
輪郭ボリューム手法を用いた同位相面生成法

Isosurface Generation using Contour Volumetric Method

松岡 司*

Tsukasa MATSUOKA

要 旨

薄い形状の再現性、とりわけ低解像度モデルにおける再現性に優れている、輪郭ボリューム手法を用いた同位相面生成手法を提案する。代表的な同位相面生成手法であるマーティングキューブ法は、格子間隔を狭くすることにより品質のよい高密度なメッシュを生成できるが、面数や頂点数が多くなるので扱いにくく、簡単化手法により要素数を減らす必要がある。しかし、格子間隔を広くすると、格子間隔以下の薄さを持つ形状の再現性が悪くなる。本手法は、格子間隔以下の薄さの要素を再現させるため、1)輪郭ボリュームモデル生成、2)輪郭ボリュームから輪郭メッシュ生成、3)頂点フィッティングの段階を経て、符号付距離関数の零値面が通過するボクセルを輪郭ボクセルとして特別に扱うことにした。本手法により要素数は少ないが格子間隔以下の要素の再現性にも優れたメッシュが点群から直接得られ、点群を扱う際のインタラクティブな表示用のメッシュや編集を前提とした素材メッシュとして利用するのに適している。

ABSTRACT

A method of isosurface generation using the contour volumetric method is proposed. The method is useful at detecting thin features of the original shape and also has smooth connectivity with the mesh. The marching cubes algorithm can create a high quality triangular mesh by using a high resolution lattice, but it is not easy to handle the large number of faces and vertices. The wide lattice interval increases the loss of the original shapes, because the algorithm cannot reconstruct a thinner feature. To detect thin features, contour voxels are introduced. The steps of the method are: 1) generating a volume model using contour voxels to detect whole of the object, 2) converting the volume model into the mesh by using predefined look up tables, 3) refining the vertex positions to recover the detailed shape of the object. The performance of interactive operations displaying the object from a point set is improved by using low resolution meshes generated by the method.

* 画像システム事業本部 ソフトウェア研究所
Software Research Center,
Imaging System Business Group

1. 背景と目的

近年、レーザーレンジスキャナ(laser range scanner)やMRI(magnetic resonance imaging)などの3次元測定技術の発達に伴い、現実存在するオブジェクトを計算機内に取り込み、3D形状モデルを生成することにより、可視化する研究が盛んである。測定結果は最終的にオブジェクトの表面に分布する点群として表すのが一般的であるが、点群をそのまま表示しても元のオブジェクトの形状はわかりにくい。一方、3D形状モデルとしては三角形メッシュで表現するサーフェイスモデルが表示のために特別な装置が必要ないので利用しやすい。従って、点群からのサーフェイス再構成手法の重要性が高まっている。

点群からのサーフェイス再構成手法としては、同位相面生成手法であるMarching Cubes法[1]の格子点の値として符号付距離関数を用いたものが一般的である。Hoppe[2]は一定間隔の格子を生成し格子点における関数値を計算し、同位相面生成手法であるMarching Cubes法を適用し零値面としてサーフェイスを抽出した。実用的な時間での処理が可能のため、Curless[3]をはじめとする多くの手法に用いられている。

しかし、これらの手法には次のような問題点がある。

- ・ 格子間隔と位置により形状が変化する。薄い形状や細い形状の場合、再現性が大きく変化する。
- ・ 格子間隔を小さくして得られる高精度のメッシュは要素数が多い。要素数の多いメッシュは表示・保存・転送のコストがかかる。

本論文では、上記の問題点を解決するために次のような3段階の処理からなる輪郭ボリュームを用いた同位相面生成法を提案する。

- (1) 輪郭ボリュームモデルによる、格子間隔、格子位置への依存性の少ない形状取得
- (2) 輪郭点連結法による、薄い形状や細い形状を輪郭ボリュームモデルから継承するための非多様体メッシュ生成
- (3) 頂点フィッティングによる、厚み付けおよび実際の形状の近似

本手法は、薄い形状とりわけ低解像度のその再現性に優れ、点群からのサーフェイス再構成に適用すれば、点群から直接、要素数の少ないメッシュを得ることができる。

本論文では、このあと1章の残りで従来手法とその問題点を、2章にて本手法の説明と実施結果を、3章にて成果を、4章にて将来の課題をそれぞれ述べる。

1-1 従来手法と問題点

Marching Cubes法の問題点として、格子間隔よりも厚みのある太いオブジェクトの場合は形状をよく再現するが、格子間隔を下回る薄いオブジェクトや細いオブジェクトがある場合は確実に再現できない点があげられる。Fig.1にその例を示す。白丸、黒丸を格子点、格子点を結んだ線を格子、灰色の領域をオブジェクト、太い線をMarching Cubes法により生成される形状とする。オブジェクトが格子間隔よりも細い場合、再現できるかどうかは格子点とオブジェクトの位置関係に依存することがわかる。Fig.1(a)のように格子点上にオブジェクトが存在すれば、形状を再現できる。しかし、Fig.1(b)のように格子点の間にオブジェクトが存在するときは、形状を再現できない。

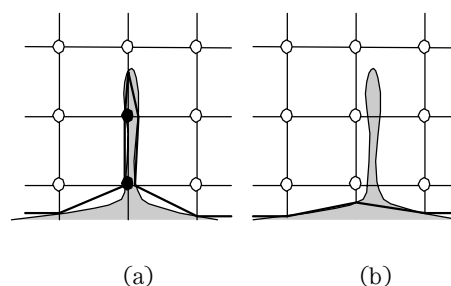


Fig.1 Reconstruction of a thin object using Marching Cubes Algorithm.

点密度が低い場合は、サンプル密度に比べ相対的に薄い形状や、細い形状が多くなるので、その問題が顕在化する。薄い形状再現性を向上させるために、Pulli[4]はSpace Carving法[3]により生成したボリュームモデルの表面をそのままサーフェイスとして抽出したが、ボリュームモデルは直方体形状のボクセルの集合であるため、低解像度の場合ボクセルの稜線部分や頂点部分が不必要な形状として目立つ結果になってしまう。

一方、Marching Cubes法の格子間隔を小さく設定してできる高密度なメッシュ(dense mesh)は、形状をよく再現しているが、要素数の多さから表示・転送・保存にコストがかかる。そこで、より少ない要素で同程度の品質のメッシュを実現するために、メッシュ簡単化・最適化が行われる。

Hoppe[5]は、高密度のメッシュから開始して、メッシュエネルギーの評価計算に基づいて稜線削除などの局所操作により要素数を減らしたメッシュを得た。しかし、一般に簡単化手法は、最適なメッシュを得るために誤差評価のための反復計算を必要とし、時間がかかる。Garland[6]は、quadricsを用いて高速にメッシュ簡単化する方法を提案したが、形状特徴を残しつつ簡単化するためには、一旦、形状をよく表現した高密度メッシュを生成する必要がある、簡単化メッシュを得る前の段階までは高密度メッシュの表示・保存・転送のコストがかかる点では同様である。

2. 技術

本手法で扱う点群は次の前提を満たすものとする。

- ・位置と測定方向を固定した3次元測定装置により物体を測定した点群を部分点群と呼ぶ。装置の位置、測定方向などにより決まる測定対象物体の死角の部分や、測定対象以外の背景は部分点群に含まれない。装置の位置と測定方向は既知であるとする。装置固有の座標系における点群の座標値だけではなく、絶対座標系における座標値も座標変換により得られるものとする。
- ・全体点群は、物体全体の形状を表すために、さまざまな位置と方向から測定した部分点群の和集合として構成される。

本手法は次の3つの処理により構成される。

(1) 輪郭ボリューム生成

Space Carving法[3]を利用して内部・外部・輪郭の3種類の属性を持つボクセルからなるボリュームモデルを生成する。ボクセルの属性を決定する基準となる符号付距離関数(Signed Distance Function, 以下SDF)を式(1)に示す。

$$f(\mathbf{p}) = (\mathbf{x} - \mathbf{p}) \cdot \mathbf{n} \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここで、 \mathbf{p} は任意の点、 \mathbf{x} は \mathbf{p} に最も近い点群内の1点、 \mathbf{n} は \mathbf{x} の近隣の点から計算した平均平面の法線ベクトルである。但し、 \mathbf{n} の向きは各部分点群の測定装置位置の側を指しているものとする。SDFは任意の点から物体の表面までの最短距離であり、物体の外側の点は負の値、内部の点は正の値で表される。内部ボクセルの内部ではSDFは常に正の値になり、物体の内部を表す、外部ボクセルの内部ではSDFが常に負の値になり、物体の外部を表す。輪郭ボクセルはSDFの零値面

が通過し、物体の表面を表す。

(2) 輪郭メッシュ生成

輪郭点連結法を用いて輪郭ボクセルの中心点を頂点とする三角形面からなる輪郭メッシュを生成する。輪郭点連結法は、Marching Cubes法[1]にヒントを得て我々が開発した手法である。2-2節でそのアルゴリズムを説明する。輪郭点連結法により生成される輪郭メッシュは二多様体ではなく、面同士が1つの頂点で接続されていたり、稜線が2枚以上の面により共有されている非多様体である。このため、薄い形状でも厚みのない薄板として表現できる。

(3) 頂点フィッティング

輪郭メッシュのすべての頂点に対し、SDFの零値面にのるように移動させることにより、厚みのない箇所にも厚みをつけ、頂点や稜線のみで接している非多様体の箇所をなくすことにより、実際の形状を近似する。

Fig.2に格子点以下の薄さを持つオブジェクトに本手法を適用する様子を示す。白丸、黒丸をボクセルの中心点、白い4辺形を外部ボクセル、斜線の4辺形を外部ボクセル、灰色の領域をオブジェクト、太い線を輪郭点連結法により生成された形状とする。Fig.2(a)に示すようにサンプリング間隔以下の薄い形状は輪郭ボリュームにおいて1ボクセルの厚みとして表現される。Fig.2(b)に示すように輪郭点連結法で生成した輪郭メッシュでは非多様体を用いて薄い形状を表現できる。Fig.2(c)に示すように頂点フィッティングを行うことにより、非多様体の部分をなくし実際の形状を近似する。

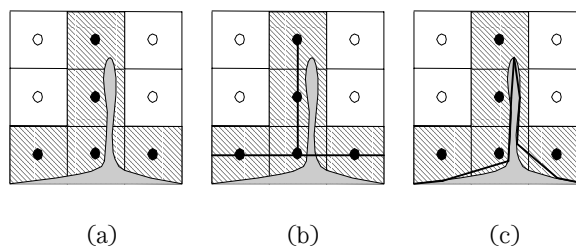


Fig.2 Reconstruction of a thin object using Contour Volumetric Method.

本章では、この3つの処理を順に説明し、本手法を適用した実施結果を述べる。

2-1 輪郭ボリューム生成

Space Carving法[3]を利用して、全体点群から内部・外部・輪郭の3種類の属性を持つボクセルにより構成されるボリュームモデルを生成する手順を示す。

(1) 部分メッシュ生成

部分点群から部分メッシュを生成する。部分点群の近隣の点を結ぶことにより、メッシュを生成する。隣接情報がない場合は、ドロネ三角形分割[12]を用いて三角形メッシュを生成する。部分点群1つにつき部分メッシュが1つ生成される。部分メッシュ集合は、SDFの零値面の近似である。

(2) ボリューム空間生成

全体点群のすべての点を含む大きさの直方体の領域を作成し、予め決めておいた分割数によりボクセルに分割したボリューム空間を作成する。ボクセルは内部・外部・輪郭の3種類の属性値を持ち、初期属性はすべて内部とする。

(3) 外部ボクセル検出

部分メッシュを用いて、Space Carving法[3]を行うことにより外部属性を持つボクセルを検出する。Space Carving法では、測定装置の位置と部分点群の間の空間には何も存在しないことを利用し、測定装置の位置と部分点群を結ぶ線分と交差するボクセルはすべて外部ボクセルと判断する。本手法では、部分点群の密度が低い場合に備えて、さらに測定装置の位置と部分メッシュの各三角形面を結んでできる角錐と交差するボクセルを外部ボクセルとする。

(4) 輪郭ボクセル検出

SDFの零値面と交差するかどうか調べることで、輪郭属性を持つボクセルとして検出する。SDFの零値面の近似表現として部分メッシュを用いる。具体的には、部分メッシュの頂点を含むボクセルおよび部分メッシュの各三角形面が交差するボクセルを検出し輪郭ボクセルに分類する。

以上により輪郭・外部・内部の3種類の属性値を持つボクセルで構成されるボリュームモデルが生成できる。SDFの零値面が通過するボクセルはすべて輪郭ボクセルになるため、細い形状や薄い形状も無視されることなくボリュームモデルとして表現される。

2-2 輪郭メッシュ生成

輪郭点連結法(Marching Contour Points Method, 以下MCP

法)を実施し、輪郭ボリュームから輪郭メッシュを生成する。輪郭メッシュは、二多様体ではなく以下のような要素も存在する非多様体である。

- ・厚みがなく裏表に面が存在する薄板
- ・稜線を共有しない面に共有される頂点
- ・3枚以上の面に共有される稜線

これらの要素により低解像度時に相対的に増える薄い形状を表現することができる。輪郭点連結法のアルゴリズムを示す。

(1) 格子点、属性値およびセルの設定

ボクセルの中心点を格子点とする格子を生成する。格子点は属性値を持ち、ボクセルの属性値(輪郭、外部、内部)をそのまま利用する。隣接する8つの格子点を頂点とする6面体をセルとする。Fig.3に輪郭点連結法のボクセル、格子点、セルの関係を示す。透明の直方体がボクセル、黒丸が輪郭属性または内部属性の格子点、白丸が外部属性の格子点、斜線部の直方体がセルをそれぞれ表している。輪郭点と内部点の属性値は同じものとして扱われるが、面を生成するセルでは後述するように内部点はないため、区別する必要はない。

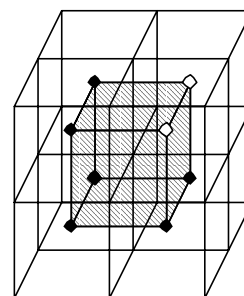


Fig.3 Relationship between voxels, lattice points and a cell

(2) 輪郭メッシュ生成

輪郭属性を持つ格子点および外部属性を持つ格子点の両方を含むすべてのセルを巡回し、各セルの格子点属性値の組み合わせに基づいて、輪郭メッシュを構成する三角形面を生成する。同じ位置に二重に重なった三角形を生成しないため、内部属性格子点と輪郭属性格子点を持つセルをスキップし、輪郭属性を持つ格子点および外部属性を持つ格子点の両方を含むセルだけを巡回する。格子点属性値の組み合わせは256とおりであるが、回転変換により同じ位相になるものを除くと、三角形面を生成するパターンはFig.4に示すように5通り

になる。黒丸が輪郭属性を持つ格子点、白丸が外部属性を持つ格子点、透明の直方体がセル、灰色の領域が生成される三角形、太線が三角形の稜線をそれぞれ表している。具体的な実現方法としては、このような三角形生成情報と回転情報を格納したルックアップテーブルを予め用意しておき、セルの格子点属性値の組をアドレスとしてアクセスすることにより三角形の生成するための情報を得て輪郭メッシュを生成していく。

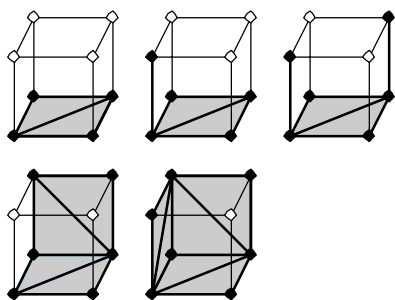


Fig.4 Face Generation Patterns of contour meshes.

以上の手順により、輪郭ボクセルにより表面を覆われたボリュームモデルから、輪郭メッシュが生成される。輪郭メッシュの例をFig.5に示す。

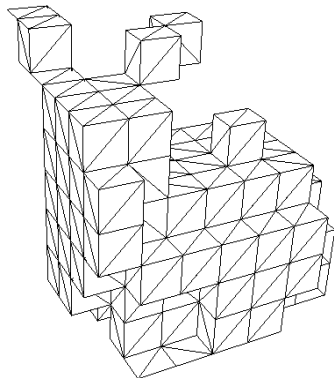


Fig.5 Contour mesh

2-3 頂点フィッティング

輪郭メッシュの頂点を、部分メッシュにのるまで移動させることにより、厚みのない箇所にも厚みをつけ、頂点や稜線のみで接している箇所をなくし、実際の形状を近似することを頂点フィッティングと呼ぶ。輪郭メッシュの頂点はまわりの面や稜線の性質から次の3種類に分類される。

(1) 薄板境界頂点

厚みがない薄板の両側の面の境界部分に存在する頂点を薄板境界頂点と呼び、同じく稜線を薄板境界稜線と呼ぶ。例をFig.6(a)に示す。黒丸で示してあるのが薄板境界頂点であり、太線で示してあるのが薄板境界稜線である。

(2) 非多様体頂点

以下の条件を満たす頂点を非多様体頂点とする。

- ・稜線を共有しない面に共有される頂点(Fig.6(b)の黒丸)
- ・3枚以上の面に共有される稜線(非多様体稜線、Fig.6の太線)に接続する頂点(Fig.6(c)の黒丸)。

(3) 一般頂点

薄板境界頂点、非多様体頂点以外の頂点。

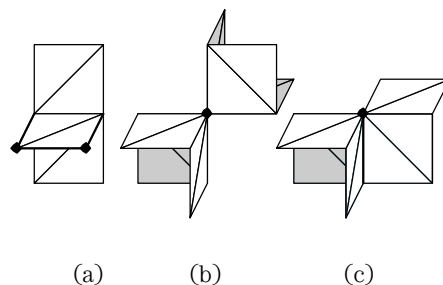


Fig.6 Vertex types for vertex fitting

この分類にしたがって、頂点フィッティング処理を行う。各分類に共通する処理として対角線ベクトルを用いた頂点移動がある。対角線ベクトルは頂点に隣接する三角形面の平均法線ベクトルと逆の方向に、頂点同士(Fig.7(a))、稜線の中点同士(Fig.7(b))、面の中心点同士を結んだもの(Fig.7(c))のいずれかにより定義される。頂点移動の方法は、対角線ベクトルの始点から終点に向かって次のような点が求まるまで、頂点を移動させることにより行う。

- ・対角線ベクトルと部分メッシュの交点
- ・交点が求まらなければ、ボクセル内に存在する部分メッシュの頂点の内、対角線ベクトルの始点から最も距離が近いもの

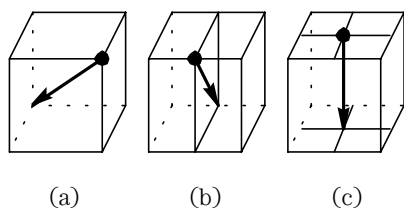


Fig.7 Diagonal vectors

部分メッシュの各三角形面と輪郭メッシュの頂点との関係は、輪郭ボリュームを作成する際に明らかになっているので、対応する輪郭ボクセルに交差する三角形面だけ効率的に頂点フィッティングに用いることができる。

2-3-1 薄板境界頂点

薄板境界頂点について、その頂点のまわりの面のパターン例をFig.8を示す。黒丸が薄板境界頂点であり、太線が薄板境界稜線である。

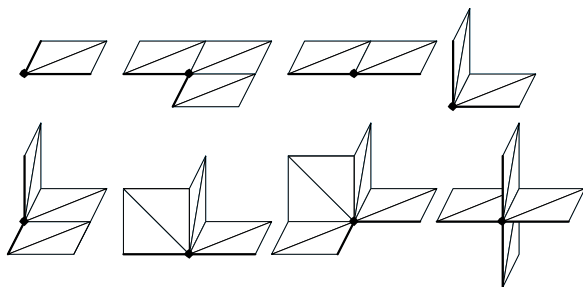


Fig.8 Examples of lamina vertices

しかし、多くのパターンが考えられ、すべてのパターンを網羅するのは困難なため、次に示す統一した手順で処理を行う。

- (1) 薄板境界稜線(Fig.9(a)の太線)に沿って輪郭メッシュをカットする。カットとは、薄板境界頂点および薄板境界稜線を位相的に複製し別の要素として分離することである。
- (2) 分離してできた頂点ごとに頂点移動を行う。(Fig.9(b)). 頂点移動の方向は、分離してできた頂点のまわりの三角形面の法線ベクトルの平均方向(Fig.9(a)の矢印方向)である。
- (3) 新たに三角形面を生成することにより、頂点移動により発生したすきまを穴埋めする。まず、複製した薄板境界稜線を2辺とする三角形(Fig.9(c)の太線で囲まれ

た4つの三角形)を生成する。次に薄板境界稜線が3本以上の場合、薄板境界稜線間に新たに三角形を生成してもまだ多角形領域のすきまがあるので、その多角形のすきまを三角形(Fig.9(d)の太線で囲まれた2つの三角形)に分割することにより穴埋めする。

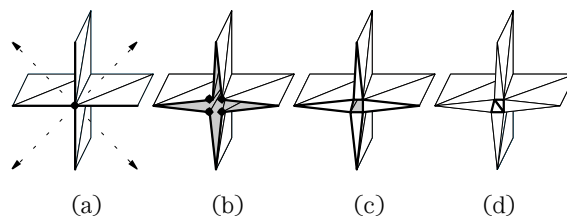


Fig.9 Steps for fitting vertices on boundary of lamina

2-3-2 非多様体頂点

輪郭点連結法では、常に三角形面を2枚1組として生成するので、その1組を4角形面として考えることができる。そのような4角形面のパターン配置を考えると、回転変換により同じになるものを除くと、Fig.10(a), (b), (c)に示す3パターンに集約される。Fig.10の黒丸は非多様体頂点を、太線は非多様体稜線をそれぞれ示している。

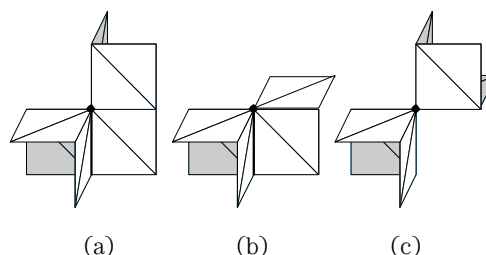


Fig.10 Rectangles around non-manifold vertices

頂点フィッティング手順を示す。なおここでいう稜線はすべて4角形面の境界をなす稜線をさしており、4角形面を形成する3角形面の位相には依存しない。

- (1) カット稜線を選択し、輪郭メッシュをカットする。カットとは、頂点および稜線を位相的に複製し別の要素として分離することである。カット稜線を選択方法は次の通り。
 - ・非多様体稜線に接続する頂点(Fig11.(a)および(d)の黒丸)の場合は、該当する頂点を挟んで直交し別の4角形面に属する2本の一般稜線(Fig11.(a)および(d)の太線)を選択する。

・非多様体頂点(Fig11.(g)の黒丸)の場合は、該当する頂点を挟んで直交し別の4角形面に属する稜線2本を1組とする稜線の組を3組(Fig11.(g)の太線)選択する。

- (2) 分離してできた頂点ごとに頂点移動を行う。頂点移動の方向は、分離してできた頂点のまわりの三角形面の法線ベクトルの平均方向(Fig.11(a),(d)および(g)の矢印方向)である。
- (3) 複製した一般稜線間(Fig.11(b),(e)および(h)の太線)に新たに三角形(Fig.11(c),(f)および(i)の太線で囲まれた領域)を生成することにより穴埋めを行う。

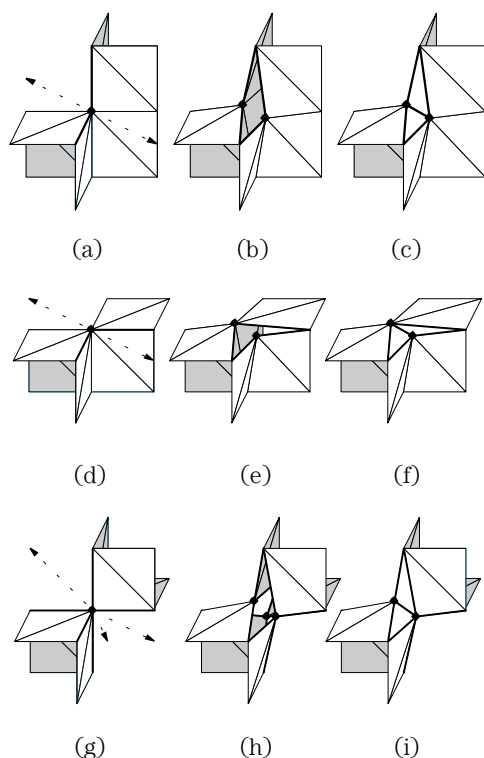


Fig.11 Steps for fitting non-manifold vertices

2-3-3 一般頂点

非多様体頂点の場合と同様に、頂点に隣接する三角形面の2枚ずつの組を4角形面として考えると、回転変換により同じになるものを除くと、一般頂点はFig.12に示す10パターンに集約される。各パターンについて三角形面の平均法線ベクトルを求め、そのベクトルに最も近い対角線ベクトルを用いて頂点フィッティングを行う。

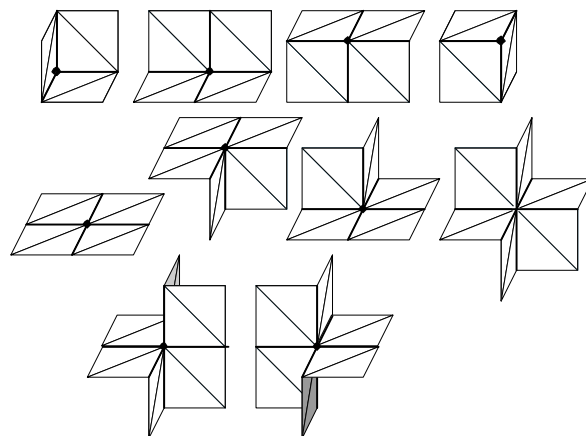


Fig.12 Rectangles around regular vertices.

2-4 実施結果

本手法により点群から再構成したメッシュをFig.13に示す。Fig.13(a), (b), (c)が本手法により生成したメッシュである。(a), (b), (c)はそれぞれ、 8^3 , 16^3 , 32^3 の大きさのボリュームモデルから生成した。各メッシュとも耳のような薄い形状でも失われることなく形状が再構築できているのがわかる。また、もとの形状がなめらかな部分では、不要な角等がほとんどなくなめらかに要素が減らされている。Fig.13(d)は部分点群をZippered Polygon手法[14]により張り合わせた高密度メッシュ[15]で元の形状の参考用である。

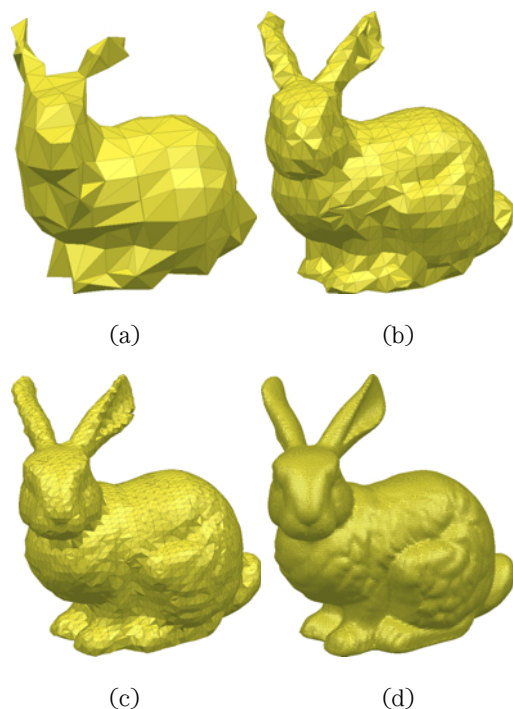


Fig.13 Results of surface reconstruction from a set of points: (a)from 8^3 volume model, (b) 16^3 volume model, (c) 32^3 volume model, (d)dense mesh.

本手法をメッシュの簡単化に応用した例をFig.14に示す。簡単化はFig.14(d)に示すオリジナルメッシュ[16]を1つの部分メッシュとして解釈し、本手法を適用した。Fig.14(a), (b), (c)が本手法により生成したメッシュである。(a), (b), (c)はそれぞれ、 8^3 , 16^3 , 32^3 の大きさのボリュームモデルから生成した。簡単化では、隣合う三角形の成す角度がある角度以下の場合、それらの三角形が共有する稜線の特徴稜線として検出し、特徴稜線の存在する輪郭ボクセルにおいては、特徴稜線上にメッシュ頂点ができるように頂点フィッティングを行った。検出した特徴稜線をFig.14(e)に示す。各メッシュとも、形状は簡単化されても鋭角の特徴稜線が保存されているのがわかる。また、再構成の例と同様にもとの形状がなめらかな部分では、不要な角等がほとんどなくなめらかに要素が減らされている。

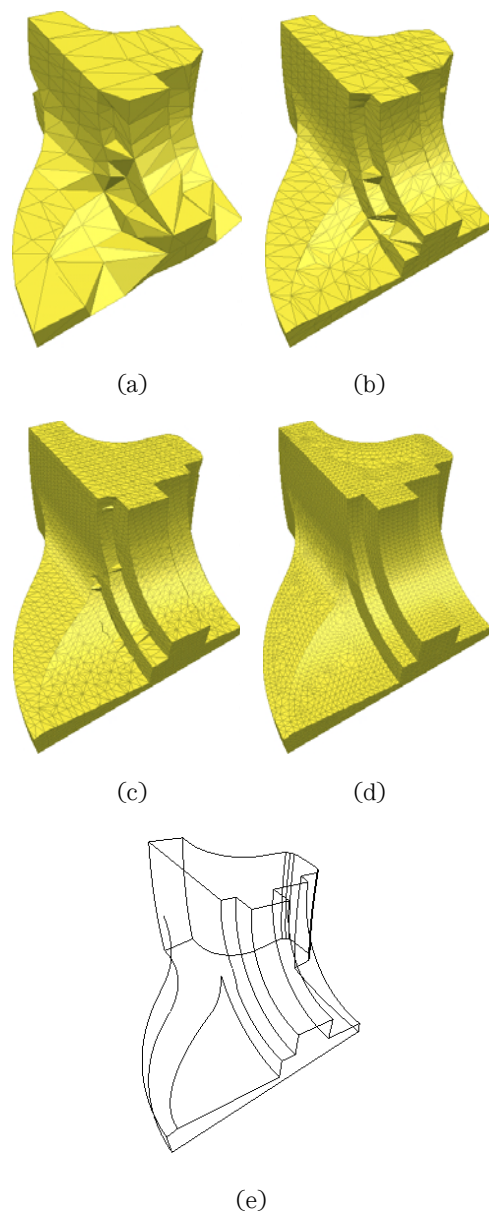


Fig.14 Results of the mesh simplification: (a)from 8^3 volume model, (b) 16^3 volume model, (c) 32^3 volume model, (d)the original mesh, (e)character edges.

Table 1に本手法で生成したメッシュの計測データを示す。生成時間はAT互換機(PentiumII 333MHz, 196MB RAM)で計測した。

Table 1 Performance statistics for reconstruction(all time units are in seconds).

Label	dimension	#faces	#vertices	time
Fig.12 (a)	8 ³	496	255	1.9
Fig.12 (b)	16 ³	2014	1041	2.5
Fig.12 (c)	32 ³	8151	4366	4.5
Fig.12 (d)	-	69451	35947	-
Fig.13 (a)	8 ³	438	221	12.1
Fig.13 (b)	16 ³	1942	977	12.6
Fig.13 (c)	32 ³	8144	4090	14.2
Fig.13 (d)	-	12946	6475	-

3. 成果

輪郭点連結法を点群データからのサーフェイスモデル再構成とメッシュ簡単化に適用し、実際に実装して以下の項目を確認した。

- ・薄い形状の再現
- ・スムーズな形状の再現
- ・メッシュ簡単化への応用
- ・特徴稜線の保存

一方、次のような問題点があることが、実施例からわかる。

- ・メッシュの各面の大きさが形状の変化の度合いに関わらずほぼ一様であり、あまり変化のない形状の場合は無駄である。
- ・ひとつのボクセルの中に複数の特徴稜線が存在する場合、形状が乱れがちになる。

4. 今後の展開

今後は、現状の問題点を解決するために、非一様ボリュームへの対応が考えられる。現状の問題点は一様ボリュームの制限ともいえるので、非一様ボリュームに本手法を対応させることにより、面数の削減と品質の向上を図っていきたい。

参考文献

- 1) W. E. Lorensen, H. E. Cline: Marching cubes: A High resolution 3D surface construction algorithm, SIGGRAPH '87 Proceedings, (1987), pp.163-169.
- 2) H. Hoppe et al.: Marching cubes: A High resolution 3D surface construction algorithm, SIGGRAPH '92 Proceedings, (1992), pp.71-78.
- 3) B. Curreless, M. Levoy: A volumetric method for building complex models from range images, SIGGRAPH '96 Proceedings, (1996), pp.303-312.
- 4) K. Pulli et al.: Robust meshes from multiple range maps, Proceedings of International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling, (1997), pp.205-211.
- 5) H. Hoppe et al.: Mesh Optimization, SIGGRAPH '93 Proceedings, (1993), pp.19-26.
- 6) M. Garland, P. S. Heckbert: Surface simplification using quadric error metrics, SIGGRAPH'97 Conference Proceedings, (1997), pp. 209-216.
- 7) C. T. Loop: Smooth subdivision surfaces based on triangles, Master's Thesis, Department of Mathematics, University of Utah, (1987)..
- 8) L. Piegl, W. Tiller: The NURB Book, Springer-Verlag, (1995).
- 9) M. Eck, H. Hoppe: Automatic reconstruction of B-Spline surfaces of arbitrary topological type, SIGGRAPH '96 Conference Proceedings, (1996), pp.325-334.
- 10) V. Krishnamurthy, M. Levoy: Fitting smooth surfaces to dense polygon meshes, SIGGRAPH '96 Conference Proceedings, (1996), pp.313-324.
- 11) K. Weiler: The Radial Edge Structure: A Topological Representation for Non-Manifold Geometric Boundary Modeling, Geometric modeling for CAD applications, (1988), pp.3-36.
- 12) J. D. Boissonnat: Geometric structures for three-dimensional shape representation, ACM Transactions on Graphics, vol. 3, (1986), pp. 266-286.
- 13) G. Roth, E. Wibowoo: An efficient volumetric method for building closed triangular meshes from 3D image and point data, Graphics Interface '97 Proceedings, (1997), pp.173-189.
- 14) G. Turk, M. Levoy: Zippered polygon meshes from range images, SIGGRAPH '94 Conference Proceedings, (1994), pp.311-318.
- 15) The Stanford 3D Scanning Repository:
<http://www-graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep>.
- 16) Huges Hoppe's home page:
<http://www.research.microsoft.com/~hoppe>.