

## 3D 物体表面の特徴パラメータを利用した再メッシュ化手法

森田 伊織<sup>†</sup> 坂本 博康<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>九州大学大学院芸術工学研究府 〒815-8540 福岡市南区塩原 4-9-1

<sup>‡</sup>九州大学大学院芸術工学研究院 〒815-8540 福岡市南区塩原 4-9-1

E-mail: <sup>†</sup>sakamoto@design.kyushu-u.ac.jp

**あらまし** 3D スキャナ等で標本化された物体の表面は、エッジの方向性が不規則な三角形メッシュとなるものが多い。このようなメッシュを設計・製作プロセスに利用する場合は、規則的な方向に並んだエッジを持つメッシュに、手作業で修正する必要がある。本報告では、Pottmann 等の Feature Sensitive な計量を応用した領域分割を経た再メッシュ化手法を提案する。本手法は、まずメッシュの双対グラフにおいて、上の計量を組み込んだ最短距離経路に基づくボロノイ分割を行う。次に、これら分割された領域をそれぞれ格子状パターンに埋込み、最後に、再メッシュ化によって、エッジを特徴の方向に整列化させる。

キーワード 三角形メッシュ, Feature Sensitive, 双対グラフ, ボロノイ分割, 最短経路問題

## A Re-meshing Method using Feature Parameters of 3D Object Surface

Iori MORITA<sup>†</sup>, Hiroyasu SAKAMOTO<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Design, Kyushu University 4-9-1 Shiobaru, Minami-ku, Fukuoka, 815-8540 Japan

<sup>‡</sup> Faculty of Design, Kyushu University 4-9-1 Shiobaru, Minami-ku, Fukuoka, 815-8540 Japan

E-mail: <sup>†</sup>sakamoto@design.kyushu-u.ac.jp

**Abstract** An Object surface sampled by 3D scanner is in many cases triangle mesh whose edges have random directions. Therefore when we use it in design or manufacture process, it is necessary to reconfigure manually to meshes with aligned edges. In this report, we propose a re-meshing method via segmentation using feature sensitive metric proposed by Pottmann et al. At first our method computes Voronoi partition based on the shortest metric path in the dual graph of the mesh. Next, segmented regions are embedded into grid patterns respectively and finally we align edges with feature directions by re-meshing.

**Keyword** triangle mesh, feature sensitive, dual graph, Voronoi partition, shortest-path algorithm

### 1. まえがき

三角形メッシュは、さまざまな 3D モデルを扱うことができるという点で、コンピュータビジョンやグラフィックスの中でも用途の広い曲面の表現方法である。また最近では、レンジスキャナ等の形状測定技術の発達に伴い、実空間の物体の 3 次元形状

を、高速かつ高密度にサンプリングすることも可能になった。3D スキャナなどで、計測した実物体のデータから、CG による設計図を書き起こす処理は、リバーセンジニアリングと呼ばれ、研究が盛んに行われている。しかし、スキャニングされた 3D モデルを、実際の設計・製作プロセスに利用するためには、次の 2 つの問題を解決し

なければならない。

- (1) サンプリングされたデータは、情報量が膨大である。
- (2) エッジの方向性が不規則である。

問題(1)については、プログレッシブメッシュ法[9],[10],[2]のような多重解像度表現を用いた簡略化によって解決されるが、問題(2)を自動的に解決することは比較的難しい。表面を形成するエッジは物体の特徴に応じて、整列化される必要があるが、従来では、この処理は手作業でなされている。

金井等は、エッジの整列化処理を行うユーザーの負荷を軽減するために、対話的な再メッシュ化手法[1]を提案した。この手法では、メッシュは、まずユーザーがオブジェクト表面上に引いた境界線によって、円盤と位相同型の部分領域に分割される。分割された各領域には、格子状パターン（あるいは、放射状パターン）が割り当てられ、その後、パターンの間隔を補正することで、均一的なメッシュの再構築を可能にしている。しかし、金井らの手法では、各領域を分割する境界線を、ユーザーが手入力しなければならないため、形状が複雑な場合や細かな領域分割が必要な場合には、相応の手間が掛かる。また、手入力で設定された境界線は、統計的に望ましい境界線と比較すると、ずれが生じる可能性もある。さらに、この手法では円盤と位相同型の領域だけにしか、パターンの埋込みを考慮していない。

稜線などの 3D 形状の特徴を検出する手法としては、Pottmann 等が提案した feature sensitive metric[3][4]が挙げられる。この手法は、従来のエッジ検出手法に比べて、なだらかな稜線も敏感に検出できるという利点がある。Pottmann 等は、物体表面の法線パラメータの集合について、統計的処理を行うことで、3D 物体表面のさまざまな特徴(回転移動成分, 平行移動成分, 螺旋移動成分など)を検出する方法[5][6][7][8]についても述べている。

3D 物体表面のセグメンテーション手法については、Sagi,Ayellet[11]が階層的ファジィクラスタリングを用いることによって

良好な結果を得ている。

本研究の目的は、3D スキャナで標本化された高解像度のメッシュデータから、表面の局所的な特徴に応じてエッジが整列した低解像度のメッシュデータを、効率よく生成する新しい枠組みをすることである。本報告では、主に再メッシュ化の前処理となるオブジェクト表面の領域分割に焦点を当て、より簡単で効率的な物体表面のセグメンテーション法について詳しく説明する。

本報告の 2 章では、Pottmann 等が提案した Feature Sensitive Metric について説明を行う。3 章では、ボロノイ分割によるセグメンテーションについての説明を行い、分割の結果を示す。4 章では、我々が目指す再メッシュ化までの手順について述べ、5 章では、本報告のまとめを行う。

## 2. 特徴パラメータ

オブジェクトの表面には、曲率の大きい場所と小さい場所がある。曲率の大きい場所は、形状の特徴を認識する上で重要な所なので、特徴パラメータは、その場所の曲率の大きさに基づいて、数値を割り当てる。本研究では Pottmann 等の feature sensitive metric を応用して、数値を設定している。この手法は表面の曲率の変化を感度良く取り出すことができる。

### 2.1 表面上での距離尺度

オブジェクトの表面は、三角形メッシュ  $M$  で表されるとする。 $M$  は、それを構成する頂点の集合  $V$ 、エッジの集合  $E$ 、フェースの集合  $F$  を用いて、 $M=(V,E,F)$  で表されるグラフとする。オブジェクト表面は複数のフェースで形成される三角形メッシュなので、特徴パラメータは各フェースの重心ごと割り当てられる。まず、ある点  $x_0 \in R^3$  から、任意の点  $x \in R^3$  までのユークリッド距離は次式で定義される。

$$Dist(x_0, x) = \sqrt{(x_0 - x)^T (x_0 - x)} \quad (1)$$

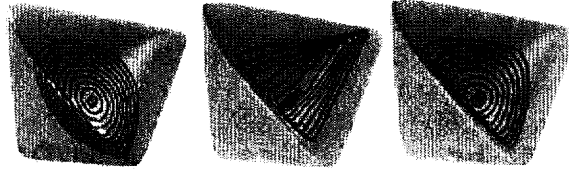


図 1(a) ユークリッド距離 (b)角度変化 (c)混合尺度

次に、オブジェクト表面上の点 $x_0$ ,  $x$ にそれぞれ付随する単位法線ベクトルを $n(x_0)$ ,  $n(x) \in R^3$ とし、 $n(x_0)$ と $n(x)$ との角度変化の尺度を次式で定義する。

$$Arg\_Dist(n(x_0), n(x)) = 1 - n(x_0) \cdot n(x) = 1 - \cos A \quad (2)$$

さらに、(1)(2)の線形結合によって算出される混合尺度を定義する。ここで、重み係数 $w$ は混合尺度に含まれる角度変化の尺度の重みを表す。

$$Geod(x_0, x) = Dist(x_0, x) + w \cdot Arg\_Dist(n(x_0), n(x)) \quad (3)$$

図 1(a)(b)(c)は、それぞれの尺度の距離に基づいて、物体表面上の基準点 $x_0$ から等距離になる地点を線で結んだ図を表わしている。(b)の角度の尺度を使えば、曲率が大きい稜線部分で等距離線の間隔が密になる。さらに、(c)の混合尺度を用いれば、稜線の部分の等距離線間隔だけが密に示されていることがわかる。

本研究では、点 $x_0$ から $x$ までの混合距離パラメータを算出し、その混合尺度を偏微分して勾配ベクトルを算出する。この勾配ベクトルは稜線ベクトルに垂直なベクトルとなり、勾配ベクトルの絶対値は特徴の大きさを表わす数値となる。

## 2.2 稜線方向と特徴パラメータの算出

ある三角形フェース $f$ の重心位置 $x$ とし、三角形 $f$ の各頂点の位置を $a$ ,  $b$ ,  $c$ とすると、 $f$ における混合尺度の勾配ベクトルは、次式で表される。

$$Fs(x_0, x) = \{Geod(x_0, b) - Geod(x_0, a)\}(b - a) + \{Geod(x_0, c) - Geod(x_0, a)\}(c - a) \quad (4)$$

勾配ベクトル $Fs(x_0, x)$ の向きは最大曲率方向を表し、その絶対値は曲率の大きさを現す。そのため、単純な特徴パラメータは $\|Fs(x_0, x)\|$ となる。稜線方向ベクトルは $f$ の法線 $n(x)$ 、最大曲率方向ベクトル、 $Fs(x_0, x)$ の両方に垂直なベクトルになるので次式で表される。

$$Ridge(x_0, x) = \{Geod(x_0, b) - Geod(x_0, a)\}(c - a) + \{Geod(x_0, c) - Geod(x_0, a)\}(b - a) \quad (5)$$

単純な特徴パラメータ $\|Fs(x_0, x)\|$ を人の顔モデルのサーフェス上に写像したものを図 2 に示す。特徴パラメータの大きな場所は白く、小さな場所は黒く表示されている。



図 2  $\|Fs(x_0, x)\|$ のマップ

### 2.3 単純な特徴パラメータの問題点

図2で示した単純な特徴パラメータは曲率の大きな鼻、唇、眼窩や頬の稜線に大きな値が割り振られ、表情筋による微妙な凹凸の情報も現れていることがわかる。

ただし、この $\|Fs(x_0, x)\|$ を用いるには、次の2点に注意する必要がある。

- (1) 基準点  $x_0$  の場所によっては、曲率の大きいはずの点  $x$  に高い値が割り振られない場合もある。
- (2) ノイズに対しても非常に敏感である。

(1)の問題を考察すると、基準点  $x_0$  がいずれかの稜線上に位置する場合、また、 $x_0$  がいずれかの稜線の延長線上に位置する場合、その稜線部分の特徴パラメータは大きな値にはならない。

基準点  $x_0$  が1つだけの単純な特徴パラメータでは、全ての稜線を検出することが難しい。そこで、点  $x$  の正確な特徴パラメータを算出するためには、複数の基準点を探り、それぞれの基準点における最大の $\|Fs(x_0, x)\|$ を点  $x$  の特徴パラメータとして評価を行う必要がある。

三角形フェース  $F$  のなかからいくつかのフェースをランダムに選択し、その集合を  $G$  とする ( $G \subset F$ )。  $G$  の要素を  $g_k$  とし、その個数を  $K$  とする。これらフェース  $g_k$  の重心を基準点  $x_{0,k}$  ( $k=1, \dots, K$ ) とし、勾配ベクトル

$Fs(x_{0,k}, x)$  をそれぞれ求める。このとき、 $g_k$  はシェアリングによって位置的な多様性を維持しながら選択することが望ましい。

$g_k$  の重心を  $x_{0,k}$  ( $k=1, \dots, K$ ) とすると、曲率が最大となる  $x$  の特徴パラメータ  $\max Fs(x)$  は次式で現すことができる。

$$\max Fs(x) = \max_{k \in 1, \dots, K} \|Fs(x_{0,k}, x)\| \quad (6)$$

また、式(6)を最大化する基準点  $x_{0,k}$  によって、稜線方向のベクトルも更新する。

(2)の問題については、フェース  $f_i$  のそれぞれの近傍フェースにおいて、平均値フィルタを複数回かける。これによってノイズの問題を解決する。

## 3. 表面の領域分割

表面を部分領域に分割 (Segmentation) するために、いくつかの従来法は、曲率の大きな部分のみ着目して、エッジ検出を行っている。しかし、そのような手法では、曲率の大きな箇所の連続性が得られず、検出したエッジが繋がらない可能性もある。そこで、本手法では曲率の大きな部分に囲まれた箇所を母点とするポロノイ分割を利用している。

本手法はポロノイ分割を利用することで、従来の手法では検出の難しい緩やかな稜線を、ポロノイ境界として検出することができる。

### 3.1 ポロノイ分割

空間内に複数の母点を指定し、その空間内で最も距離の近い母点に基づいて領域を分ける処理をポロノイ分割と言う。2次元平面上に複数の母点を設定し、ユークリッド距離に基づいてポロノイ分割を行った結果を図3に示す。

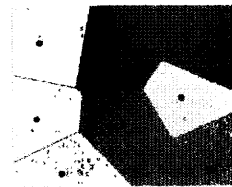


図3 ポロノイ分割

また、図4は、フェースの集合  $F$  のなかから、ランダムに選択したフェースの重心 (図中の白点) を母点として、ポロノイ分割を行った結果である。ただし、分割に適用する距離の尺度をユークリッド距離にしてしまうと、頬と眼球、上唇と下唇など、互いに

接続性がない部分を同じ領域に割り振ってしまう可能性がある。そこで、分割の尺度には、グラフ理論を応用してフェース間の隣接リング数や最短距離経路を用いる。隣接リング数については3.2で後述する。

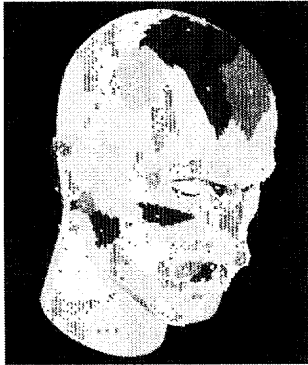


図4 オブジェクトの領域分割

### 3.2 ユーザーによる母点の指定

特徴量マップのノイズを、近傍フェースによる平均値フィルタによって除去し、階調数を8に減らした特徴パラメータのマップを図5に示す。

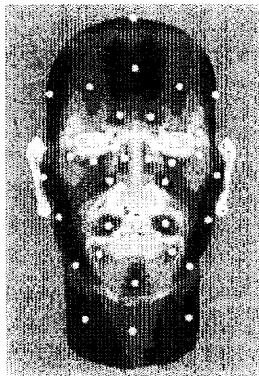


図5 階調数を削減した特徴パラメータのマップとユーザーによる母点の指定

本報告ではユーザー指定による母点を用いてボロノイ分割を行い、その結果を評価する。ユーザーは、図5の中で、比較的特

徴パラメータの大きなフェースに囲まれた箇所をマウスで指定する。実験ではユーザーによって60個の母点(白)が選択された。それらの指定点を母点とし、ボロノイ分割を行う。

### 3.3 分割に用いる距離の尺度

前述したようにオブジェクト表面を形成する三角形メッシュ $M$ は、頂点の集合 $V$ 、エッジの集合 $E$ 、フェースの集合 $F$ で構成されたグラフとする。図6(a)の黒線は三角形メッシュの一部分を拡大した図である。このとき、あるフェース $f_i$ と同じエッジを共有するフェースを $f_i$ の隣接フェースと呼ぶ。また、隣接フェース同士の重心を線で結ぶと、それらの線はグラフ $M$ と双対関係を持つグラフとなる。これを $M$ の双対グラフと呼ぶ。双対グラフは、各フェースの重心(図6(b)の▲)を頂点とし、 $M$ のエッジと同数のエッジを有するグラフと考えることができる。また、双対グラフのエッジを双対エッジと呼ぶ。図6(b)の破線が双対エッジである。双対エッジの重みをすべて1に設定した最短経路を隣接リング数と呼ぶことにする。

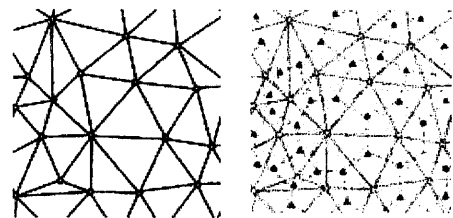


図6(a) グラフ  $M$  (b)  $M$  の双対グラフ

ここで、双対エッジの重みを、重心間のユークリッド距離、特徴パラメータ、法線の角度変化から設定する。本報告では互いに隣接しない2つのフェースがあるとき、表面上における2フェースの重心間の距離を、 $M$ の双対グラフの最短距離経路で代用する。実験ではフェース $f_i$ と $f_j$ の重心を結ぶ双対エッジについて、次のような重み  $Weight(f_i, f_j)$  を設定した。

$$\begin{aligned}
 \text{Weight}(f_i, f_j) = & \\
 & \text{Dist}(x_i, x_j) \\
 & + w_1 \cdot \text{Arg\_Dist}(n(x_i), n(x_j)) \\
 & + w_2 \cdot \{\max F_s(x_i) + \max F_s(x_j)\}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

ここで、 $w_1$ と $w_2$ はユーザーが設定する重み係数である。式(7)の各双対エッジに式(7)の重みをつけて、算出される最短距離経路を比較することでボロノイ分割を行う。

### 3.4 母点指定の自動化

複雑な形状のセグメンテーションには、より多くの母点の指定が必要になる。そのため、この手法をより効率化するためには、母点の指定を自動化する必要も生じるだろう。自動化については、最急降下法を用いて、特徴パラメータの局所的な最小解を検出することによって実現できると考えている。ただし、意匠設計の分野に本手法を応用することを考えると、完全な自動化は理想的ではない。むしろ、コンピュータによって、母点のある程度ロバストに選択し、その結果をユーザーが必要に応じて、追加、修正できるシステムにし、デザイナーの意図を反映させることが理想的と言えるだろう。

### 3.5 セグメンテーションの結果

本報告では隣接リング数基準によるボロノイ分割の結果と、式(7)の最短距離経路基準によるボロノイ分割を実行し、それぞれの結果について考察を行った。

ボロノイ分割の母点には両者とも3.1で指定した点を設定している。単一の始点からの最短経路探索には、ダイクストラのアルゴリズムを用いることが一般的であるが、この手法では、対グラフにおける経路をすべて探索する必要はない。そのため、局所領域でダイクストラ法よりも高速な幅優先探索法を採用し、最短距離経路の比較を行っている。

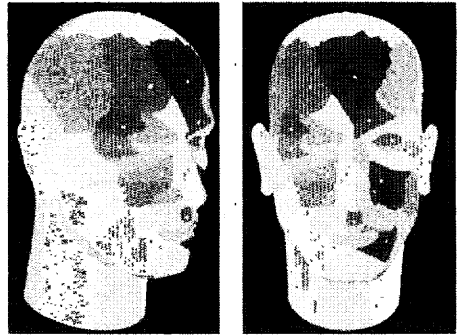


図7 (a)(b)隣接リング数基準のボロノイ分割

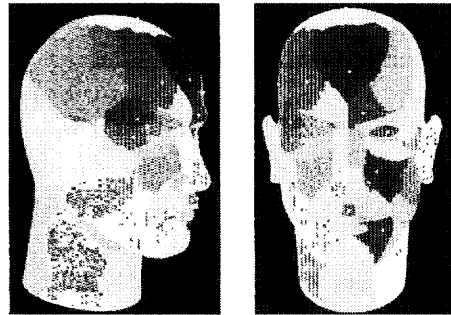


図8 (a)(b)式(7)の最短距離経路基準のボロノイ分割

図7、図8のどちらの結果においても、鼻や頬、あご、唇などの稜線は、ボロノイ境界経路として捉えられている。図7の分割と比べて、図8の分割では、さらに耳や鼻の輪郭線が境界経路として検出されている。曲率の大きな場所では最短経路距離の重みが大きくなるためである。双対エッジにかかる重みについて、さらに工夫を加えることで、用途に応じて有効なさまざまな分割結果を得ることが可能になると予想される。

また、この領域分割の実験では、耳の部位には、特に詳細な母点を選択しなかったが、本手法では、局所的に詳細な母点を割り振ることによって、耳介のような複雑なオブジェクトでも、ある程度特徴を反映した領域分割が可能となる(図9を参照)。



図9 耳の部分のボロノイ分割  
(式(7)の最短経路距離基準)

## 4. 再メッシュ化の手続き

我々が提案する再メッシュ化までの手続きは次の通りである。

### (i)メッシュの簡略化

標本化されたメッシュデータをプログレッシブメッシュ法[8][9]によって簡略化し、メッシュの解像度を適当なレベルにまで下げる。

### (ii)物体表面の領域分割

Feature Sensitive Metric に応用したセグメンテーションを行って、表面を部分領域に分割する。

### (iii)各領域の線素幾何学解析

分割された部分領域の形状を、線素幾何学的解析([6][8])を用いて分析し、それぞれの分割領域に融合・分割などの補正処理を施す。同時に、球、平面、回転体、平行移動体などの幾何学的特性を判定する。

### (iv)パターンへの埋込み

各部分領域の幾何学的特性に応じて、格子状、円筒状、放射状等の中から相応しいパターンを選択し、[1]の手法を応用して埋込みを行う。

## 5. まとめ

本報告の領域分割の結果、鼻や唇、あご、眼窩の周囲など、稜線部分を各部分領域の境界経路として検出できることがわかった。また、この領域分割を用いることで、従来のエッジ検出では困難だった、なだらかな稜線の検出にも、ある程度の成果が見られた。また、この領域分割は、領域の中心をユーザーが感覚的に指定して領域分割を行うため、3D形状のインタラクティブなセグメンテーションツールとしても使うことができる。

本報告では、再メッシュ化の前処理となる(ii)の物体表面の領域分割に焦点を当て、より簡単な領域のセグメンテーション手法について説明した。今後は、ボロノイ分割の母点選択の自動化と、(iii)や(iv)のステップを中心に研究を続けていく予定である。

我々が目指す再メッシュ化手法は、デザインや設計の分野だけではなく、実物体の計測データをそのまま利用したモーフィングアニメーションや、パラメトリック曲面のフィッティングなど、CGさまざまな分野にも応用が期待される。

### 参考文献

- [1] 金井崇, 鈴木宏正, "対話的なメッシュの均一再メッシュ化手法", グラフィクスとCAD/Visual Computing 合同シンポジウム, 札幌, 6月, 論文集 pp.91-96, 2001
- [2] 金井崇, "多重解像度メッシュの生成・編集処理技術", 情報処理学会誌特集「3D デジタルコンテンツのためのモデリング技術」, 41巻10号, pp.1108-1112, 2000
- [3] Y.Lai, Zhou, S.Hu, J.Qallner, H.Pottmann, "Feature sensitive geometry processing", IEEE Trans, Vis. Comp. Graphics, 2006
- [4] H.Pottmann, T.Steiner, M.Hofer, C.Haider, A.Hanbry, "The isophotic metric and its applications to feature sensitive morphology on surfaces", Computer Vision -ECCV 2004, Part IV, volume 3024 of Lecture Notes in Computer Science, pp 560-572. Springer , 2004

- [5]H.Pottmann and J.Wallner, "Computational Line Geometry", SPRINGER, BERLIN, 2001
- [6]M.Hofer,B.Odehnal, H.Pottmann, T.Steiner, J.Wallner, "3Dshape recognition and reconstruction based on line element geometry", Proc. ICCV'05, volume 2, pp 1532-1538, 2005
- [7]H.Pottmann,M.Hofer,B.Odehnal,J.Wallner, "Line Geometry for 3D Shape Understanding and Reconstruction",Computer Vision –ECCV 2004, Part I, volume 3021 of Lecture Notes in Computer Science, pp297, 297-309, Springer, 2004
- [8]N.Gelfand,L.Guibas,"Shape Segmentation Using Local Slippable Analysis" Symposium on Geometry Processing, 2004
- [9]H.Hoppe,"Progressivemeshes",Proc.SIGGRAPH 96, 1996
- [10]M.Garland,P.S.Heckbert, "Surfacesimplification using quadric error metrics", Proc.SIGGRAPH 97, 1997
- [11]K.Sagi,T.Ayellet,"Hierarchical Mesh Decomposition using Fuzzy Clustering and Cuts", Proc SIGGRAPH 2003, 2003