三次元形状の位相情報を用いた
電子透かしに関する研究

A study on watermarking of 3D polygonal models
using topological information

1999年2月23日

豊橋技術科学大学 知識情報工学専攻
学籍番号 953701 赤羽和彦

目次

1. はじめに 5
   1.1. 研究の背景と目的 5
   1.2. 本研究の特徴 5
   1.3. 本論文の構成 5
2. 電子透かしと関連する研究 6
   2.1. 電子透かし 6
   2.2. 電子透かしの要件 6
   2.3. 電子透かしの用途 7
   2.4. 電子透かしの分類 8
      2.4.1. 画像への電子透かし 9
      2.4.2. 動画像への電子透かし 12
      2.4.3. 音声への電子透かし 14
3. 三次元形状データについて 15
   3.1. 境界表現 15
   3.2. CSG表現 15
   3.3. メタボール 16
   3.4. ボクセル表現 16
   3.5. オクトリー表現 16
   3.6. スイープ表現 17
   3.7. 二次曲面 17
   3.8. パラメトリック曲面による表現 18
4. 従来手法 19
   4.1. 頂点座標値を利用した方法 19
      4.1.1. 相似三角形4つ組みへの埋め込み 19
      4.1.2. 四面体の体積比への埋め込み 20
   4.2. 位相情報（頂点間の接続関係）を利用した方法 21
5. 三次元形状への透かし埋め込み手法 22
   5.1. VRMLによる三次元形状の表現方法 22
   5.2. 辺番号の定義方法 23
   5.3. 透かし情報の構成 23
   5.4. 基本的な透かし埋め込み手法 25
      5.4.1. 透かし埋め込み方法 25
      5.4.2. 透かし取り出し方法 26
   5.5. 頑強さを増した埋め込み方法 27

5.5.1. アルゴリズムの概要 27
5.5.2. 透かし埋め込み方法 28
5.5.3. 透かし取り出し方法 31
6. 実行例と評価 34
6.1. 基本的な埋め込み手法の実行結果 34
6.2. 頑強さを増した埋め込み方法の実行結果 35
6.3. 従来手法との比較 36
6.4. 考察 37
7. おわりに 38
参考文献 39

図目次

図 1. 濃度パターンへの埋め込み 9
図 2. 画素空間への埋め込み 10
図 3. フーリエ変換領域 10
図 4. 識別階調特性 12
図 5. MPEG2符号化器 13
図 6. 動きベクトルへの埋め込み 13
図 7. 境界表現 15
図 8. CSG表現 15
図 9. メタボール表現 16
図 10. ボクセル表現 16
図 11. オクトリー表現 17
図 12. スイープ表現 17
図 13. 相似三角形4つ組みへの埋め込み方法 19
図 14. 四面体体積比への埋め込み方法 20
図 15. 四角形の分割方法の違いによるシンボル列の埋め込み 21
図 16. 分割の細かさの違いによる埋め込み 21
図 17. 形状分離による埋め込み 21
図 18. VRMLによる形状記述例（四面体）とそのデータ表示 22
図 19. 辺番号の定義 23
図 20. 透かし情報の構成方法 23
図 21. 隣接する三角形の辺の接続関係を変更することによる情報の表現 24
図 22. 三角形の組み合わせと透かし情報の順序付けの説明 25
図 23. 透かし情報とする三角形の選択 26
図 24. ASCIIコード“A”の透かし情報変換 26
図 25. 透かしに使用する三角形の接続関係と情報の構成 27
図 26. 三次元形状（602ポリゴン）に透かしを施した実行結果（1） 34
図 27. 三次元形状（602ポリゴン）に透かしを施した実行結果（2） 35
図 28. 透かしを埋め込んだ三次元形状の切り取り操作への耐性 36
図 29. 埋め込み可能文字数の比較（三角形数5804） 36
図 30. 組み合わせる三角形の違いによる埋め込み可能な情報量の変化 37

1. はじめに

1.1. 研究の背景と目的

近年，インターネットにおいてWWW（Ｗｏｒｌｄ Ｗｉｄｅ Ｗｅｂ）による情報のやりとりが普及している．その情報は主にテキスト文書，静止画，動画，音声データによるものである．それに加えて，三次元コンピュータ・グラフィクス（ＣＧ）を利用した仮想空間を構築し，その空間内で情報を提供していく三次元コンテンツが注目を浴びている．三次元コンテンツ作成技術の一つにＶＲＭＬ（Ｖｉｒｔｕａｌ Ｒｅａｌｉｔｙ Ｍｏｄｅｌｉｎｇ Ｌａｎｇｕａｇｅ）［１］がある．ＶＲＭＬはインターネットにおいて三次元コンテンツ作成技術に欠かせないものであり，その標準といえるものである．

しかし，こういった情報のやり取りは同時にこれらコンテンツの不法な複製，編集，配布をも容易とし，問題となりつつある．こうした傾向は，データそのものに情報を埋め込んでコピーライトの通達や保護，盗用の牽制，あるいは在庫管理等に利用しようとする研究を促した．こうした情報埋め込みの技術は電子透かしと呼ばれる．

これまでのデータ埋め込みの研究は，埋め込みの対象を，テキスト文書，静止画，動画，あるいは音声データに限定していた．本研究では，三角形分割されたポリゴンの集合からなる三次元形状への電子透かし手法について述べる．

1.2. 本研究の特徴

本研究では，三次元形状データのうち頂点間の接続関係を記述する位相情報記述の冗長性を利用することにより情報を埋め込む電子透かし手法を提案する．これにより，データを劣化させることなく電子透かしを三次元形状に施すことが可能である．本手法では仮想的に三角形に辺番号を定義し，隣接する２つの三角形連結関係を変更することにより情報を埋め込む.

1.3. 本論文の構成

本論文では，２章で電子透かしと過去に提案されている手法について簡単に紹介し，３章では三次元形状データについて，４章では従来手法の三次元形状への透かし埋め込みの方法を，また５章では今回提案する三次元形状への透かし埋め込みの方法を示す．そして６章では提案したアルゴリズムの実行と評価を行い，７章でまとめと将来の展望を述べる．

2. 電子透かしと関連する研究

本研究の目的は三次元形状に電子透かしを施すことが目的である．そこで，まず電子透かしについての説明とその要件，用途と，これまでに発表されている手法についての概略を説明する［４０］.

2.1. 電子透かし

電子透かしとは，電子文書，画像，音楽などの創作作品の中に，著作者の固有の識別符号を密かに埋め込み，所有権の所在を主張しようとするものである．電子透かしは，そのコンテンツの著作権が誰にあるのかを明示するために埋め込まれた情報が欠落しないまま永久に保存される必要がある．そのためには，フィルタリングや再標本化，切り取り，データ圧縮などの多種多様な取り扱いに関して，透かし情報が変質もしくは消失しないことが大切なこととなる．だが，電子透かしではコンテンツを構成している基本要素，例えば画像の場合には画素単位に透かし情報を埋め込む操作を施すため，コンテンツの品質を劣化させてしまう．この劣化の度合いが，コンテンツ利用者にどれだけ許容されるか，そしてその利用形態や要求品質に大きく左右されることになる．電子透かしの要件として次に示すものがあげられる.

2.2. 電子透かしの要件

1. 電子透かしはコンテンツ自身に埋め込むこと．ヘッダ部や特定の領域に集中せず，コンテンツ全域ににわたり分散配置することが望ましい.

2. 透かし情報は編集，圧縮，伝送などの各種の処理に対して変質もしくは消失しないこと．コンテンツの編集において，特に画像の一部を切り出して利用する場合などにおいても正しく情報を復元できなければならない.

3. 電子透かしの改ざんや消去などの悪意のある攻撃に対して強いこと．埋め込みアルゴリズムを公開した場合などは，リバースエンジニアリングによって，たちまち改ざんや消去などの攻撃の対象となる可能性が生じる.

4. 透かし情報の埋め込みとその復元に必要な手続きは簡単で，その処理時間は少ないほうがよい．利用者側で署名，確認を必要とする環境下において画像データベース等を構築した際に，この処理に必要な時間は負担にならないことが必須である.

5. 正規に入手した複数のコピーを用いて透かし情報を不正に解読することが可能となることがある．この方法を暗号学では結託攻撃と呼んでいる．電子透かしでは，このよ

うな消去，改ざんなどの結託攻撃から守られる必要がある．

6. 透かし情報はできるだけ多く埋め込めることが必要である．コンテンツを識別できるために少なくとも数十ビットが必要となるであろう．透かし情報をコンテンツの隅々に繰り返しランダムに配置できるアルゴリズムが望ましい．

7. できる限り多くのメディアに共通して，コンテンツの使用にあまり制約を受けることなく，多様なフォーマットにも適合することが望ましい．

2.3. 電子透かしの用途

電子透かしにはその利用目的によりいろいろな用途を想定できる．それに関して次のようなアイデアが提案されている．その際に対象となる透かし情報の種類や量，形態などは用途ごとに異なり，透かし情報の秘匿レベルも変化する．

著作権情報

マルチメディア・コンテンツの製作者や版権者が，そのコンテンツの中に著作権を所有していることを示す透かし情報を記録しておく．市場に不正に公開・配布されたコンテンツの追跡調査やそれに伴う著作権侵害に接触するような場合に，透かし情報を復号して問題解決の手助けとして利用する．

購入者情報

前述の著作権情報は，コンテンツを販売するような場合には一つのコンテンツに対して複数の購入者がいることとなり，違法コピーの出所を突き止めることができない．そこで，コンテンツに対して一連の番号を付加して配布する方法がある．それによりコピーを再配布した人と，無許可のコピーと知りながらそれを利用している人を特定することができる．

利用者情報

コンテンツが公開された場合に，それがどのような経路をたどり人から人へ，あるいはコンピュータからコンピュータへと受け渡されるたびに，その経路に対するユーザの識別符号を透かし情報として記録する方法である．これは受け取ったユーザのクレジット番号やＩＤ番号，さらにはインターネット上のＩＰアドレスなどを自動的に透かしとして密かに記録するシステムである．コンテンツの受け渡しの度にその授受簿が作成されていくので，流通経路の調査，場合によっては違法コピーを追跡するための貴重なデータとして利用することができる．

利用制限情報

コンテンツの著作権情報などを利用して違法コピーを調査，訴追するのには多くの時間と多大な費用が必要となる．そこで，直接コンテンツにコピープロテクトを施すことが必要になる．コンテンツの外観にプロテクトを施すと，そこを対象として消去されたりするので，コピー者には分からないように密かにコンテンツ内に秘匿するのが望ましい．この目的でコンテンツにコピー制御信号を透かし情報として埋め込む考え方がある．コンテンツを再生表示する際に，透かし情報を抽出し，そのコンテンツが許可済みか否かを判定し内容表示を決定する．このためにはデジタルコピー再生器材にこの機能を設けることが必要である．

極秘通信

誰にも知られることなく，こっそりと秘密文を届けようとするものであり，すでに紀元前の昔から軍事や外交，諜報の世界で用いられている．たとえば，特殊インクやあぶり出し，不可視インクなどの形式が多用されており，電子透かしではコンテンツ中に密かに別の情報を埋め込んでおくことにより，極秘通信を実現する．

2.4. 電子透かしの分類

いまだ全てのメディアに共通使用可能な強度のある方法は提案されていない．各メディアに対して既に発表されている方法を表１に示す．

表 1. 埋め込みメディアによる分類[41]

メディア	データ形式		透かしの方法
画像	静止画	2値	濃度パターン法[2]，組織ディザ法[3]，誤差拡散法[4]，ランレングス法[5]
		多値	ビットプレーン法[6]，局所構造利用法[7]，画素空間法[8]，群構造法[9] パッチワーク法[10]，列生成法[11]，量子化誤差法[12]，FFT法[13]，スペクトル拡散[14][15]
		カラー	DCT法[16]，wavelet法[17]，ADCT法[18]，色差利用法[19]，色覚モデル法[20]
	動画		DCT法[21]，wavelet法[15]，動きベクトル[21]
	FAX		ランレングス法[22]，差分利用法[23]
音声	非圧縮	音声	時間マスキング法[10]，周波数マスキング法[24]，ディザ信号法[24]，適応PCM法[25]
		音響	エコー法[26]，スペクトラム拡散法[27]，変形DCT法[28]
	圧縮		ベクトル量子化法[29]，極性符号法[30]，音源パルス法[31]，パリティビット法[32]
文字	文書	和文	文字回転法[33]，文字幅伸縮法[33]
		英文	ラインシフト法[34]，ワードシフト法[35]
	ソフトウェア	ソースコード	変数名利用法[36]，命令文利用法[37]
		オブジェクトコード	ダミーコード利用法[38]

続いて，代表的なメディアに対する電子透かし手法について説明する［４２］．

2.4.1. 画像への電子透かし

静止画像

1. **2値画像**

画像データの中でも２値画像には特に冗長度が少ないので，この画素空間上で直接に透かし情報を埋め込むことは難しい．そこで，多値レベルで表された画素を２値化する際に得られる自由度に着目する．たとえば，濃度パターン法で図１に示すように１画素が４値の濃度で表現されるとき，それを２×２の濃度密度に変換する．この時，変換の自由度を利用して同値パターンを準備する．その中から透かし情報に従って出力パターンを決定すれば，そのビット情報を２値画像に埋め込むことができる．

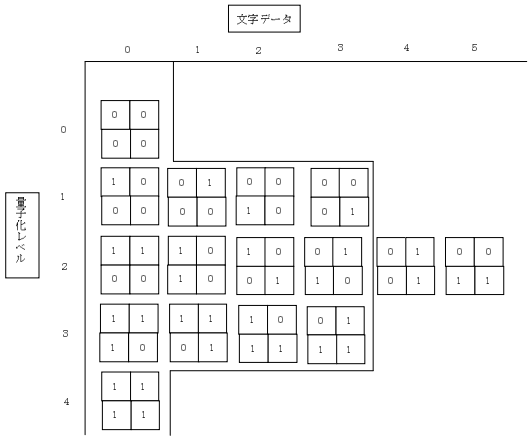


図 1. 濃度パターンへの埋め込み

2. **濃淡画像**

多値画像データには十分な冗長度が存在するので，これまでに多くの方法が提案されている．各タイプの代表的な考え方を以下に示す．

（１）**画素置換型**：画素のビット情報を密かに透かしのビット情報で置き換えてしまう方法である．このとき，どの画素位置のどのビット情報を置き換えるかを鍵で指定することが多い．隠蔽の構造が簡単なだけ，鍵に頼らなければならない．

（２）**画素空間利用型**：１ビット単位の画素情報の置き換えでは，埋め込みデータ量が少なく，ロゴマークなどの透かし情報を隠匿するのは難しい．そこで対象画素の近傍３×３画素の平面を図２のごとく輪切りにして取り出し，この周囲８ビットに署名印などを埋め込む方法がある．

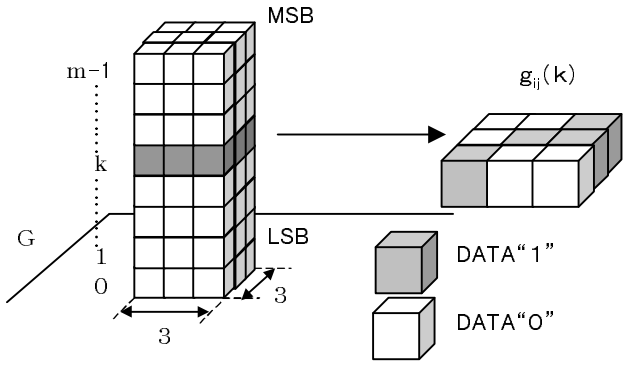


図 2. 画素空間への埋め込み

（３）**量子化誤差利用型**：予測符号化法では，次入力画素値を既入力画素の予測値から求め，その差分を量子化として符号化する．この量子化誤差に着目し，著作権情報のビット系列として透かし情報を画像データに埋め込みできる．

（４）**周波数領域利用型**：画素領域上で，直接画素に著作権情報を埋め込むのは容易であるが，その反面，画像の変換，圧縮，拡大，回転，微分，平滑化，切断などの各種の画像処理に対して脆弱である．この弱点を避けるには，周波数領域で埋め込むことが必須となる．

（ａ）離散フーリエ変換（ＦＦＴ）法：画像符号化の分野では時系列信号の解析にＦＦＴがよく用いられている．画像信号は一般に周辺との変化が比較的少なく，相関性が強いので，スペクトルは低周波領域に集中し，高周波領域にはあまり分布していない．図３にＦＦＴによる出力周波数領域の一部を示す．このＦ領域には画像のエキスを，Ｔ領域には埋め込みテキストビットをビット成分としてランダムに配置する．０領域は通常データ圧縮のためカットする．このときｒを鍵として用いる．このように工作した画像を逆ＦＦＴすると，透かし情報を画像の高周波成分に秘匿することができる．

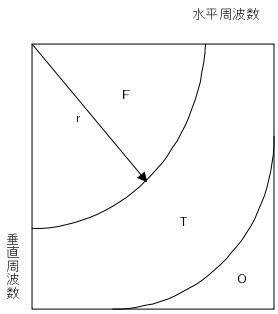


図 3. フーリエ変換領域

（ｂ）離散コサイン変換（ＤＣＴ）法：ＦＦＴで画像圧縮を実行する場合，位相成分として虚数空間を常に考慮する必要があるが，ＤＣＴを用いると実数空間だけで，同様の議論を展開できる．そこで，画像圧縮にはＪＰＥＧやＭＰＥＧなどでＤＣＴを用いることが多い．この場合にも，図３と同じく画像の高周波成分を圧縮のために捨て，低周波成分には透かし情報を埋め込むことが可能である．

（ｃ）スペクトラム拡散（ＳＳ）法：画像データをＦＦＴやＤＣＴなどを用いて直行変換すると周波数スペクトラムは２次元に拡がる．そこで，透かし情報をこの周波数領域の上に分散配置する．その方法として，位置ｉのスペクトラムV_iに次式によって透かしX_i，$V_i' \leftarrow V_i (1 + a X_i)$　　$i = 1, 2, \ldots, n$

を挿入する．ただしａはスケールパラメータである．$V_i \neq 0$ならば可逆関数となるので，(V_i，V_i'）の組が与えられたとき，X_iを逆算することが可能となる．この原理に基づいて，周波数領域の低周波成分上の指定した位置ｉの値$\{V_i\}$を$\{V_i'\}$の置き換えて，逆ＦＦＴ又はＤＣＴ変換する．この逆変換により，$\{X_i\}$は実画像上へ拡散されてしまい，ほとんど人間の目には認識できなくなる．

（５）**統計量利用型**:濃淡画像Ｐから無作為に任意の２点を選び，その輝度値をa_i，b_iとする．ここで，$S_i = a_i - b_i$とおく．Ｐから無数に（a_i，b_i）の組を抽出し，その期待値（ΣS_i）を求めると０になる．そこで透かし情報を埋め込むには，既知の乱数生成器に鍵を与えて，ランダムに（a_i，b_i）$i = 1, 2, \ldots, n$を作り，$a_i \leftarrow a_i + \Delta$，$b_i \leftarrow b_i - \Delta$と工作し，Ｐに戻す．繰り返し数ｎや偏りΔの設定を適当に選ぶと耐久性のある方法となる．この方法をパッチワークと呼んでいる．

３．カラー画像

カラー画像では他のメディアに比較し極めて大きい冗長性を持っている．そこで，明度，色相，彩度について人間の目に識別できない範囲内で画像データの中に著作権情報を埋め込むことができる．ここでは特にカラー画像に特有な方法を述べる．

（１）　クロミナンス成分利用型

人間の視覚特性では，色差や彩度情報は一般に輝度情報より階調識別能力が低下する．図４は青と黄との色差方向と彩度での周波数に対する識別階調数を求めたものである．プリンタに要求される階調特性としては，輝度の視力限界特性まで要求される．すると，色差や彩度情報にとってはオーバースペックとなり，この輝度との差の部分に見えない記録が可能となる領域が存在する．この盲点を巧みに利用すると，高周波色差情報を用いることにより画質劣化なしに透かし情報を埋め込むことができる．

（2） ルミナンス成分利用型

カラー画像データをルミナンス成分（Ｙ）とクロミナンス成分（Ｃｒ，Ｃｂ）に分離した後，ＪＰＥＧのアルゴリズムにしたがって二次元離散コサイン変換を実行する．このとき，Ｙ成分に対して変換出力をＪＰＥＧ指定により量子化すると，量子化誤差が発生するので，容易に著作権情報を埋め込むことができる．この場合適応型の符号化方式を利用するならば，埋め込みデータが出力画像にほとんど影響を与えない特長がある．

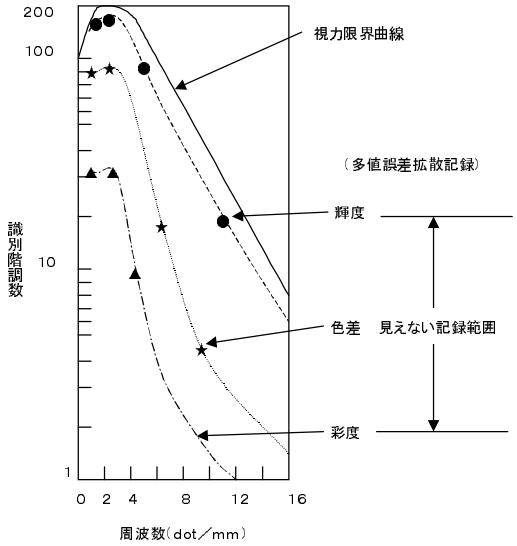


図 4. 識別階調特性

2.4.2. 動画像への電子透かし

動画像は，ＭＰＥＧ２やＭＰＥＧ４に規定されるフォーマットで，市場にリリースされるこのタイプのコンテンツへの著作権保護のためにデジタル透かしの技術が重要な役割を果たすことになる．ＪＰＥＧで可能な静止画への埋め込み技術は，ＭＰＥＧでもほとんど適用できる．しかし，ＭＰＥＧでは膨大なデータ量を極力圧縮するためにＭＰＥＧ独自の符号化法を採用しているので，それに見合った透かし情報の埋め込み方法が考案されている．ＭＰＥＧ２の符号化器を図５に示す．図５からわかるように，ＭＰＥＧ２ではＤＣＴと動きベクトルの技術を採用している．ＤＣＴ部分については，既に述べた方法を利用できるが，動きベクトルを利用する部分はつぎの方法で透かし情報を埋め込むことができる．ＭＰＥＧ２では動きベクトルを図６に示すように画素Ａ，Ｂ，Ｃ，Ｄ間を直線補間した仮想的な０．５画素の輝度を用いて動き補償予測方式で推定している．この○と×を透かしビット０と１で制御する方法が有望である．

その他，ＭＰＥＧ２のＤＣＴ規格に透かし情報を埋め込む提案も多くあるが，その手法はＪＰＥＧ対応の拡張版である．

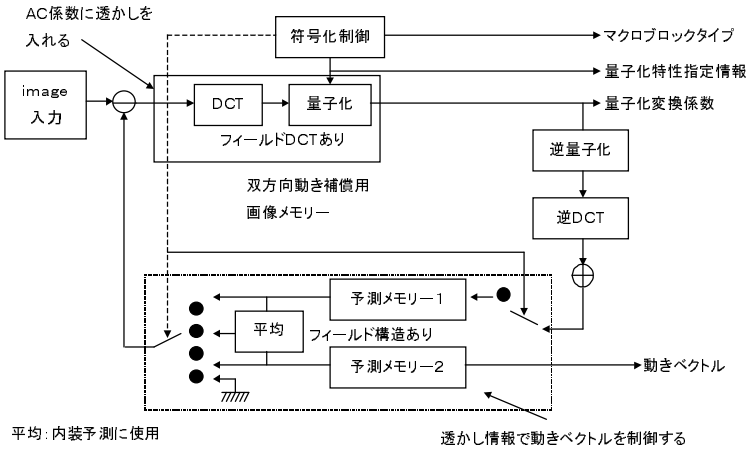


図 5. MPEG2符号化器

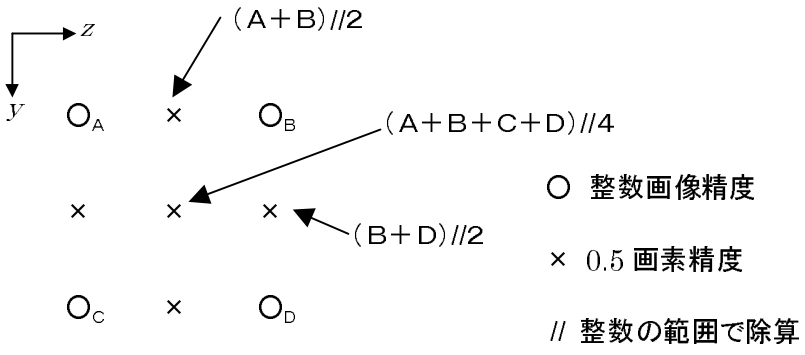


図 6. 動きベクトルへの埋め込み

2.4.3. 音声への電子透かし

画像データにくらべて音声データの冗長度は少ないので，著作権情報を埋め込む際に制約を受けることになる．また，人間の聴覚系のダイナミックレンジは広く，ノイズに対する感度も鋭いことから，聴音環境によっては微少なノイズも検出されてしまうことがある．このため，人間の識別能力の低い位相成分や量子化成分，あるいは量子化ノイズなどに混入させる方法を利用して透かし情報を埋め込む場合が多い．

（1） 量子ノイズ利用型

最も初歩的な方法である．アナログ信号をデジタル波形に量子化する際に差分歪みが発生しノイズの発生源となる．このノイズ信号に変えて透かし情報を埋め込むと秘匿効果が得られる．

音声振幅の時間的変化に追随するために，量子化特性を可変にした符号化方式にＡＤＰＣＭ Ｇ．７２６がある．この音声符号化手順では，近接する量子化値が互いに高い相関を持つことに注目して，量子化差分から適応予測値を求めている．そこで，この適応予測値の極性符号の変化点をランレングスで測定し，それが指定範囲（鍵）内にあるときのみ，透かし情報を埋め込む方法も提案されている．

（2） 位相利用型

量子化ノイズを利用して透かしを埋め込む方法は，音声コードの下位ビットを利用するため，操作処理に弱い欠点がある．この難点を克服する一つの方法は音声信号の位相差を利用することである．例えば，音声データをｎ個ずつブロックに分け，ＦＦＴにより周波数領域に移して透かし情報により識別可能な範囲にずらして復号する方法がある．

（3） マスキング

人間の耳には，静かな環境で聞こえていた音も急に大きな音が到来するとその音に抑制されて聞こえなくなるマスキング効果がある．この効果は，強い音圧の直前５～２０ｍｓ，および直後５０～２００ｍｓにおいて発生し，また，周波数領域においても近接する周波数間で引き起こされる．したがって，周波数や，音圧，あるいは階調特性に依存し，透かし情報を巧みに埋め込むことが可能となる．

3. 三次元形状データについて

本章では，ＣＧ技術の中枢をなす三次元ＣＧによる映像生成のために用いられている様々な物体の表現法について述べる［４３］.

3.1. 境界表現

境界表現は，ソリッドモデルの表現に使われる方法で，立体の形状を頂点・稜線・面などの接続情報で表現する．形状がそのまま表現されるので変形などがしやすい反面，データ量が大きくなる欠点がある.

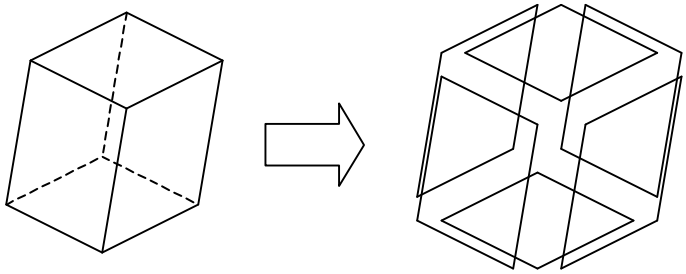


図 7. 境界表現

3.2. CSG表現

ＣＳＧ表現は，ソリッドモデルの表現方法で，立体・球・円柱・多角柱などのプリミティブと呼ばれる基本形態の集合演算（ブーリアン・オペレーション，和・差・積）によって立体を表現する.

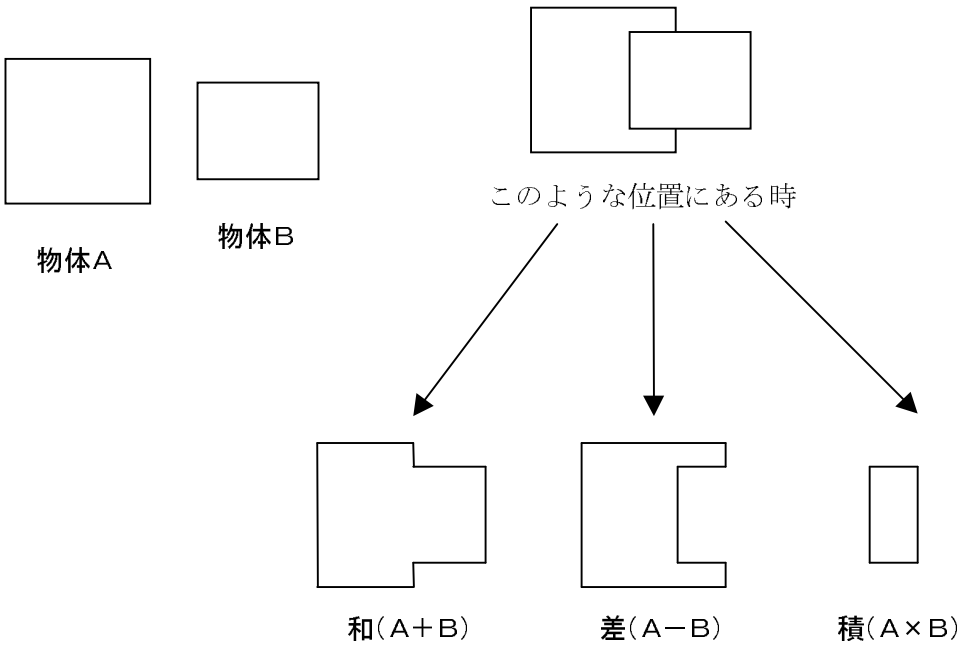


図 8. CSG表現

3.3. メタボール

メタボール（濃度球）は，全ての立体を球の集合で表現する方法で，複雑な自由曲面によく用いられる．ある一定の濃度（影響力の強さ）以上が表示される球を考え，それらが接近することで融合や変形が起こり，新しい形状が定義される．

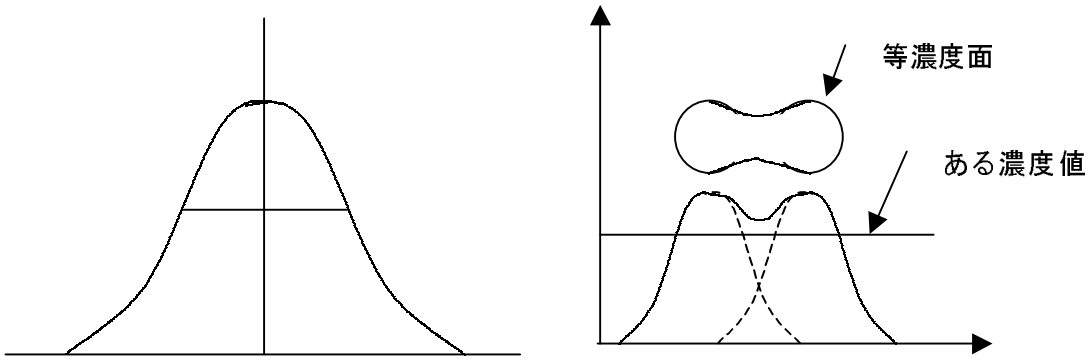


図 9. メタボール表現

3.4. ボクセル表現

ボクセル表現は，立体を小立体の集合で表現する方法である．画面上の画像が小正方形（画素=ピクセル）の集合で表せられるのに対して，ボクセルと名付けられている．人工的な形状よりも不規則な形状表現に向いている．データ構造は簡単であるが，データ量が大きくなる．

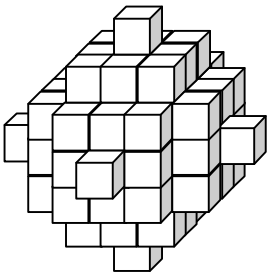


図 10. ボクセル表現

3.5. オクトリー表現

オクトリー（八分木）表現は，目的の立体を含む最小の立体を定めて，その３辺を２等分して立体を８分割する．分割された各立方体が形状の内部にあるのか，外部にあるのか，一部が内部にあるのかを判定し，最後の場合はその立方体を８分割する処理を繰り返していく．ボクセル表現に似ているが，膨大なメモリを必要とする欠点が改善されている．

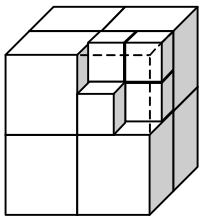


図 11. オクトリー表現

3.6. スイープ表現

スイープ（掃引）表現は，平面図形を一定方向に移動させることで立体を作る方法である．移動の方法には平行移動や回転がある．円を平行移動させると円柱ができ，円の外部にある点を中心に回転移動（３６０度）するとドーナツ状の形状になる．

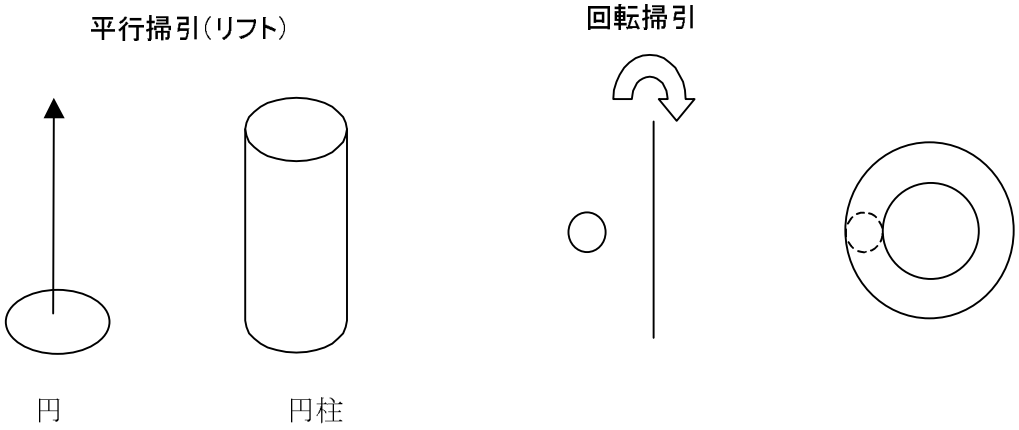


図 12. スイープ表現

3.7. 二次曲面

ボール，丸い鉛筆，筒状の箱等は二次曲面で近似できる．また，機械部品には二次曲面を組み合わせた形状をしているものが多くある．このような形状を表現する場合には二次曲面が効率的である．たとえば，球の形状をポリゴン近似で保持すると，大量のデータになってしまうが，二次曲面ならば中心座標と半径のみの４個の実数を保持することですむ．二次曲面には，楕円体面，楕円錘，楕円柱などがある．

3.8. パラメトリック曲面による表現

自動車のボディーのような滑らかな曲面の表現は，パラメータによる陽関数形式で表現されたパラメトリック曲面が用いられている．パラメトリック曲面とは，曲面上の点（ｘ，ｙ，ｚ）が２つのパラメータ（ｕ，ｖ）の関数ｆ，ｇ，ｈにより表されたもので，次のような関数形になっている．

$$x = f(u, v),\ y = g(u, v),\ z = h(u, v),\ 0 \leqq u, v \leqq 1$$

代表的なパラメトリック曲面には次のようなものがある．

- ベジェ曲面

  三個以上の点のデータから１つの曲線（の一区間）を描くものである．この曲線は始点と終点以外では指定された点から離れて描画される．

- Ｂスプライン曲面

  指定点付近を通る近似曲線の係数の和が１になるような関数をＢスプライン関数といい，その近似曲線をＢスプライン曲線という．近似曲線に何次の関数を用いるかによって，ｎ次のＢスプライン関数が定義できる．

- ＮＵＲＢＳ曲面

  結接点が等間隔でない有理化されたＢスプライン曲線，曲面．

上記に示したように三次元形状の表現方法はたくさんある．全ての三次元形状の表現方法に対応した電子透かし手法を提案できることが望ましいが，現在までのところ全てのメディアに対応できる透かし手法は存在しない．

現在WWW上で三次元仮想空間や三次元仮想物体の形状や動作を表現する言語として，ＶＲＭＬが注目されている．これは形状をポリゴンで表現し，また，ＩＳＯ／ＩＥＣ ＪＴＣ１／ＳＣ２４で国際標準化提案がなされるなど，標準化としての地位を築きつつある．ユーザはベンダーから提供されているＶＲＭＬブラウザをサーバからダウンロードして，様々なサイトで団体や個人が公開しているＶＲＭＬの三次元空間内を自由にウォークスルーしたり，三次元仮想物体を鑑賞することが可能である．したがって，本研究では利用頻度が高いと思われる三次元ポリゴンモデルを対象としてその透かし手法について考察する．

4. 従来手法

幾何形状を対象とした従来の電子透かし手法［３９］では，頂点座標値とその接続関係である位相情報を用いた方法が提案されている．ここではその概略を示す.

4.1. 頂点座標値を利用した方法[39]

4.1.1. 相似三角形4つ組みへの埋め込み

頂点座標値を利用する方法では，３Ｄシーンを構築したときにモデルの移動や回転が行われるため，座標変換を行っても透かし情報が消えないようにする必要がある．そこで，従来手法では，平行移動，回転，一様スケーリングに不変である相似な三角形を決める二つの無次元量に着目し，それを変更することにより透かし情報を構成している．例えば，｛ｂ／ａ，ｃ／ａ｝，または角度｛ｔ１，ｔ２｝がその無次元量になる．埋め込みの際は隣接する３角形の４つ組みを１つの埋め込み単位として，これら４つの３角形の，２つにデータ，１つに順序，残りの1つに埋め込んだ情報を取り出す際の目印とするマークを構成する．相似三角形達決める無次元量のペアを変更するために各三角形の頂点を微少に動かし，究極的には無次元量のペアを変更し情報を埋め込む ．

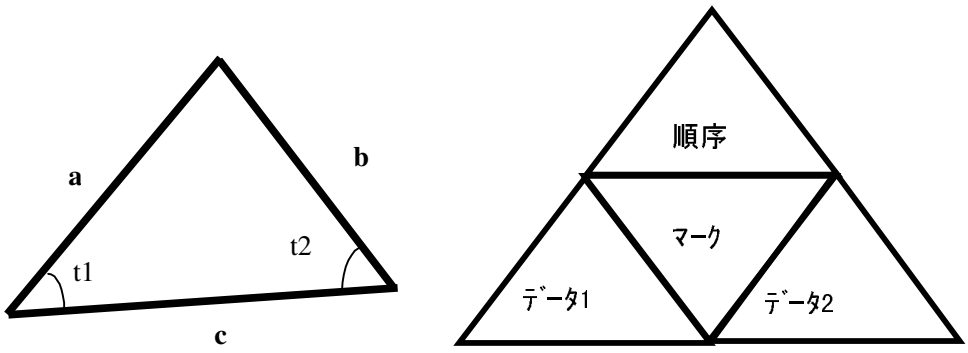


図 13. 相似三角形4つ組みへの埋め込み方法

4.1.2. 四面体の体積比への埋め込み

ここで示す方法はずれ変形などのアフィン変換に対して透かし情報が消えないようにするために，四面体の体積比を用いて情報を埋め込む．埋め込み方法の概要は，図１４（ａ）ような三次元形状があった場合にあらかじめ決めておいた規則により始点となる頂点を求める（図１４（ｂ））．そして，形状の三角形の隣接関係を利用し頂点の展開木を求める．次に三角形の木を作り（図１４（ｃ）），順序が付いた三角形列を構成する（図１４（ｄ））．その後適当に選んだ数個の３角形達の頂点達の重心を求め，これを共通の頂点として，各三角形を四面体にする（図１４（ｅ））．そして，四面体の１つを体積の分母としてその他の四面体を体積に分子にし，順序を持った体積比の列を作る（図１４（ｆ）），後はおのおのの体積比を微少に変更することにより情報を埋め込む．

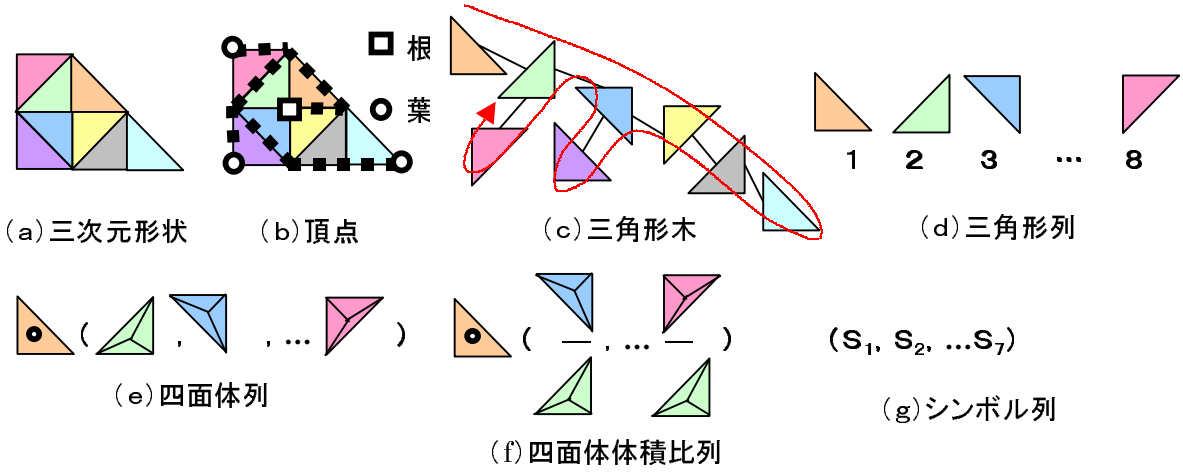


図 14. 四面体体積比への埋め込み方法

4.2. 位相情報(頂点間の接続関係)を利用した方法[39]

先ほどまでは主に頂点座標値を利用し透かし情報を埋め込んでいたが，頂点の接続関係を示す位相情報を利用し透かし情報を埋め込んだ方法も提案されている．位相情報のみを使用する場合原理的に頂点座標値の変更の影響を受けないため先ほどの手法で欠点だった頂点座標値に乱数を付加する場合など考慮する必要がない．

位相情報を利用した方法には，四角形を２つの三角形に分割する場合の分割方法の違いを二進数の１，０に対応させて透かしを埋め込む手法が提案されている（図１５）．また，多角形の分割の細かさを変えてワイヤーフレーム表示のときに人間に視覚的に知覚できるパターンを埋め込む方法も提案されている（図１６）．最近では，データ量の削減や画面表示の高速化のために形状の簡略化が行われる．この形状簡略化に対して耐性を増すために，三次元形状中に透かし情報となるパターンをサブセットに分離しておき，再び合成することによって形状簡略化を行うソフトが形状の境界部分となる頂点座標値や位相情報を変更しないことに着目して耐性を増した方法もある（図１７）．

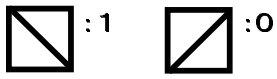


図 15. 四角形の分割方法の違いによるシンボル列の埋め込み

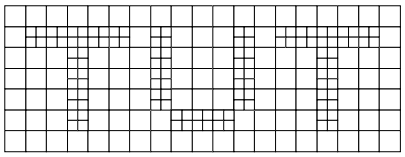


図 16. 分割の細かさの違いによる埋め込み

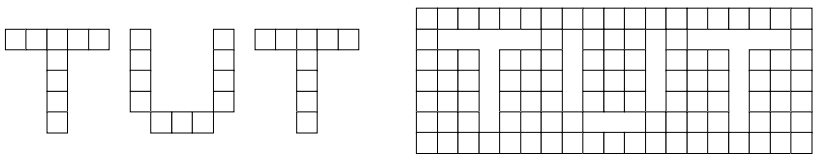


図 17. 形状分離による埋め込み

5. 三次元形状への透かし埋め込み手法

本章では，今回提案する三次元形状への電子透かし手法について述べる．本研究では幾何形状の情報のうち位相情報に着目し透かし情報を埋め込む．まず，三次元形状の表現の一つであるＶＲＭＬをもとに説明する．その後，透かし情報の構成，埋め込み方法について述べる．

5.1. VRMLによる三次元形状の表現方法

一般に，三次元形状モデルは，頂点，稜線，面などの隣接関係を示す位相情報と，座標値や曲線・曲面の方程式を示す幾何情報とから構成されている．本研究では位相情報を特徴値として用いて，１つの三角形に仮想的に定義した辺番号をもとに，２つの三角形で共有された辺の接続関係を変更することによって透かしを埋め込む．そこでまず，三角形に辺番号をつける方法と，それを利用して情報を表現する方法について述べる．三次元形状の例として，四面体をＶＲＭＬで記述したものを図１３に示す．ＶＲＭＬではIndexedFaceSet ノードを使い，ユーザが定義する任意の三次元形状を作成することができる． IndexedFaceSet ノードの coord フィールドに図１８右の０～３の各頂点の座標データを指定する．IndexedFaceSet ノードの coordIndex フィールドに面を構成する頂点番号の組み合わせである位相データを指定する．ここでは，各頂点番号の終わりに区切りとして－１を置く．

```
#VRML V2.0 utf8

Shape {
      appearance Appearance {
            material Material {}
      }
      geometry IndexedFaceSet {
            coord Coordinate {
                  point [
                        -1 0 1,
                         1 0 1,
                         0 0 -1,
                         0 1 0,
                  ]
            }
            coordIndex [
                  0, 2, 1, -1,
                  1, 2, 3, -1,
                  0, 1, 3, -1,
                  0, 3, 2, -1,
            ]
      }
}
```

幾何データ

位相データ

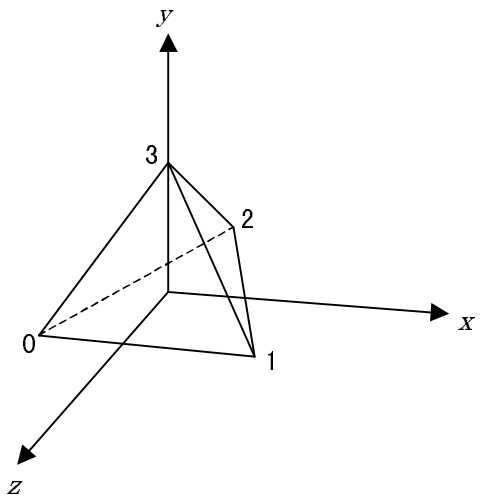


図 18. VRMLによる形状記述例（四面体）とそのデータ表示

5.2. 辺番号の定義方法

辺番号は，図１９のように位相情報で［Ａ，Ｂ，Ｃ，－１,］という記述がある場合にＡ，Ｂの記述部分を辺①，Ｂ，Ｃの記述部分を辺②，そしてＣ，Ａの記述部分を辺③と定義する．面を構成する位相データは，面の向きを定義するためにその並びの順序を左回りか右回りで統一すること以外は，どの頂点番号から記述するかは任意である．例えば，図１８の位相データで最初の記述［０，２，１，－１,］は，［２，１，０，－１,］，［１，０，２，－１,］とも記述することもできる．

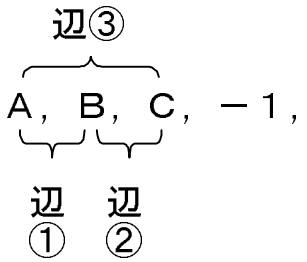


図 19. 辺番号の定義

5.3. 透かし情報の構成

透かし情報は，図２０に示すように２つの三角形で共有された辺において辺番号の定義と頂点番号記述順序の冗長性により位相情報の記述方法を変更することによって構成する．例えば，［１，２，３，－１,］と［３，２，４，－１,］という記述では，頂点２と３を結ぶ辺が共有されており，辺番号の定義から辺②と辺①が接続していることになる．このような組合せは９通りが存在し，３ビットの２進数では，（０００）$_2$～（１１１）$_2$までの表現が可能となる．その表現パターンを図２１に示す．透かし情報として文字列などを表現するには幾つかの三角形をまとめて使用する．

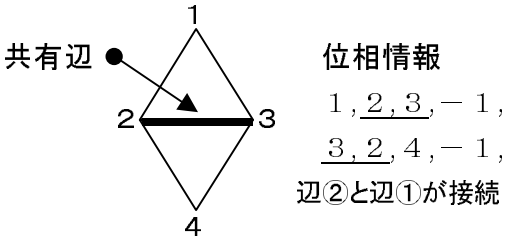


図 20. 透かし情報の構成方法

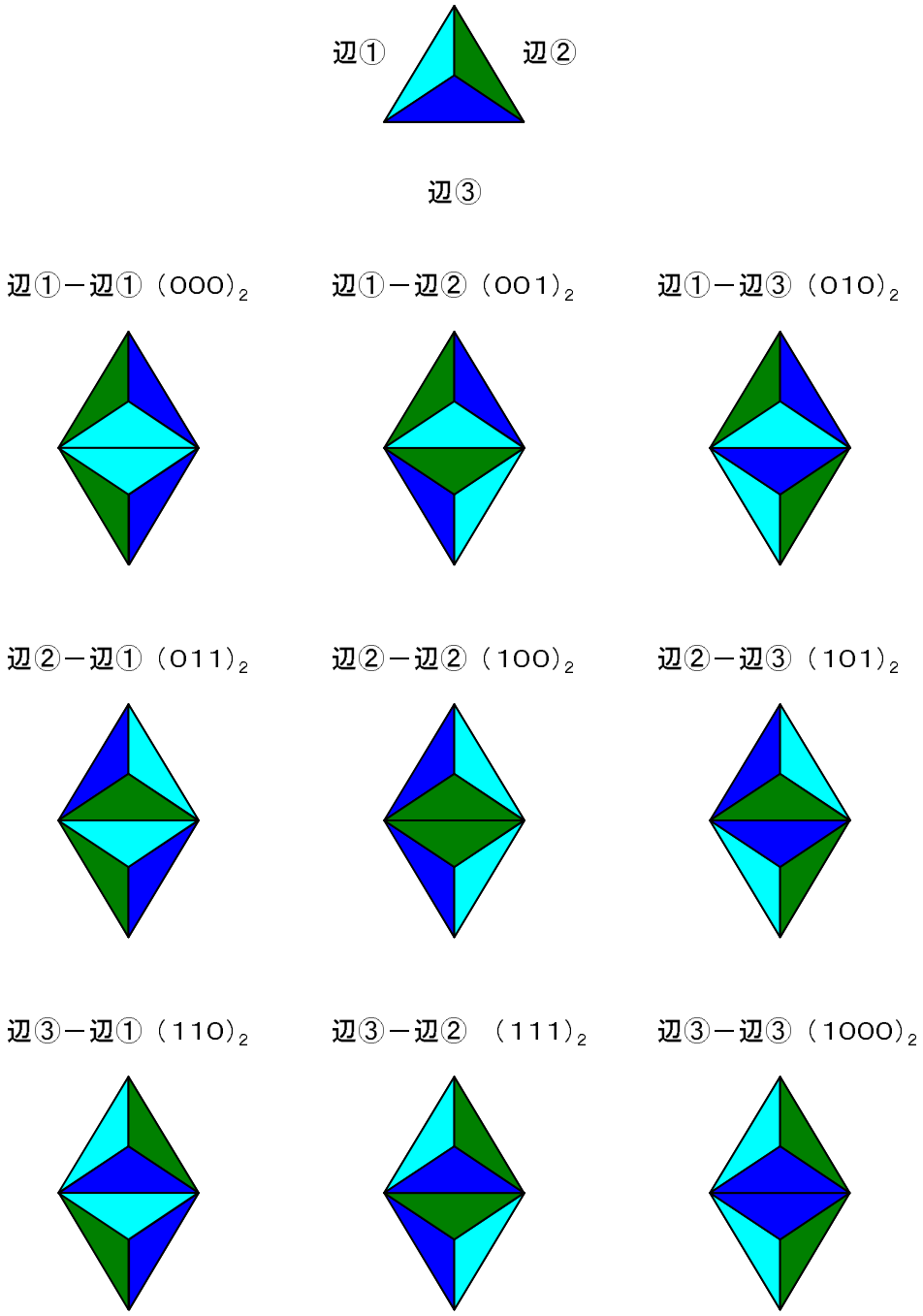


図 21. 隣接する三角形の辺の接続関係を変更することによる情報の表現

5.4. 基本的な透かし埋め込み手法

5.4.1. 透かし埋め込み方法

前節までに示した辺番号の定義方法，透かし情報の構成により三次元形状に透かし情報を埋め込むことができる．しかし，これだけでは三次元形状中のいったい何処にどのようにして埋め込んであるかが，透かし情報を取り出す際に判定できない．そのため，情報の取り出し順序と，どの隣接する三角形を組み合わせて情報を構成するかの情報を三次元形状のみから分かるようにしなければならない．そこで，図２２のようにＶＲＭＬファイル記述順序を利用し，IndexedFaceSet ノードの coordIndex フィールドに面を構成する頂点番号の組み合わせである位相情報の記述順を用いて，隣接する三角形を組み合わせと埋め込む透かし情報の取り出し順序を指定する．

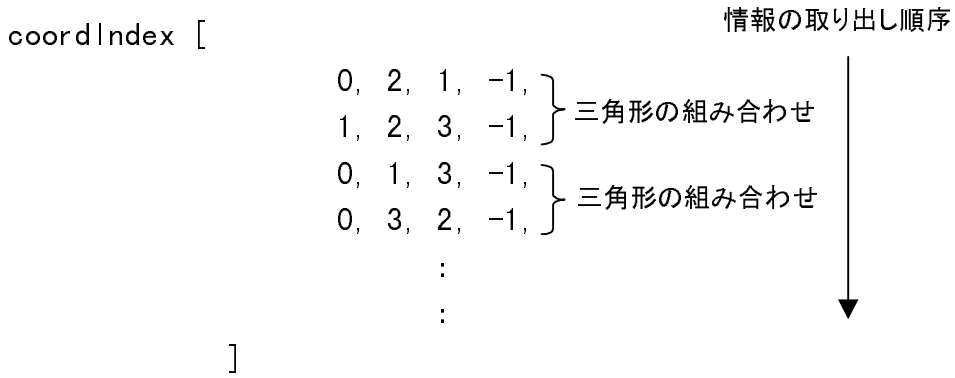


図 22. 三角形の組み合わせと透かし情報の順序付けの説明

実際に透かし情報を埋め込む場合には，まずファイルの記述順より１つの三角形を取り出し，そこに隣接する三角形のうち位相情報中で最も先に記述されている三角形を組とする．組となった三角形は対象からは取り除き，残りの位相情報で同様にして三角形のペアをみつけていく．図２３にある位相情報では，まず，［０，１，４，－１,］を対象とし，それに隣接する三角形を求める．通常，１つの三角形に隣接する三角形は３つあるが，ファイルの記述順により選択するので，この場合は頂点番号１と４を共有している位相情報［１，２，４，－１,］を選択する．［０，１，４，－１,］と［１，２，４，－１,］は探索の対象として除き，次は［２，３，４，－１,］の位相情報のペアとなる三角形を探す．この場合は，頂点番号３と４を共有する位相情報［３，０，４］を選択する．以下同様にして，記述の最後まで探索を続ける．

```
coordIndex [
        0, 1, 4, -1,
        1, 2, 4, -1,
        2, 3, 4, -1,
        3, 0, 4, -1,
        0, 1, 5, -1,
        1, 2, 5, -1,
        2, 3, 5, -1,
        3, 0, 5, -1
]
```

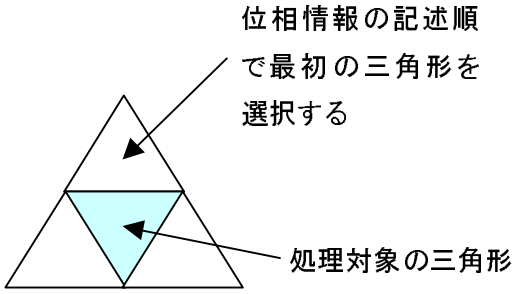


図 23. 透かし情報とする三角形の選択

透かし情報としてＡＳＣＩＩコードで“A”という文字を埋め込むときには，先ほど選択した三角形のペア［０，１，４，－１,］と［１，２，４，－１,］,［２，３，４，－１,］と［３，０，４，－１,］,［０，１，５，－１,］と［１，２，５，－１,］を用いて，図２４のように“A”を２進数に変換し，ＬＳＢより３ビットずつ分解し，それらを各三角形の組に対応させて辺の接続関係を変更する．

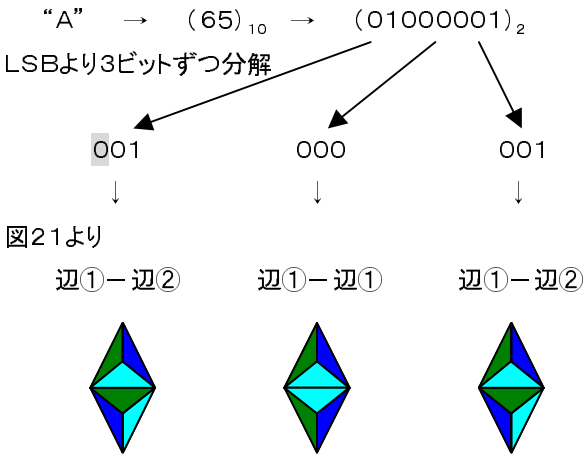


図 24. ASCIIコード“A”の透かし情報変換

5.4.2. 透かし取り出し方法

透かし情報の取り出しは，ファイルの記述順より位相情報６つをずつ取り出し，図２４とは逆の順序で文字をデコードしていく．

5.5. 頑強さを増した埋め込み方法

前節で提案した手法では，ファイル中の位相情報の記述順序を変更することによって，埋め込んだ透かし情報を容易に取り除くことができる．そこで本節では，５．３節で説明した透かし情報の表現方法を用いて，三次元形状中のどこに透かし情報が埋め込まれているかを示す印（以下，マーカ）と，透かし情報，そして透かし情報の順序に関する情報を位相情報中に埋め込む方法について述べる．データ通信において転送の際にデータのパケット化を行うが本手法はその考えを利用した方法である．透かしに順序を与えることによって長い文字列等を埋め込むことも可能となる．また，三次元形状の切り取りや，記述順序の変更に対しても頑強さを増すことができる．本節で述べる手法では，透かし情報を埋め込み可能な範囲で，最大２５６番まで順序のついた文字を埋め込むことが可能である．

5.5.1. アルゴリズムの概要

まず，未だ埋め込みに使用していない図２５（ａ）のような接続関係を持つ三角形列（１文字で１６個）を三次元形状中より選ぶ．

選んだ三角形列において５．３節で示した透かし情報の表現方法を用いて，図２５（ｂ）のように太線で示した辺を共有する三角形の辺の接続関係を目的とする構成に変更し，マーカ，透かし情報，そして順序を埋め込む．マーカは，透かし情報の表現方法で９種類のうち使用していない残りの１つの表現を用いることによって構成する．また，図２５（ｂ）に示した埋め込みに使用する三角形の接続関係では，位相情報中に順序とデータの両方を埋め込むのでどちらが順序かデータなのかを区別する必要がある．その区別には，情報を構成する三角形の組み合わせで構成する９ビット中の１ビットを用いてその区別を行う．

透かし情報の取り出しでは，まずマーカとして構成されている三角形の接続関係を探す．それから，図２５（ｂ）のようにあらかじめ決めておいた規則で順序とデータを読み出す．

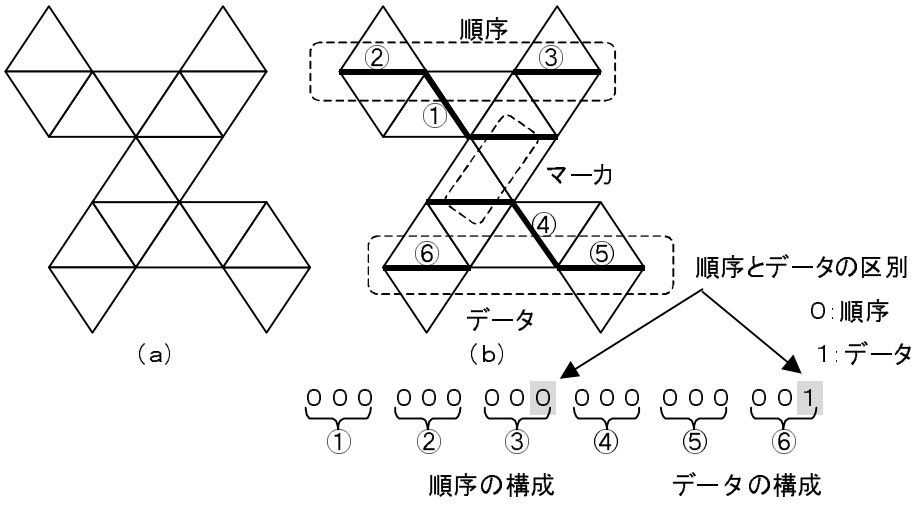
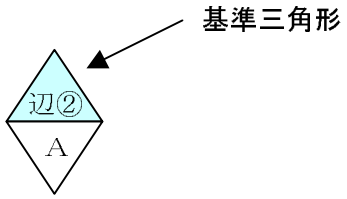


図 25. 透かしに使用する三角形の接続関係と情報の構成

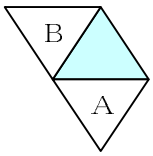
5.5.2. 透かし埋め込み方法

ある三角形を基準としてそこに透かし情報のデータと順番を埋め込む．いまだ埋め込みに使用されていない仮に選択した，１つの透かし情報を構成するのに必要な１６個の三角形のみつける方法は次のようにする．

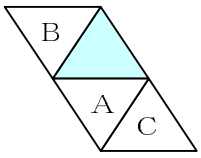
1. ファイルの記述順で１つの三角形（基準三角形）を取り出し，辺②で指定した三角形（三角形A）を見つける．



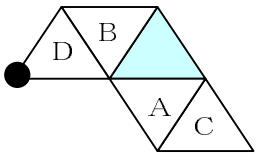
2. その後，求めた２つの三角形の共有した辺から，基準三角形の辺につく三角形の時計周りで１つ目の辺に接続する三角形Bを求める．



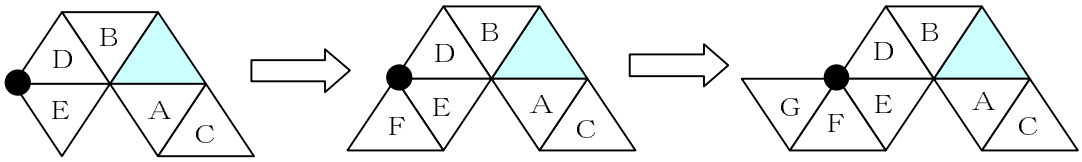
3. 同様に，基準三角形と三角形Aで隣接した辺より時計周りで最初の辺に隣接する三角形Cを求める．



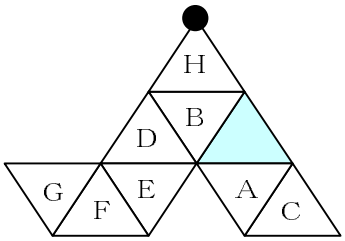
4. その後，Bに隣接する三角形において基準三角形と三角形Bとで共有された辺より時計周りで最初の辺につく三角形（三角形D）と，三角形Dと三角形Bとで共有されていない頂点番号を求める．



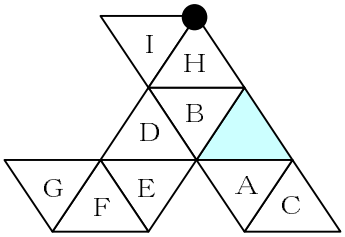
5. 求めた頂点番号を持つ三角形を先ほど求めた三角形Dから時計周りで３つ取り出す.



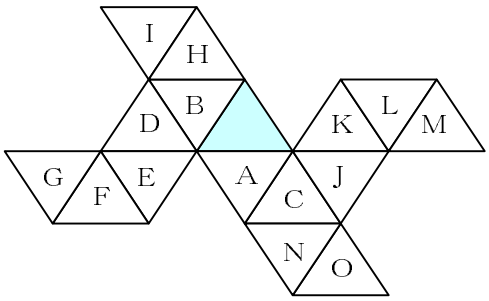
6. その後，Ｂに隣接する三角形において基準三角形と三角形Ｂとで共有された辺より時計周りで２番目につく三角形（三角形H）と，三角形Hと三角形Ｂとで共有されていない頂点番号を求める.



7. 求めた頂点番号を持つ三角形を先ほど求めた三角形Hから時計周りで１つ取り出す.



8. それから，三角形Ｃより先ほどと同様な方法で埋め込みに使用する三角形列（三角形Ｊ～三角形O）をみつける.



9. そして，見つけた三角形Ａ～三角形Oにおいて既に埋め込みに使用されていないか，仮に選択したうちの同じ部分が重複して選択されていないかの検査を行う.

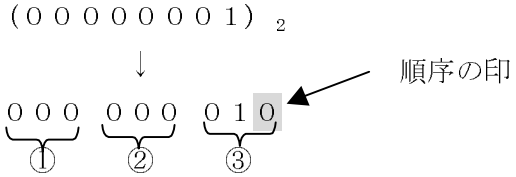
10. 検査にパスすることにより基準三角形と三角形Ｂ，三角形Ａと三角形Ｃは，マーカとして使用するために三角形の接続関係を辺③－辺③に変更する．検査にパスしない場

合には，手順１～８で仮の埋め込み部分として選択した三角形列を取り消し，次の基準三角形から上記に示した同様の操作を行う．

11. そして，三角形Ｄと三角形Ｅ，三角形Ｆと三角形Ｇ，三角形Ｈと三角形Ｉの部分に透かしの順序を入れるためにそれらの三角形が共有する辺の接続関係を変更する．

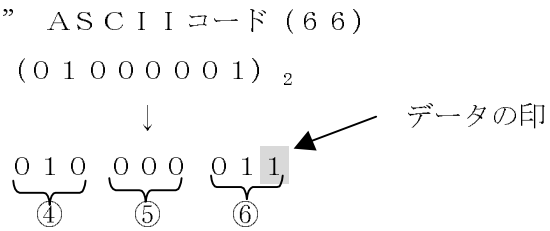
例えば，透かし情報の順序を１とする場合には，次のように行う．

１０進数の１は８ビットの２進数表現では（００００００１）$_2$となる．これをＭＳＢより３ビットずつ分解していく．３ビットずつ分解していくと最後の部分は２ビットとなるが，そこの部分は最後に順序としての印である０を付加して３ビットとする．



12. その後，①を三角形Ｄと三角形Ｅ，②を三角形Ｆと三角形Ｇ，③を三角形Ｈと三角形Ｉの部分に対応させ，図２１に示した透かし情報の表現方法により三角形の接続関係を変更する．

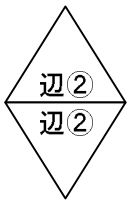
13. そして，三角形Ｃに接続する三角形列についても同様に１１，１２の方法でデータを埋め込むために，④を三角形Ｊと三角形Ｋ，⑤を三角形Ｌと三角形Ｍ，⑥を三角形Ｎと三角形Ｏの共有する辺の部分の接続関係を変更する．下図は文字“Ｂ”を埋め込む場合を示す．



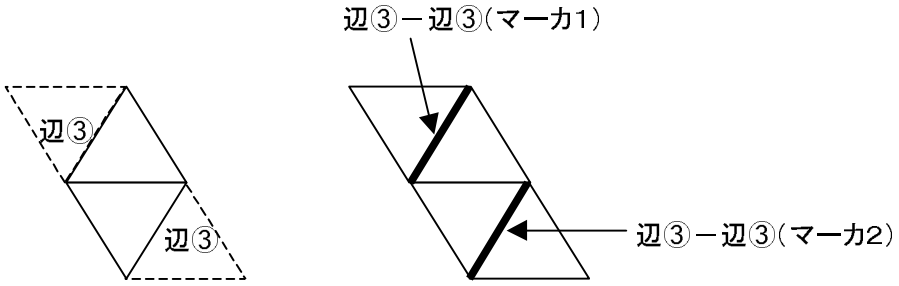
5.5.3. 透かし取り出し方法

三次元形状中からデータを取り出す場合は次のようにして行なう．

1. 辺②－辺②で接続する三角形を三次元形状中から探す．

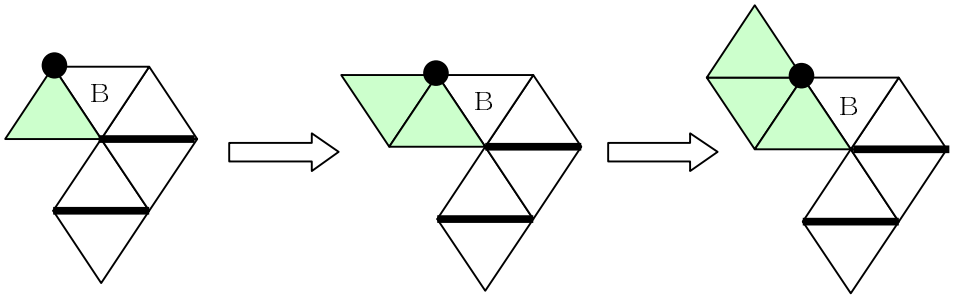


2. 見つけた三角形の２つにおいて，それぞれの三角形で辺③につく三角形を調べる．それらが辺③－辺③の接続関係で隣接していればそこが情報の埋め込み位置（マーカ）となる．

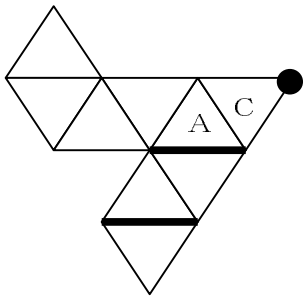


3. 続いて透かし情報の順序とデータを取り出すには次のようにする．下図の三角形Ａにおいて辺①に隣接する三角形（三角形Ｂ）を調べ，接続していない辺の頂点番号を求める．

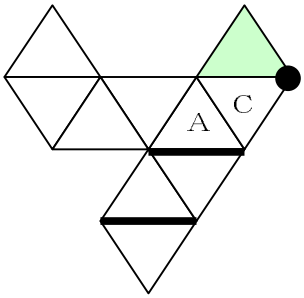
4. 情報の埋め込みで説明したときと同様に，求めた頂点番号を持つ三角形を先ほど求めた三角形から時計周りで３つ取り出す．



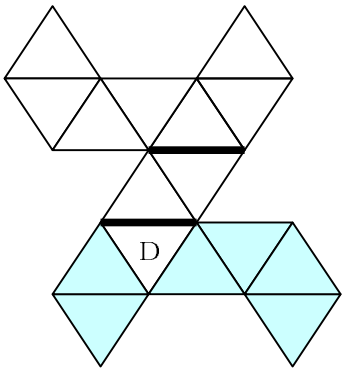
5. 続いて図の三角形Ａにおいて辺②に隣接する三角形（三角形Ｃ）を調べ，接続していない辺の頂点番号を求める．



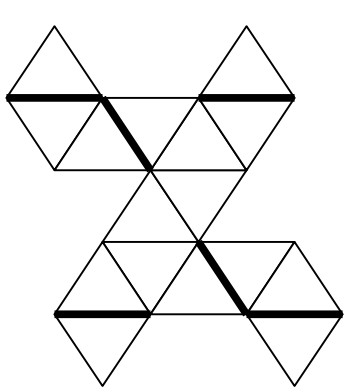
6. 求めた頂点番号を持つ三角形を先ほど求めた三角形から時計周りで１つ取り出す．

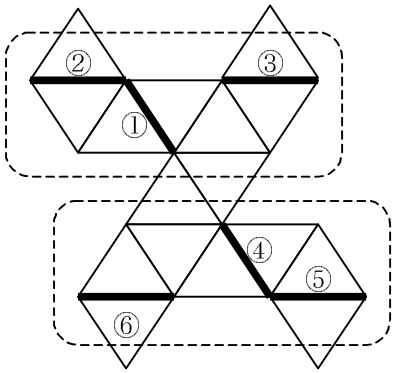


7. 続いてマーカ部分の三角形Ｄにおいて上記に示した三角形Ａのときと同様に三角形列を見つける．



8. 見つけた三角形列において下図の太線で示した三角形組の辺の接続関係を求め，点線で囲んだ接続部分（①②③と④⑤⑥）を１組としてデータを取り出す.





9. ①②③，④⑤⑥を組として取り出したデータの最下位ビット（ＬＳＢ）を調べ，データか順序なのかを判定する.

ＭＳＢ　　ＬＳＢ　　ＭＳＢ　　ＬＳＢ

０００　０００　０００　　０００　０００　００１

①　②　③　　④　⑤　⑥

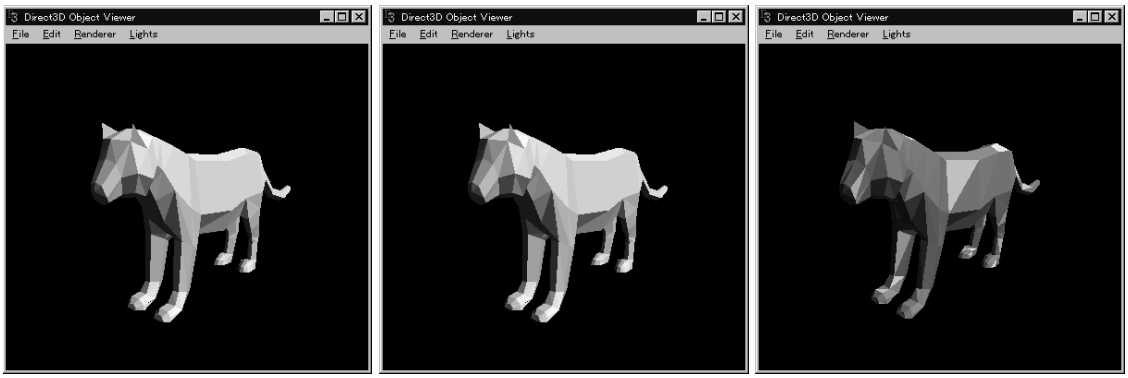
０：順序
１：データ

6. 実行例と評価

本章では，今回提案する三次元形状の位相情報を用いた電子透かし手法に関する評価と考察を行う．まず本手法による電子透かしの実行例を示す．次に三次元形状の電子透かしに関する要件を通して，本手法の有用性を検証する．

6.1. 基本的な埋め込み手法の実行結果

５．４節に示した手法により，透かしを埋め込む前の形状を図２６（ａ）に，埋め込んだ後の形状を図２６（ｂ）に，そしてどの三角形を透かし埋め込みに使用しているかを分かるようにしたものを図２６（ｃ）に示す．また，幾つかの三次元形状に透かしを埋め込んだ結果を表２に示す．



（a）埋め込み前　　（b）埋め込み後　　（c）埋め込み位置の表示
（濃い灰色でレンダリングしている部分）

図 26. 三次元形状（602ポリゴン）に透かしを施した実行結果（1）

表 2. 基本的な埋め込み手法による三次元形状と埋め込めた文字数との関係

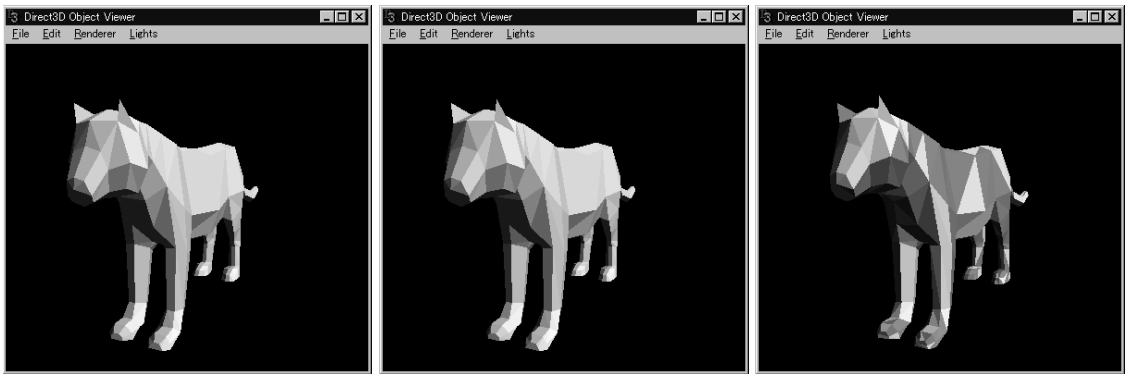
モデル名	頂点数	三角形数	埋め込み可能な文字数
scud.wrl	136	240	40
tiger.wrl	303	602	81
chess1.wrl	389	772	118
gumby.wrl	406	760	115
x_wing.wrl	3099	6084	929

6.2. 頑強さを増した埋め込み方法の実行結果

５．５節に示した手法により，幾つかの形状に透かしを埋め込んだものを表３に示す．また，埋め込む前の形状を図２７（ａ）に，埋め込んだ後の形状を図２７（ｂ），そしてどの三角形を透かし埋め込みに使用しているかを表示したもの図２７（ｃ）に示す．

表 3. 頑強さを増した埋め込み方法による三次元形状と埋め込めた文字数との関係

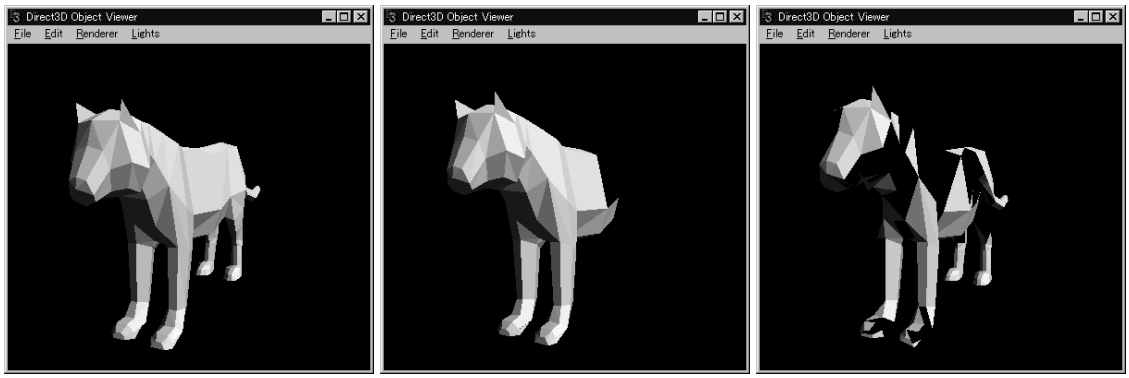
モデル名	頂点数	三角形数	埋め込み可能な文字数
scud.wrl	136	240	8
tiger.wrl	303	602	19
chess1.wrl	389	772	27
gumby.wrl	406	760	26
x_wing.wrl	3099	6084	210



（a）埋め込み前　　（b）埋め込み後　　（c）埋め込み位置の表示
（濃い灰色でレンダリングしている部分）

図 27. 三次元形状（602ポリゴン）に透かしを施した実行結果（2）

また，図２８（ａ）は６０２ポリゴンの形状に，埋め込み可能な文字数で１９バイトのうち１６バイトを使用し，文字列“Akabane_Kazuhiko”を埋め込んだものである．そして形状に対して半分切り取りを施したものを図２８（ｂ）に，２００個のポリゴンを消去したものを図２８（ｃ）に示し，それぞれ図の下部に取り出す事ができた情報を示す．



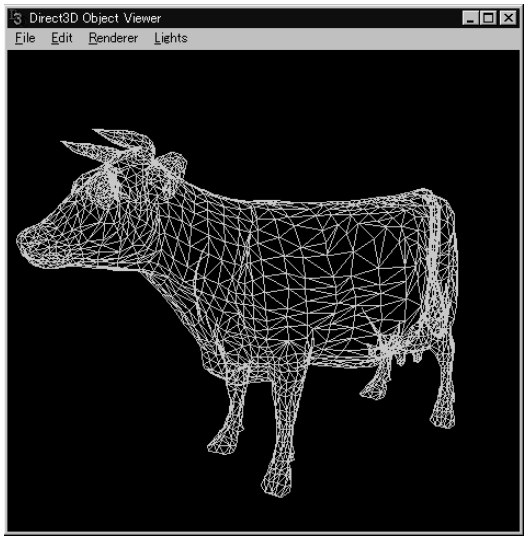
(a)オリジナル	(b)半分切り取り	(c)無作為切り取り
埋め込んだ文字列(16バイト)	取り出せた文字列(8/16バイト)	取り出せた文字列(3/16バイト)
Akabane_Kazuhiko	Akabane_Kazuhiko	Akabane_Kazuhiko

□で囲んだ部分が取り出すことができた情報

図 28. 透かしを埋め込んだ三次元形状の切り取り操作への耐性

6.3. 従来手法との比較

ここでは，本手法と従来手法を三次元形状中のポリゴン数を指標として埋め込み可能な文字数の比較を行う．ここで用いた形状は５８０４三角形より構成されている（図２９）．



従来手法

1. 相似三角形4つ組みへの埋め込み
1062バイト
2. 四面体の体積比への埋め込み
1027バイト

本手法

813バイト

図 29. 埋め込み可能文字数の比較(三角形数5804)

上記の結果より本手法は従来手法に比べ２割ほど埋め込み可能な文字数が少なくなっている．しかし，三次元形状に限らず従来の電子透かし手法が実データに含まれる特徴値を微少に変更して情報を埋め込んでいるためデータの品質劣化が避けられなかったが，本手法ではその品質劣化が全くない．

6.4. 考察

１つの三次元形状に埋め込むことができる透かしの容量は，形状のポリゴン数に比例する．基本的な埋め込み方法の場合６個の三角形で１バイトの情報が表現可能であるので単純計算では１つの三次元形状の三角形数／６バイトが埋め込み可能である．しかし，実際のところ埋め込める量が少なくなっている．この理由は，辺を共有する２つの三角形の組み合わせかたによるもので，形状中のどの三角形とも組み合わすことができない三角形がないように図３０（ａ）を図３０（ｂ）のように三角形の組み合わせかたを工夫することにより改善できる．

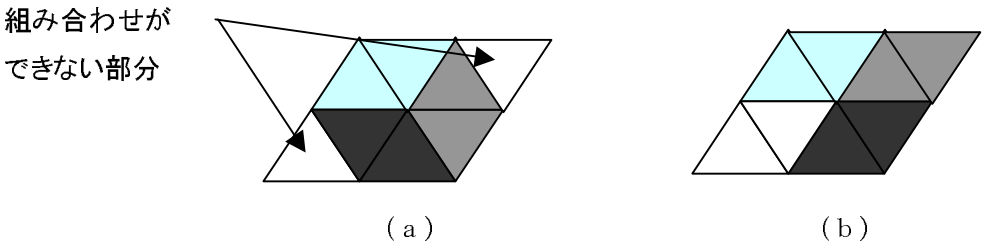


図 30. 組み合わせる三角形の違いによる埋め込み可能な情報量の変化

一方，頑強さを増した埋め込み方法は，基本的な埋め込み方法の１／４ほど埋め込み可能となっている．これはファイルの記述順と切り取り操作に対して耐性を増したためである．これにより透かし情報の埋め込み可能な情報と頑強さにはトレードオフの関係があることが分かる．この手法の場合には２５６文字までの順序が付いた文字列を埋め込み可能という制限がある．しかし，これは情報の埋め込み単位となる三角系列の決め方によるものなので，２５６種類以上の文字列を埋め込む場合には，順序の部分となる埋め込み単位の三角系列を増やすことにより長い文字列を埋め込むことができる．著作権保護として用いる場合には，ポリゴン数が増えればモデルの価値も上がり，短い文字列を繰り返し埋め込むことにより切り取り操作に対して埋め込まれた情報が消去されにくくなる．

透かしはコンテンツ内の何らかの特徴値の変化として記述される．この変化をみつける最も簡単な方法は埋め込み前のオリジナルコンテンツ検出対象として比較することである．しかし，この方式では透かしを埋め込んだ側で将来の検出のために全てのコンテンツをのオリジナルを保持している必要があり，電子透かしシステムの運用上で大きな負担となる．今回提案した手法では，オリジナルの形状なしで透かし情報を取り出すことが可能である．

それから，データフォーマット変換については，今回提案した手法では透かしを埋め込んだ形状を TrueSpace の cob 形式や３D Studio の asc 形式，そして Direct3D の形式に変換した後で，もう一度元のファイル形式に変換しても透かしを検出することができる．また，任意のモデルを含むシーンを作成する場合には，モデルの回転や平行移動はもちろんのこと，一様あるいは非一様なスケーリング，場合によってはずれ変形も加わる場合が

ある．そのような場合は，透かしの埋め込み対象として使用した位相情報は座標変換に対して不変であるため透かし情報が消去されることはない．だが，表示や転送の高速化の為にポリゴン単純化を行ったときやＮＵＲＢＳモデリングを行う際には形状を滑らかにするために頂点座標値が付加されるため，位相情報が変更され埋め込んだ情報が取り出せなくなる．それから全ての三角形を独立に定義したときなどは本手法は適用できない．

7. おわりに

本研究では，多数ある三次元形状の表現方法のなかで，三角形分割されたポリゴンモデルを対象とした電子透かし手法を提案した．

本手法ではポリゴンモデルの幾何形状のうち位相情報に着目し，頂点番号の記述順序に冗長性が存在することを利用して透かしを埋め込んでいることが特徴である．従来電子透かしの手法は，実データ中に直接埋め込む必要があるためデータ劣化は避けられなかった．そのためＣＡＤデータなどで数値制御切削機に正しいデータがいかない可能性やＣＳＧによる形状の表現において集合演算を行ったときに集合演算操作の破綻が起こる可能性がある．今回提案した手法ではそのような心配をすることなく透かし情報を埋め込むことが可能である．

本手法の課題として，透かし情報の頑強さがあげられる．埋め込み対象の特性上，三次元形状の回転，平行移動，拡大縮小といったアフィン変換に対して透かし情報が消去されることはない．しかし，透かし情報の構成方法が位相情報の冗長性に着目していることから，透かし情報を埋め込む際に品質の劣化はないものの，三次元形状データに対して知識を持つものについては，透かし情報を消去されてしまう．また，実用的なレベルで考えたとき，既に透かしが埋め込んである形状に別の透かし情報を上書きして元の透かし情報を消されないようにすることや，同じ形状を複数の人間が購入し比較することにより，埋め込まれた情報を特定し破壊する結託攻撃についても考慮する必要がある．

近年はインターネットをはじめとするネットワーク技術の発達と普及により，単にテキストや画像等をやりとりするだけでなく，ＶＲＭＬなど三次元形状を共有したり交換したりすることができるようになった．三次元形状を用いると言葉や画像では伝わりにくい説明を視覚的に分かりやすく表現できるため，より深いコミュニケーションを行うことができる．今後は電子博物館やオンラインショッピングなどで，現実に存在する三次元形状のコンピュータへの取り込みがより重要になると考えられる．そのためにも本研究をはじめとした電子透かし手法が，不正行為に対してより強力なものへと発展させていく必要性がある．

電子透かしは透かしの消去を試みる者の目的が，複製した形状を販売などして不当に利益を得ることがあるとすれば，透かしの消去に要するコストをその攻撃者が得るであろう利益に対して相対的に大きくすることにより一定の抑止効果が得られると期待できる．

参考文献

［１］ISO/IEC JTC1 SC24/N1596 CD #14772 Virtual Reality Modeling Language (VRML 2.0) .

［２］岡一博，中村康弘，松井甲子雄，“濃度パターン法を用いたハードコピー画像への署名の埋め込み，”電子情報通信学会論文誌，vol.J79-D-Ⅱ，no.9，pp.1624-1626，1996.

［３］岡一博，松井甲子雄，“組織的ディザ法によるハードコピー画像への署名情報の埋め込み，”電子情報通信学会論文誌，vol.J80-D-Ⅱ，no.3，pp.820-823，1997.

［４］小出晋也，萩原剛志，金田悠紀夫，“誤差拡散法および平均濃度近似法を用いた画像深層暗号方式の提案”，テレビジョン学会技術報告，vol.20，no.5，pp.7-14，MIP96-11，1996.

［５］田中清，中村康弘，松井甲子雄，“ＭＨファクシミリ通信における情報の多重化，”画像電子学会誌，vol.18，no.1，pp.2-8，1989.

［６］小松尚久，富永英義，“文書画像通信におけるデジタル透かしの提案と署名への応用，” 電子情報通信学会論文誌，vol.J72-B-I，no.3，pp.208-218，1989.

［７］岡一博，松井甲子雄，“埋め込み関数を用いた濃淡画像への署名法，”電子情報通信学会論文誌，vol.J80-D-Ⅱ，no.5，pp.1186-1191，1997.

［８］新見道治，野田秀樹，河口英二，“複雑さによる領域分割を利用した画像深層暗号化法，” 電子情報通信学会技術研究報告，vol.97，no.70，IE97-17，pp.39-44，1997.

［９］向川公宏，田辺英彦，坂口文則，梅田博之，“データハイデングによる濃淡画像へのディジタル署名，” 電子情報通信学会技術研究報告，vol.97，no.254，IT97-42，pp.7-12，1997.

［１０］W.Bender，D.Gruhl，森本典繁，A.Lu，“電子透かしを支えるデータ・ハイデング技術（上)，”日経エレクトロニクス，no.683（２月２４日号)，pp.149-162，1997.

［１１］沼尾雅之，清水周一，森本典繁，“データハイデングによるデジタル署名，”情報処理学会第５３回全国大会，1M-13，1996.

［１２］片岡利幸，田中清，中村康弘，松井甲子雄，“階層型予測符号化における多値画像への属性情報の埋め込み,”電子情報通信学会論文誌，vol.J73-B-I，no.3，pp.229-235，1990.

［１３］中村康弘，松井甲子雄，“離散的直行変換を用いた濃度画像とテキストデータの合成符号化法,”電子情報通信学会論文誌，vol.J72-D-Ⅱ，no.3，pp.363-368，1989.

［１４］I.J.Cox，J.Kilian，T.Leighton，T.Shamoon，“Secure spread spectrum watermarking for multimedia,”NEC Technical Report95-10，NEC Research Institute，1995.

［１５］大西淳児，松井甲子雄，“多重解像度解析とＰＮ系列を利用した電子透かし法,”電子情報通信学会論文誌，vol.J80-D-Ⅱ，no.11，pp.3020-3028，1997.

［16］中村高雄，小川宏，高嶋洋一，“ディジタル画像の著作権保護のための周波数領域における電子透かし方式,”暗号と情報セキュリティシンポジウム，SCIS‘97-26A，1997.

［１７］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，vol.33，no.3，pp.534-539，1997.

［１８］片岡利幸，田中清，中村康弘，松井甲子雄，“適応型離散コサイン変換符号化におけるカラー画像への記述情報の埋め込み,”電子情報通信学会論文誌，vol.J72-D-I，no.12，pp.1210-1216，1989.

［１９］関沢秀和，川上晴子，山本直史，“カラー画像の深層情報記録,”画像電子学会年次大会予稿集，session 7，20，pp.47-48，1995.

［２０］垣芳博，田中清，杉村立雄，近藤昭治，“視覚特性を考慮した色彩透かしの一手法,”１９９７年映像メディア処理シンポジウム，I-3.14，pp.45-46，1997.

［２１］中沢英徳，小館亮之，シェフモリソン，富永秀義，“ＭＰＥＧ２における電子透かしの利用による著作権保護の一検討,”暗号と情報セキュリティシンポジウム，SCIS ‘97-31D，1997.

［２２］田中清，中村康弘，松井甲子雄，“MHファクシミリ通信における情報の多重化,”画像電子学会誌，vol.18，no.1，pp.2-8，1989.

［２３］田中清，中村康弘，松井甲子雄，“情報の２重化伝送可能なＭＲファクシミリ符号化方式,”電子情報通信学会論文誌，vol.J72-B-I，no.4，pp.368-376，1989.

［２４］松井甲子雄，中村康弘，ナタウット・サムパイブーン，“音声通信への文字情報の埋め込み,”第１８回情報理論とその応用シンポジウム，SITA'95，C-4-3，pp.389-392，1995.

［２５］岩切宗利，松井甲子雄，“適応ＰＣＭ量子化による音声符号へのテキスト情報の埋め込み,”電子情報通信学会技術報告，vol.97，no.208，IT97-34，pp.61-66，1997.

［２６］W.Bender，D.Gruhl，森本典繁，A.Lu，“電子透かしを支えるデータ・ハイデング技術（下),”日経エレクトロニクス，no.684（３月１０日号)，pp.153-168，1997.

［２７］岩切宗利，松井甲子雄，“音楽ソフトへの電子透かしの一方式,”１９９８年暗号と情報セキュリティシンポジウム，SCIS '98-8.2.C，1998.

［２８］L.Boney，A.H.TewFik，K.N.Hamdy，“Digital watermarks for audio signals,” IEEE Proceedings of the International Conference on Multimedia Computing and Systems，Session 17，pp.473-480，1996.

［２９］岩切宗利，松井甲子雄，“音声符号への電子透かしに関する一検討,”電子情報通信学会１９９７年基礎境界ソサイエティ大会，SA-7-5，pp.250-251，1997.

［３０］岩切宗利，松井甲子雄，“適応差分ＰＣＭ符号化における音声符号へのテキスト情報の埋め込み,”情報処理学会論文誌，vol.38，no.10，pp.2053-2061，1997.

［３１］岩切宗利，松井甲子雄，“ＩＴＵ Ｇ．７２９による音声符号への電子透かし,”情報処理学会第５５回全国大会，vol.4，pp.428-429，1997.

［32］岩切宗利，松井甲子雄，“適応ＰＣＭ量子化による音声符号へのテキスト情報の埋め込み,”電子情報通信学会技術報告，vol.97，no.208，IT97-34，pp.61-66，1997.

［３３］中村康弘，松井甲子雄，“著作権保護のための和文書へのシール画像の埋込み,”情報処理学会論文誌，vol.38，no.11，pp.2356-2361，1997.

［３４］J.T.Brassil, S.Low, N.F.Maxemchuk, L.Ogorman, “Electronic marking and identification techniques to discourage document copying,” Proceedings of IEEE INFOCOM ’94, vol.3, pp.1278-1287, 1994.

［３５］中村康弘，松井甲子雄，“著作権保護のための電子文書のハードコピーへの署名の埋込み,”情報処理学会論文誌，vol.36，no.8，pp.2057-2062，1995.

［３６］広瀬直人，岡本栄司，満保雅浩，“ソフトウェア保護に関する一提案,”SCIS ‘98-9.2.C，1998.

［３７］北川隆，楫勇一，嵩忠雄，“ＪＡＶＡで記述されたプログラムに対する電子透かし法,” SCIS ‘98-9.2.D，1998.

［３８］門田暁人，飯田元，松本健一，鳥居宏次，一杉裕志，“プログラムに電子透かしを挿入する一手法,” SCIS ‘98-9.2.A，1998.

［３９］大渕竜太郎，増田宏，青野雅樹，“３次元データへの情報の埋め込み,” Visual Computing グラフィックスとＣＡＤ合同シンポジウム ’９７予稿集，pp.53-60，1997.

［４０］松井甲子雄，“電子透かしの基礎,”森北出版，1998.

［４１］松井甲子雄，“電子透かし技術とその評価基準について,”情報処理学会研究報告，98-EIP-2，pp.97-104，1998.

［４２］松井甲子雄，“画像音声への電子透かしの現状とその動向,”電子情報通信学会技術研究報告，CQ-97-76，pp.43-48，1998.

［４３］千葉則茂，土井章男，“３次元ＣＧの基礎と応用,”サイエンス社，1997.

謝辞

本研究を行うにあたり、日頃から適切な指導と多くの助言をして頂いた指導教官である豊橋技術科学大学知識情報工学系市川周一先生に感謝致します。最後に、市川研究室の学友諸氏など、常日頃から励まし、支えてくれた皆様に深く感謝し、ここに厚く御礼申し上げます。