse を用いて、SNR と許容範囲 α との関係を示した結果が図 13 である。既存手法の方が SNR の値が高く良好に見えるが、許容範囲 α が増加するに従い、どちらの手法も同じ程度の誤差に落ち着くことがわかった。提案手法の方が、選択的に領域を

限定している分、許容範囲 α の増減による影響を受けにくい結果となっている。

最後に、Horse を用いて透かし情報の埋め込みによる Saliency の値のヒストグラム変化を見てみる。図 14 より、Saliency の値はほとんど変化していないことがわかる。よって、透かし情報を検出する際にも、埋め込み過程とほぼ同じ領域を確保することが可能であるといえる。

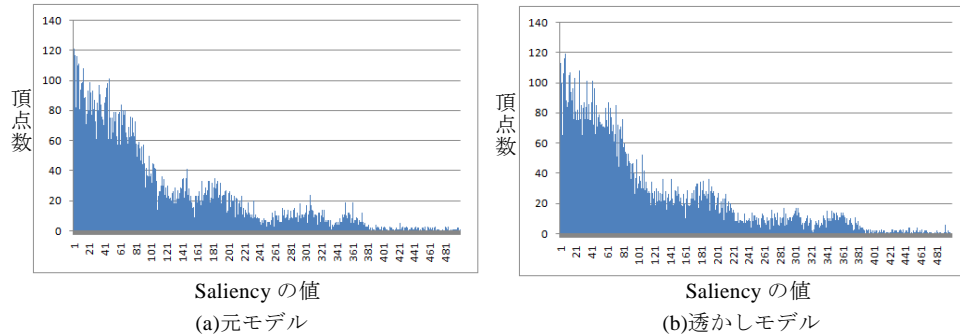


図 14 : Horse を用いた時の Saliency の値のヒストグラム変化

5. まとめと今後の予定

実験結果より、提案手法を用いることで、透かし情報の埋め込みによる 3 次元モデルへの視覚的影響を最小に抑えられることがわかった。しかし、Bunny などのように凹凸の多いモデルでは、透かし情報を埋め込む領域 (Saliency の高い領域) がコンパクトにまとまらないことから、この手法が不向きであることも露呈された。

そこで、Bunny のように凹凸の多いモデルにおいては、埋め込みに使う領域を半分というよりも、より多くを使うことで電子透かしとしての能力を向上させるなど、モデルの形状特徴によって透かし情報を埋め込む領域を調整するなどの改善策が考えられる。

また、ノイズの追加や頂点接続性の変更など歪みを与える攻撃を施した後の検出率などを確認し、頑強性の有無を検証する。

参考文献

- [1] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. Aono, "Watermarking three-dimensional polygonal models through geometric and topological modifications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, pp. 551–560, 1998.
- [2] O. Benedens, "Geometry-based watermarking of 3D models," *IEEE Comput Graph. Applicat*, vol. 19, no.1, pp. 46–55, 1999.
- [3] F. Uccheddu, M. Corsini, M. Barni, "WaveletBased Blind Watermarking of 3D Models," *In: Proceedings of the 2004 multimedia and security workshop on Multimedia and security*, ACM Press, pp. 143–154, 2004.
- [4] J. W. Cho, R. Prost and H. Y. Jung, "An Oblivious Watermarking for 3-D Polygonal Meshes Distribution of Vertex Norms," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 55, no. 1, pp. 142-155, 2007.
- [5] C. H. Lee, A. Varshney and D. W. Jacobs, "Mesh Saliency," *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2005)*, vol. 24, no. 3, pp. 659-666, 2005.
- [6] G. Lavoue, "A roughness measure for 3D mesh visual masking," in *Proc. of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization '07*, pp. 57–60, 2007.
- [7] M. Meyer, M Desbrun, P. Schroder, "Discrete differential-geometry operators for triangulated 2-manifolds," *In Visualization And Mathematics (Proceedings of VisMath 2002)*, Springer Verlag, Berlin(Germany), pp. 35-54, 2002.