

3次元形状データ圧縮手法の最近の動向

品川 嘉久 東京大学大学院理学系研究科情報科学専攻

3次元形状圧縮手法が登場する背景

インターネットの発展が、画像処理研究の方向性に大きな影響を与えるようになって久しいが、コンピュータ・グラフィクス (CG) 研究に対しては、あまり影響してこなかった。しかし、この3年間で、その状況は急激に変化してきている。それは、ネット上でCGのデータを見る需要が出てきたためである。電子商取引 (Electronic Commerce, EC) において、ネットワークで商品や広告の3次元形状データや動画像を伝送したり、遠隔医療でデータを送る場合などである。これまで、いかに精緻なCGを作るかに専念していたのが、データ量を減らすという方向性が加わり、CG研究にも変化が起きている。

3次元形状表現方法

3次元形状の最も基本的な表現方法は、多面体で近似して、その頂点・辺・面を記述する境界表現である。もう1つの基本的な表現方法は、物体をプリミティブと呼ばれる基本的な形状 (直方体, 球, 円筒等) の組合せで表す CSG である。現在、主流の表現方法は、この2つの混成となっている。それだけでは滑らかな

物体を表現できないため、多角形の面の代わりに、自由曲面のパッチを用いる。

これらの3次元形状を、異なるプラットフォームで交換するため、3次元CADでは、STEP, IGES¹⁾などの標準的データフォーマットが提案され、またDXFなど普及しているプラットフォームのデータ形式が多用されてきた。これらは、自由曲面を含む精緻なデータ交換を行えた。

しかし、ネットワークで3次元形状データをブラウズすることが頻繁になると、データは、単に交換するだけでなく、ブラウズする必要が出てきた。そのため、ブラウザに合わせてVRMLフォーマットに変換してやりとりされることが多くなった。VRMLには、多面体 (ポリゴンメッシュ) と、簡単なプリミティブはあるが、自由曲面はない。また、商品など実在する物体形状をネットワークにのせる場合、その物体を計測して得られた座標データを伝送することが多い。

そこで、物体形状を圧縮する研究は、ポリゴンメッシュ、特に3角形メッシュで表現し圧縮するものがほとんどである。また、測定器で得られた3次元形状の場合、そのままポリゴンメッシュにすると、ノイズのためにでこぼこに見える。そこで、ノイズを減らすことが必要になる。

大別すると、ポリゴンメッシュに対して、

1. ポリゴン数を変えず圧縮するもの

2. ポリゴンそのものの数を減らし多重解像度をつくり圧縮したり、ノイズを軽減するもの
 3. ポリゴンを自由曲面に変換し、ノイズを軽減するもの
 4. ポリゴン情報と法線などの情報に分離し、ポリゴン情報は大幅に圧縮するもの
- の4種類になる。

ポリゴン数を変えず圧縮する研究

このタイプとしては、たとえば文献5), 19) があり、

1. 幾何情報の圧縮
 2. 位相情報の圧縮
- という2段階の処理が行われる。

◆幾何情報の圧縮

文献5) では、3角形頂点の座標値のビット数を減らすことによって幾何情報を圧縮している。通常、32ビット浮動小数点数で表されているデータを、最長16ビットのデータに直す。そして、物体を表す3角形をリストにし、前の頂点と次の頂点の座標の差を、Huffman符号化している。3角形の色や、法線の情報も同様に圧縮する。

文献19) も、この方法を踏襲している。ただし、頂点座標を、周りの頂点から予測し、その予測値と実際の値をHuffman符号化するので、さ

らなる圧縮率を達成している。

◆位相情報の圧縮

3角形メッシュにおける位相情報とは、頂点の接続の様子のことを指す。つまり、どの頂点の間に辺が存在するか、を指す。1つの頂点には、いくつかの辺が接続しているので、普通に辺を記述すると、同じ頂点が何度も記述中に登場することになる。

文献5)では、3角形リストを、メッシュ・バッファという長さ16のキューを使って、一般化3角形メッシュと呼ばれる線形リストに直して、頂点の重複を避けている。これと幾何情報圧縮によって、文献5)では、数倍以上の圧縮を行っている。しかし、一般化3角形メッシュへの変換の仕方によっては、効率が低下する。

文献19)では、3角形リストを、いくつかの線形リストをつないだ木構造で表す。枝の1つ1つは、図-1のように、3角形が带状に並んだものになる。3角形は、その帯の両側の頂点のうち、どちら側が使われるか(marching pattern)を、記述するだけで済む。図-1では、010010と表現される。おかげで、位相情報は、3角形1個あたり2ビット程度で済む。これと幾何情報圧縮によって、文献19)では、最大で数十倍の圧縮を達成している。ただし、圧縮率は、元のメッシュの滑らかさに影響されるので、目安程度と考えたほうがよい。

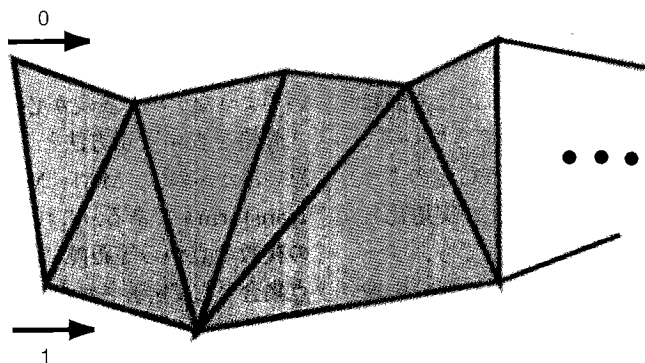


図-1 3角形リストの線形リストの marching pattern の例

多重解像度を用いる研究

VRML2.0には、LOD (Level Of Detail) の記述ができ、適応的に表示の細かさを変える。これは、視点からの距離に応じて、どういうポリゴンを描画するかを記述しておく仕組みである。遠い所にある物体は、粗くしか描画しないので、描画時間を節約できる。このように、ポリゴンの数(解像度)を変えることを多重解像度と呼ぶ。画素の数を変える多重解像度は、画像処理では古くから用いられてきたが、それと同じ概念である。

◆ウェーブレットによる多重解像度解析

画像処理ではウェーブレットによる多重解像度が、よく用いられる。ある解像度のデータに、スケール関数を作用させるとその大まかな近似となるデータが得られ、ウェーブレット関数を作用させると、近似と元のデータとの差が出るような線形フィルタである。逆に、スケール関数の適用結果と、ウェーブレット関数の適用結果を合わせれば、元の解像度のデータが復元できるので、後に述べるプログレッシブ伝送に適している。

たとえば、離散ウェーブレット変換の場合、信号が数列 x_0, x_1, \dots, x_n で表されるとき、その移動平均(畳

み込み)をとると、1つ粗い解像度の信号 $y_0, y_1, \dots, y_{n/2}$ が得られる。数列の長さは半分になる。移動平均の重みに、スケール関数 ϕ の係数を使ったものと、重みに、ウェーブレット関数 ψ の係数を使ったものの2つの数列を作る。この2つの数列を、ある係数で加重平均すると、元の数列に戻る。この関係はツースケール関係と呼ばれている。このような関数のペアは、完全再構成要件という条件を満たしていなければならず、導出することは、容易ではない。Daubechiesの導いたウェーブレットは、有限な台を持つので、上記の移動平均に用いる係数は、有限個で済む。Mallatの用いたBattle-Lemariéウェーブレットは、有限の台を持たないが、十分速く減衰するので、実用上は有限個の係数で計算できる。

画像など、2次元の信号をウェーブレット解析するには、スケール関数 ϕ やウェーブレット関数 ψ の、テンソル積を基底として用いる。

つまり、基底関数としては、 $\phi(x)\phi(y)$ $\phi(x)\psi(y)$ $\psi(x)\phi(y)$ $\psi(x)\psi(y)$ の4種類ある。これを、信号 $f(x_i, y_j)$ ($i, j = \dots, 0, 1, \dots$) の解析に用いる。

ウェーブレットについては、近年、たくさんの解説書が出版されるようになった。個々の論文を引用する紙面はないが、中でも理論の発達の歴史を解き明かした文献13)が興味深い。

◆ポリゴンへの多重解像度解析の適用

しかし、ウェーブレットによる多重解像度解析は、そのままではポリゴンメッシュに適用できない。2次元の離散ウェーブレット変換では、前述のように、各点を2つのパラメタ(たとえば x, y)によって指定しなければならない。さらに、その xy -パラメタ空間で、正方格子のように点が分布している必要がある。画像ではこれは、自然に満たされていて簡単である。しかし、ポリゴンメッシュ

については、難しい問題である。文献17)では、地形のように、各点を2つのパラメタによって指定できる場合について、いろいろな解像度で形状の満たすべき制約条件を指定し、ウェーブレットによってその形状を生成する方法を提案した。文献14)では、中点分割によって、粗いポリゴンメッシュから、 C^1 連続な曲面を作り出した。文献12)は、中点分割による分割ステップで3角形メッシュを細分化していき、各点の重心座標を、平均化ステップで座標値の加重平均をとることによって、ポリゴンメッシュのウェーブレットによる多重解像度を実現した。しかし、メッシュが細分割接続性という条件を満たす必要があった。

より一般的なメッシュに対して多重解像度解析を行うため、文献6)では、上記の条件を満たすメッシュに変換 (remesh) して多重解像度を可能にした。リメッシュは、分割・パラメタ付け・リサンプルをいう3段階で処理される。パラメタ付けのためには、調和関数の考えを用いる。文献11)では、粗い3角形メッシュを作り、元のメッシュの3角形にパラメタを入れる際に利用した。

また、文献2)では、メッシュの位置だけでなく、色もウェーブレットで多重解像度解析した。後述のプロGRESSIVE伝送も可能である。

文献10)では、エネルギー関数を用いたfairingによって多重解像度を実現した。

ノイズ軽減の研究

自由曲面のデータ量は、ポリゴンに比べて大きくなるので、圧縮よりは、滑らかな曲面を作ることに主眼が置かれる。実在の物体を測定したデータの場合、ノイズが入るので、幾何情報を間引いて、滑らかに補間することによって、ノイズを減らすことができる。また、ポリゴンのま

まの状態に比べて、自由曲面にするや变形などの操作が、ずっと容易になる。

文献9)は、測定された密な点のデータに、エネルギー最小でフィットするような小数のポリゴンを生成する方法を提案した。文献8)は、逆に、粗い3角形メッシュを細かく分割して、滑らかなメッシュを生成した。

文献4)は、元の形状から、 ϵ 内側にあるような包絡面と、外側にあるような包絡面を考え、近似メッシュをなす3角形が、その中にあるようにテストすることによって、誤差を保証した。包絡面は、簡単にいうと、3角形の面を、法線方向に ϵ 動かして作られる。近似メッシュの構築方法としては、3角形を除去し、その穴を別の3角形生成で埋める操作の繰り返しのアルゴリズムを提案した。

ポリゴン情報とマッピング情報に分離する研究

ポリゴン数を減らすと、その物体の壁などの細かい起伏は失われてしまう。そのため、見た目が大きく違ってしまふことがある。文献2)では、メッシュと、色を分離して扱った。文献3)ではそれに加えて、法線情報をマッピングとして分離して扱った。

プログレッシブ伝送

インターネットの発達により、さまざまなデータを伝送する際に、その重要な部分だけを抜き出して先に送る機能が重要になってきている。画像処理の分野では、JPEG等のようにプログレッシブ符合化が実用化している。ウェーブレットでも、ツースケール関係を利用して、粗い画像に細部を追加していきける。画像以外の一般的なデータでも同様の手法が適用できる。

Hoppe⁷⁾は、メッシュから辺をつぶす操作によって、多重解像度を作り、その逆操作として、プログレッシブ・メッシュを実現した。文献18)では、粗い解像度の3角形をforest splitという操作により、たとえば7個の3角形に細分化することで、多重解像度をつくり、プログレッシブ伝送を実現した。その際、メッシュの3角形に、順序を入れ、その順序に従って、文献19)同様、メッシュを線型リストに分解した。

今後の研究方向への提言：位相の重要性

前節で述べた形状圧縮は、物体の形状を、3角形の集合に還元していた。画像でいえば、画素に還元することに比べられよう。しかし、画像の世界では、文献20)の特集のMPEG4のように、単なる画素の並びの圧縮ではなく、その画像に含まれている物体に基づいた圧縮による、さらなる高圧縮率へと研究が進んでいる。

また、粗い解像度のポリゴンメッシュをブラウズして、より詳細なメッシュをダウンロードすべきかどうか決める、という使い方は、人間がブラウズすることが前提となる。しかし、電子商取引に本格的に応用するためには、ネットワークに蓄えられた形状データを、「自動認識」してサーチしたり自動分類することが必要となる。つまり、単なる3角形集合の圧縮では限界がくると考えられる。その実現には、データの「骨格」を記述し、その他の部分を肉づけていくようなデータ表現が必要である。

骨格を表す表現方法として、まず思い浮かぶのは、MAT (Medial Axis Transform) である。これは、曲面上の複数の点から等距離にあるような点集合として定義される。しかし、わずかに異なる形状に対するMATは、劇的に異なることが多く、形状認識には適していない。多重解像度によ

るぼかしを行うと、まったく異なるMATになったりするからである。また、与えられたMATから、元の曲面を復元することも困難である。

我々は、形状データからレーブグラフというグラフを自動抽出し、これを骨格として他のデータをその肉づけとして記述する方法を研究している。正確には、レーブグラフは特異点のグラフ構造である。我々は、物体の形状を直接記述するのではなく、物体の上に関数を定義し、関数の構造をその特異点という点によって表す。大雑把にいうと、特異点とは、その関数の値の変化が少ない点、地形でいえば頂上、谷底点、峠などである。特異点は、物体の形を特徴づけるのに非常に重要な役割を果たす。正確には、特異点は数学のモース理論によって、その物体の形状の特徴（位相構造）と関係している。つまり、物体の骨組みは、特異点の情報から分かる。さらに、幾何情報は、その関数の等値線を滑らかに変形していけば、復元できる¹⁵⁾。これはホモトピー変形と呼ばれる。我々は、この形状記述法を「ホモトピー・モデル」と呼んでいる。

この性質を応用して、我々は、地形の構造の可視化や、人間の表情認識などを行っている。つまり、形状の特徴を表現したり、2つの形状がどれくらい近いかを計算したり、形状データベースをサーチしたりできる。また、特異点とレーブグラフおよびホモトピーから、形状を復元することもできる。これを用いて、CTなどの連続断層画像からの立体再構成が可能となる。形状設計、つまり3次元CADとしても応用できる。また、連続変形の記述は、少ない情報量で済むため、形状の圧縮にも用いることができる。

◆3次元物体形状情報の特異点による表現

もう少し詳しく述べてみよう。まず、3次元物体の表面を、ポリゴンメ

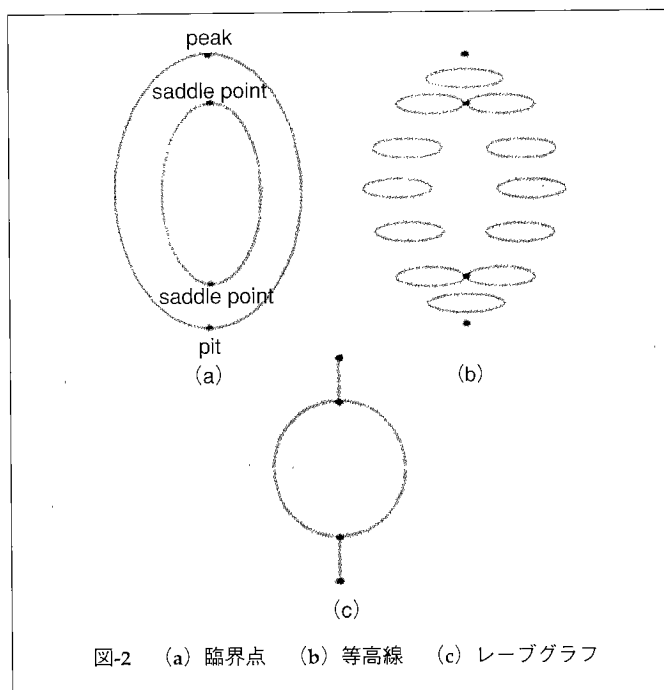


図-2 (a) 臨界点 (b) 等高線 (c) レーブグラフ

ッシュの研究と同様、2次元多様体と考える。本研究では、さらに C^2 級の微分可能性を考える^{*1}。簡単な例として、この局所座標系の上で、高さ関数を定義する。高さ関数は、与えられた点の、高さ（物体が埋め込まれている3次元空間の中でのたとえばz座標）を返す関数である。高さ関数 $h: R^2 \rightarrow R$ のヤコビ行列が0ベクトルとなる点が特異点である。hの特異点とは、頂上点・鞍点・谷底点である。次に、高さ関数 $h: R^2 \rightarrow R$ のヘッセ行列が正則であるような特異点を、非退化であるという。特異点におけるヘッセ行列の負の固有値の数を、その特異点の指数と呼ぶ。頂上を表す特異点は指数2、鞍点は1、谷底は0となる。

◆レーブグラフ

次に、特異点のお互いの関係を、レーブグラフと呼ばれるグラフで表現する(図-2)。レーブグラフは、物体表面を等高線で表し、各等高線の連結成分を1つの点として表して得られるグラフである。たとえば、図-2(a)に示すようなドーナツ型の曲面(トーラス)の等高線は図-2(b)のようになり、そのレーブグラフは図-1

(c)のようになる。この図からも分かるように、レーブグラフは、その物体の「骨組み」を表す。

このレーブグラフで特に重要なのは、曲面の頂上、鞍点、谷底を表すノードであり、これらの点は高さ関数の特異点そのものである。

◆レーブグラフとモース理論に基づく物体の記述

モース理論を用いると、大雑把に言えば、物体の形はその臨界点の指数と同じ次元を持つ胞体というもの張り合わせて、ホモトピー変形して復元できる。物体形状の符合化はこの胞体およびその張り合わせの順序・位置を記述するオペレータの記号列によって行う。具体的には、2次元胞体を張り合わせる put_e2 、1次元胞体を張り合わせる put_e1_divide と put_e1_merge 、0次元胞体を張り合わせる put_e0 の4種類のオペレータがある。詳しい説明は、文献15)に譲る。

胞体を張り合わせる順序は、レーブグラフによって示されている。この符合化法により、物体の位相を符

*1 C^2 級でないものでも、無限に小さい誤差で C^2 級で近似できる。

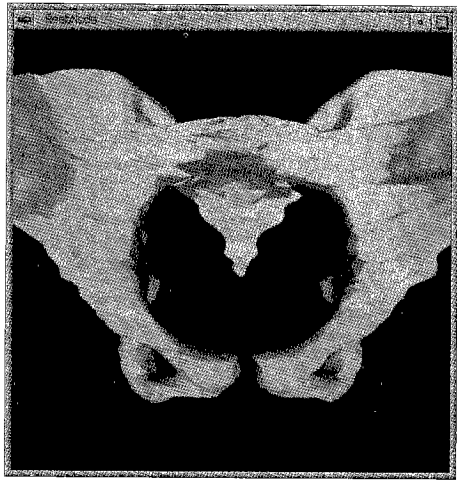


図-3 ホモトピーモデラで復元した形状の例

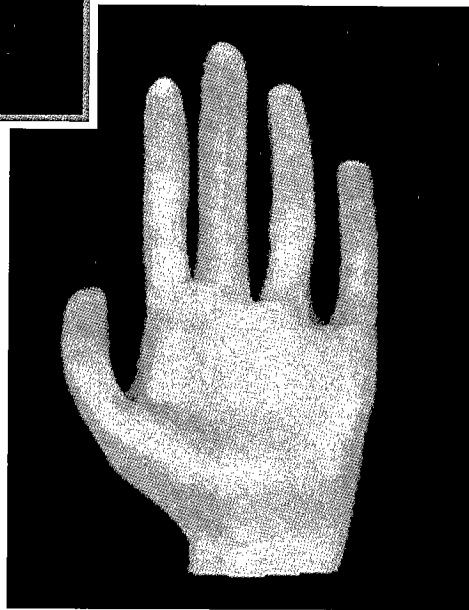


図-4 ホモトピーモデラで設計した形状の例

合として操作することが可能になる。

◆ホモトピー変形

任意の断面における等高線間の包含関係は、木構造で表される。物体の上から下へと断面を移動していったとき、この木構造は、特異点を含む断面のみで変化し、その他の断面では変化しない。つまり、等高線をホモトピーによって変形する軌跡として物体表面を構築することができる。この方法は、CT画像や標本切片などから物体を再構築することにも応用でき、従来の3角形近似やスプライン近似による歪んだ物体表面が構成されるのを避けることが可能になった。一例として、図-3のような形状を復元できる。

◆ホモトピーモデラ

我々は、ホモトピー変形に基づいて、物体形状を作る3次元CADシステムであるホモトピーモデラを構築した。本システムでは、1. レープグラフと輪郭線の指定、2. ホモトピー変形の指定、というステップで形状を生成する。レープグラフは、3次元の線画を描くようなドローイングツールと同様のインタフェースを持つ。ホモトピー変形は、システムが自動的に生成する。これをエディットすることもできる。図-4はホモトピーモデラで構築した物体の例である。そのデータ量は、2.8キロバイト足らずである。これをポリゴンで記述すると、ある程度見た目が似た滑らかな物で、600キロバイトに達する。逆に、VRMLなどのポリゴンデータを、ホモトピー表現に変換し、予測の Huffman 符合化などを用いて、デー

タを大幅に圧縮できる。

◆多重解像度解析による特異点の階層化と画像のマッチングへの応用

形状に細かな起伏が含まれているとき、そのおおまかな特徴を取り出すことが必要になる。

関数は、3次元物体だけでなく、画像の上にも定義できる。つまり、画素の位置を与えると、その輝度を返す関数である。その特異点を調べれば、3次元形状同様、画像をマッチすることができるはずである。我々は、この方法によって、2つの画像の対応点を自動的に求め、ステレオによる立体復元、自動モーフィング、精緻なボリュームレンダリグへ応用できることを示した¹⁶⁾。このために、特異点に階層をつける。上の階層では、大きな山や谷を特徴づける特異点を、下の階層ほど細かな起伏を表す特異点を持つ。

多重解像度特異点を階層化するため、画像の自動マッチングでは、非線形特異点フィルタを開発した¹⁶⁾。このフィルタは、1次元の頂上点を保存するフィルタ α 、谷底点を保存するフィルタ β の2次元テンソル積として、

$$p^{(m,0)} = \alpha(x) \alpha(y) p^{(m+1,0)}$$

$$p^{(m,1)} = \alpha(x) \beta(y) p^{(m+1,1)}$$

$$p^{(m,2)} = \beta(x) \alpha(y) p^{(m+1,2)}$$

$$p^{(m,3)} = \beta(x) \beta(y) p^{(m+1,3)}$$

の4種類ある。ここで、 $p^{(m,i)}$ は、解像度レベル m のフィルタ i の出力である。これらのフィルタは、画像の大きさを1/4に縮小する性質を持つ。次に、その各階層の間の

$$C = \lambda |V|^2 + \eta |D_0|^2 + |D_1|$$

の値を計算し、これを最小化するマッチングを求めている。ここで、 V は輝度値の差、 D_0 は階層間の画素の距離、 D_1 は画像の変形度である。 λ 、 η の値も最適なもの理論的に自動的に定まる。

ウェーブレットなどの線形フィルタによる多重解像度では、特異点の

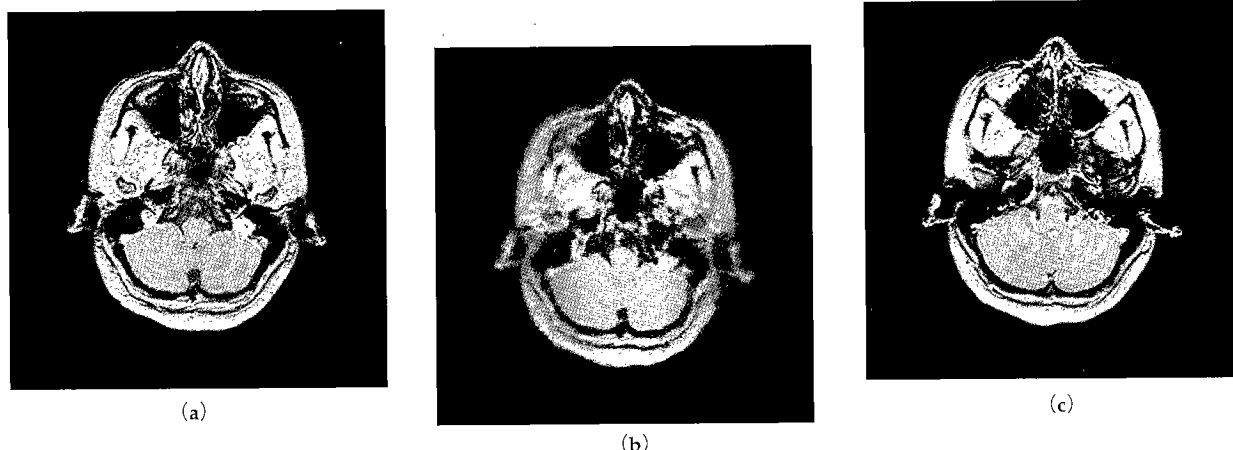


図-5 特異点フィルタにより、(a) と (c) をマッチし、補間して (b) を作る例¹⁶⁾

構造が破壊されるため、マッチングができなかったが、非線形特異点フィルタではこの構造を保存できるので、完全な自動マッチングが可能となった。たとえば、図-5 (a) と (c) の画像をマッチし、補間して (b) のような画像を作ることができる。

多重解像度の方法は、人間の歯の形状にも応用できる。我々はこれを用いて、歯の形状をデータベースに蓄え、そこから、目的の歯のデータを取り出す形状インデックスとして、多重解像度によって階層化された特異点を用いる方法を開発した。また、歯のように複雑な曲面を持ったものの、擦り合わさる状態の表現にも、一般に、2物体の補空間の位相構造の時間的変化をレーブグラフの変化で表す方法を提案した。その符合を用いれば、歯の咬合の状態を数値的に評価・解析することができ、また、歯の形状を削ったり埋めたりして変形するときの、状態変化を計算できるようになる。そして、これを歯の咬合状態の評価・解析に応用した。

本節では、ホモトピーモデルについて駆け足で述べたが、詳しい記述や参考文献名は、ホームページ <http://www-sinagawa.is.s.u-tokyo.ac.jp/~sinagawa/> を参考にしていたければ幸いである。

まとめ

3次元形状圧縮の研究は、画像圧縮に比べれば非常に歴史が浅いが、ここ数年で急速に発達してきている。本稿では、その主な動向を報告した。その今後の方向性を考えるとき、画像圧縮や認識の方向性との類似性があり、やはり認識の問題は遠からず避けて通れない問題となろう。本稿では、この問題へのアプローチとして、位相情報の重要性についても述べた。3次元形状圧縮を網羅することはできなかったが、この分野の発展の助けとなれば幸いである。

参考文献

- 1) Brown, C.W. and Shepherd, B. J.: Graphics File Formats, Manning Publications Co. Greenwich (1995).
- 2) Certain, A., Popovic, J., DeRose, T., Duchamp, T., Salesin, D. and Stuetzle, W.: Interactive Multiresolution Surface Viewing, Proc. ACM SIGGRAPH'96, pp.91-97 (July 1996).
- 3) Cohen, J., Olano, M. and Manocha, D.: Appearance-Preserving Simplification, Proc. ACM SIGGRAPH'98, pp.115-120 (July 1998).
- 4) Cohen, J., Varshney, A., Turk, G., Weber, H., Agarwal, P., Brooks, F. and Wright, W.: Simplification Envelope, Proc. ACM SIGGRAPH'96, pp.119-128 (July 1996).
- 5) Deering, M.: Geometric Compression, Proc. ACM SIGGRAPH'95, pp.13-20 (July 1995).
- 6) Eck, M., DeRose, T., Duchamp, T., Hoppe, H., Lounsbery, M. and Stuetzle, W.: Multiresolution Analysis of Arbitrary Meshes, Proc. ACM SIGGRAPH'95, pp. 173-182 (July 1995).
- 7) Hoppe, H.: Progressive Meshes, Proc. ACM SIGGRAPH'96, pp.99-108 (July 1996).

- 8) Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., Halstead, M., Jin, H., McDonald, J., Schweitzer, J. and Stuetzle, W.: Piecewise Smooth Surface Reconstruction, Proc. ACM SIGGRAPH'94, pp.295-302 (July 1994).
- 9) Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., McDonald, J. and Stuetzle, W.: Mesh Optimization, Proc. ACM SIGGRAPH'93, pp.19-26 (July 1993).
- 10) Kobbelt, L., Campagna, S., Vorsatz, J. and Seidel, H. P.: Interactive Multi-Resolution Modeling on Arbitrary Meshes, Proc. ACM SIGGRAPH'98, pp.105-114 (July 1998).
- 11) Lee, A. W. F., Sweldens, W., Schröder, P., Cowsar, L. and Dobkin, D.: Multiresolution Adaptive Parametrization of Surfaces, Proc. ACM SIGGRAPH'98, pp.95-104 (July 1998).
- 12) Lounsbery, M., DeRose, T. D. and Warren, J.: Multiresolution Analysis for Surfaces of Arbitrary Topological Type, ACM Transactions on Graphics, 16 (1) pp.34-73 (1997).
- 13) Meyer, Y.: Wavelets: Algorithms and Applications, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia (1993).
- 14) Peters, J. and Reif, U.: Geometry Compression through Topological Surgery, ACM Transactions on Graphics, 16 (4) , pp.420-431 (1997).
- 15) Shinagawa, Y., Kergosien, Y. L. and Kunii, T. L.: Surface Coding based on Morse Theory, IEEE Computer Graphics and Applications, 11 (5) , pp.66-78 (Sep. 1991).
- 16) Shinagawa, Y. and Kunii, T. L.: Unconstrained Automatic Image Matching using Multiresolutional Critical-Point Filters, IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 20 (9) , pp.994-1010 (Sep. 1998).
- 17) Takahashi, S., Shinagawa, Y. and Kunii, T. L.: Continuous-Resolution-Level Constraints in Variational Design of Multiresolution Shapes, The Visual Computer, 14 (4) pp.177-192 (1998).
- 18) Taubin, G., Guéziec, A. and Lazarus, F.: Progressive Forest Split Compression, Proc. ACM SIGGRAPH'98, pp.123-132 (July 1998).
- 19) Taubin, G. and Rossignac, J.: Geometry Compression through Topological Surgery, ACM Transactions on Graphics, 17 (2) , pp.84-115 (1998).
- 20) 安田 浩他: マルチメディア符号化技術の動向, 情報処理, Vol.40, No.2 (Feb. 1999). (平成11年1月12日受付)