

3次元表面の特徴に基づく等方構造への 再メッシュ化

森田 伊織† 坂本 博康‡
†九州大学大学院 芸術工学府
‡九州大学大学院 芸術工学研究院

高解像度のレーザースキャナーなどで得られた3次元表面は、通常、非常に稠密で、エッジ方向が不規則なメッシュとなるため、設計プロセスでは扱いづらいことが多い。本研究の目的は、そのような3DモデルをCGコンテンツ制作などに利用できるように、適切な解像度で、特徴を反映した等方メッシュに変換する手法の開発である。本報告では、曲面における2つの主曲率と主曲率方向の新しい算法について提案する。この手法は、近傍領域の統計から曲率を求める従来法より、効率化を図ることを可能にする。さらに、我々は、主曲率とグラフ理論を応用したモデル表面のボロノイ分割についても議論する。

Remeshing 3D Surface to Conformal Structure Based on Features

Iori Morita † Hiroyasu Sakamoto ‡
† Kyushu Univ, Graduate School of Design
‡ Kyushu Univ, Faculty of Design,
Fukuoka 815-8540, japan

It is usually inconvenient for design process to use 3D surface sampled by high resolution devices such as a laser scanner, because it may have too dense structure to handle efficiently and its edge directions are irregular. Our goal is to develop a method that modify such 3D surface data into conformal meshes with suitable resolution and structure based on its features for making of CG contents and such. In this report, we propose a new method for computing two principal curvatures and principal directions over the surface. This method can compute the principal curvatures more efficiently than previous methods using statistics at neighborhood. Further, we discuss an algorithm for the Boronoi partitioning of model surface using the principal curvatures and the graph theory.

1. はじめに

3D スキャナー等によって得られたモデルは、離散的な点群データから Delaunay の三角

分割などの方法で生成された三角形メッシュである。そのため、しばしば非常に稠密で、エッジ方向に統一性のないメッシュとなる。このような3DメッシュはCADなどの設計プ

ロセスには適さないことが多い。一方、3Dモデルデザインでは、形状の変化やテクスチャパラメータなどを設定しやすいという利点から、整列化された四辺形構造のモデルがよく用いられる。このような構造は等方構造と呼ばれる。スキヤニングによって得られた非等方なメッシュを、設計プロセスに組み入れるときは、非等方構造から等方構造に再メッシュ化処理を施すことが望ましい。しかし、そのような再メッシュ化処理を自動的に行うことは困難であり、現段階では手作業で行われる場合が多い。

本研究の目的は、非等方なメッシュ構造からの、物体形状の特徴に基づいた等方メッシュの構築処理と、その自動化である。高解像度モデルから、等方メッシュをほぼ自動的に構築することができれば、CG製作やCADなどのモデル設計の分野で、作業を効率化することができる。

再メッシュ化については、これまでに、いくつかの研究が行われている。金井等はメッシュ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。この手法ではユーザーが引いた境界線によって、メッシュは円盤と位相同型な諸領域に分割し、各領域に格子状パターンを割り当てることによって、等方構造を構築している。また、Ray等は、曲面の主曲率方向に沿って、等方メッシュを構築する周期的パラメータ化手法[3]について提案している。この手法は、メッシュを各領域に分割することなく、任意のトポロジーを持つモデル表面に適用可能である。主曲率・主曲率方向を算出する手法については、cohen-steiner等の手法[5]やYang等の手法[6]がある。

また、再メッシュ化の前に3Dモデルの特徴に応じて分割するアイデアも考えられる。3Dモデルを分割する手法については、SagiとAyelletの階層的クラスタリング[2]が挙げられる。3Dオブジェクトの表面は、一般的に半分以上が外側に向かって凸である。彼らのアルゴリズムは、その特性を利用し、オブジェクトの外側から見て凹となる部分の重みを大きくして、ボロノイ分割を行い、両京菜結果を得ている。また、Yoshizama等[4]は

曲率の高次微分係数から、稜線部分の頂となる頂線の検出を行っている。

本報告では、再メッシュ化処理の前処理として重要な、三角形メッシュの主曲率、および主曲率方向を算出する手法と、3Dモデルのクラスタリングについて説明し、それをを用いた今後の展望について述べる。

2. 主曲率の算出

3Dモデル表面の特徴を表すパラメータとして、主曲率とその方向が挙げられる。そこで、本報告では、曲面の第1・第2主曲率とその方向ベクトルを算出する手法を提案する。本研究で扱うオブジェクトは三角形メッシュである。主曲率の算出法については、[5]や[6]で広域的、統計的な手法を提案しているが、本手法は、フェース1枚ごとに曲率を算出しているため、効率的である。また、ノイズに敏感であるという欠点を補うために、実験では下記の前処理とフィルタリングを行っている。

2. 1 前処理

まず前処理として、ノイズの除去を行う。メッシュの各頂点の座標を v_i とし、それに接続する三角形フェースの重心座標を $\{F_{i,j}\}$ とする。ここで、 v'_i を $\{F_{i,j}\}$ の平均ベクトルとし、これを v_i に代入する。また、頂点における単位法線ベクトルは、その頂点に接続する三角形フェースの法線ベクトルの平均とする。

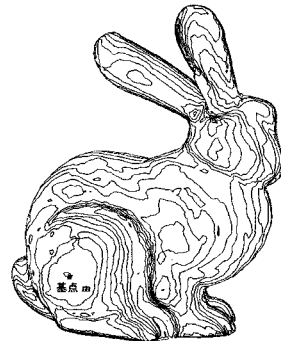


図1 基点法線との角度

2.2 主曲率と主曲率方向の計算

図1はモデル表面上で適当な基点 m をとり、基点と表面上の各点における単位法線ベクトルを基点の法線ベクトル $n(m)$ のなす角度 $\phi_m(x)$ において等測線を表示した図である。

$$\phi_m(x) = \arccos(n(x) \cdot n(m)) \quad [\text{rad}] \quad (1)$$

表面の曲率が急な場所では、等測線の間隔が密になっており、曲率方向はこのスカラー場の勾配の方向とほぼ一致しており、条件が揃えば、 $\phi_m(x)$ の勾配から、主曲率・主曲率方向を求めることができる。ただし、その勾配から、点 x における正しい曲率とその方向ベクトルを得るには、基点 m が、点 x を通り、法線ベクトル $n(x)$ と正しい主曲率方向ベクトル $K(x)$ がなす平面上に近い場所にあることが望ましい。そこで、次の手続き *procedure1* によって、正しい主曲率 $\kappa_1(x)$ 、 $\kappa_2(x)$ を算出する。ただし、 $\kappa_1(x) > \kappa_2(x)$ であり、それぞれに対応する主曲率方向は直交する。

procedure1

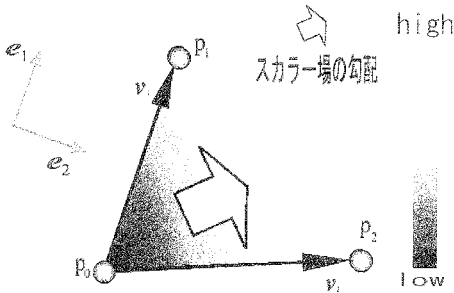


図2 3点のパラメータと勾配方向の関係

各三角形メッシュ上におけるスカラー場 $\phi_m(x)$ は、各頂点において式(1)で定義された値を用いて補間されているので、各フェース内部では線形な場となる。そのため、各フェース上と平行な単位基底ベクトル e_1 、 e_2 を介して、勾配ベクトルを算出する。

図2のように x を三角形フェースの重心、 p_0, p_1, p_2 を1枚の三角形フェースの頂点の座標とする。 v_1, v_2 は p_0 から見た p_1, p_2 の相対位置であり、 e_1 は v_1 の単位ベクトル、 e_2 は e_1 とフェースの単位法線 $n(x)$ との外積ベクトルである。三角形フェースにおいて、 p_0 を原点とする線形なスカラー場 $g_m(v)$ を定義する。

$g_m(v)$ の勾配と $\phi_m(x)$ の勾配方向は同じベクトルとなる。

$$g_m(v_1) = \phi_m(p_1) - \phi_m(p_0) \quad (2)$$

ここで、 $a = \|v_1\|$ 、 $b = v_2 \cdot e_1$ 、 $c = v_2 \cdot e_2$ とする。このとき、 $g_m(v)$ について

$$g_m(e_1) = g_m(v_1) / a,$$

$$g_m(e_2) = g_m(v_2) / c - g_m(v_1) / b \quad (3)$$

が成り立つ。したがって、 $\phi_m(x)$ の勾配ベクトルの場 $K_m(x)$ は次式で現される。

$$K_m(x) = g_m(e_1) \cdot e_1 + g_m(e_2) \cdot e_2 \quad (4)$$

このとき、前述したように $K_m(x)$ は正確な主曲率方向ベクトルであるとはいえない。そのため、それぞれの三角形フェースごとに、 $K_m(x)$ の絶対値が最大になるような基法線ベクトル $n(m)$

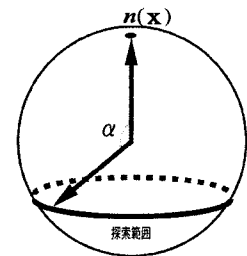


図3 ガウス像と探索範囲

を探索する。ここで、単位法線ベクトルは常にガウス像上にある。そして、探索する範囲は、ガウス像上で三角形フェースの法線ベクトル $n(x)$ と一定の角度 α (われわれの実験では $\alpha = \pi/2$)をなす領域のみでよい。最大となる $K_m(x)$ は、モデル表面上の点 x における主曲率方向 $K(x)$ は、それに垂直な方向 $K^\perp(x)$ となる。さらに次のような条件式を加えること凹凸の判断を行い、2つの主曲率とその方向を決める。

$$\begin{aligned} \text{if } n(m) \cdot K_m(x) > 0 \text{ then } \kappa(x) &= -\|K_m(x)\| \\ \text{else then } \kappa(x) &= \|K_m(x)\| \end{aligned} \quad (5)$$

$\kappa(x)$ が最大・最小にする $n(m)$ をそれぞれ探索し、最大となる $\kappa(x)$ を第1主曲率 $\kappa_1(x)$ 、最小となる $\kappa(x)$ を第2主曲率 $\kappa_2(x)$ とする。また、 $\kappa_1(x)$ に対応する $K_m(x)$ について、その絶対値を1に正規化し、第1主曲率方向 $K(x)$ とする。また、第2主曲率方向 $K^\perp(x)$ は、 $K(x)$ と $n(x)$ の外積から求まる。以上が *procedure1* である。

2.3 フィルタリング

この手法で計算した主曲率および、主曲率

方向はノイズに非常に敏感である。そのため、上記の手法で得られた数値を次のような処理でフィルタリングする。

まず、ある一枚のフェース $F(x)$ の i 番目の近傍 $F(y_i)$ において、処理後の主曲率は、フェース $F(x)$ とその近傍の第1・第2主曲率、それぞれの平均値とする。

次に、主曲率方向ベクトルについてのフィルタリングを行う。 $F(x)$ の近傍 $F(y_i)$ について、 $K'(y_i)$ には $K(y_i)$, $K^\perp(y_i)$, $-K(y_i)$, $-K^\perp(y_i)$ のうち、 $K(x)$ との内積が最大になるものを代入する。このとき $K^\perp(y_i)$ か $-K^\perp(y_i)$ が選ばれた場合、 $\kappa'_1(y_i)$ には第2主曲率 $\kappa_2(y_i)$ を、それ以外の場合は $\kappa_1(y_i)$ を代入する。フィルタリング後の主曲率方向ベクトル $K_{new}(x)$ は、(6)式に示すように、これらに対応する主曲率の絶対値で重み付けした合計ベクトル $K_{sum}(x)$ を正規化して得られる。

$$K_{sum}(x) = \|\kappa_1(x)\| \cdot K(x) + \sum_i \|\kappa'_1(y_i)\| \cdot K'(y_i) \quad (6)$$

$$K_{new}(x) = K_{sum}(x) / \|K_{sum}(x)\|$$

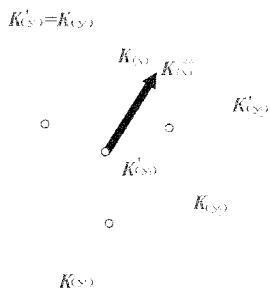


図4 主曲率方向のフィルタリング

図5の(a)は、この手法で算出した第1主曲率の大きさを、(b)は第2主曲率の大きさのマップを表している。(c)図は、本手法で算出した主曲率方向にラインを描いている。また、

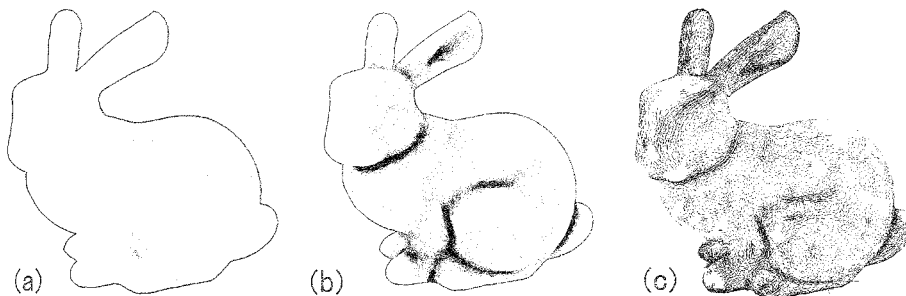


図5 本手法で算出した第1・第2主曲率(a),(b)と主曲率方向(c)

曲面が完全な平面、あるいは球面の場合、最大曲率と最小曲率の差が全くない。このような点は臍点と呼ばれる。臍点では、最大主曲率方向を選ぶことができない。

3. ボロノイ分割によるクラスタリング

本研究では、ボロノイ分割を用いてメッシュのクラスタリングを行う。ボロノイ分割を使用するには、距離の尺度と、各ボロノイ領域に対応する母点を定義する必要がある。メッシュは離散的な座標の集まりなので、表面上の2点間の距離を高速に計測することは難しい。そこで、我々はメッシュ上の距離を、三角形メッシュのグラフ構造に基づいて定義する。

まず、すべてのメッシュ頂点と三角形フェースの重心を節点とし、エッジを形成する2つの頂点の間、互いに隣接するフェースの重心間、三角形フェースの重心とその三角形の各3頂点の間にそれぞれ経路をとり、グラフを作る。ここで、節点 i と j が経路で結ばれているとき、 i と j をつなぐ経路の長さを次式で定義する。

$$Weight(i, j) = w_1 \cdot \|x_i - x_j\| + w_2 \cdot (\|\kappa_{max,i}\| + \|\kappa_{max,j}\|) + w_3 \quad (7)$$

ここで、 $\kappa_{max,i}$ は節点 i の2つの主曲率のうち、絶対値の大きい主曲率である。 w_1 は2点間の距離の重み、 w_2 は曲率に基づく重み、 w_3 は母点からのリンク数に基づく重みとして説明できる。ある節点 a から節点 b までの距離は、式で重み付けされた経路を a から b まで辿った場合の最短経路とする。我々の実験では、最短経路を幅優先探索によって求めている。

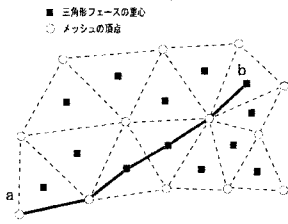


図6 節点 a から b までの最短経路

式(7)で定義される重みは絶対曲率の大きな場所で大きくなり、経路が曲率の大きな稜線などを隔てると、最短経路距離は大きくなる。例えば、bunny オブジェクトの底面に母点を取ったとき、この最短経路による距離は、図7のような等測線を示す。また、ランダムに母点を自動選択したときのボロノイ分割の結果を図8に示す。この手続きは、母点の位置を的確に指定すれば、3D モデル表面上の稜線部分でボロノイ領域境界をもつような、良好な結果を得ることができる。

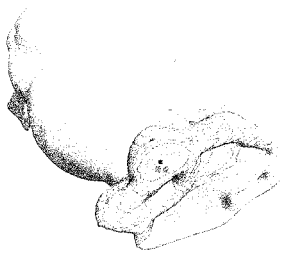


図7 母点からの最短経路距離



図8 ランダムに母点を選択したボロノイ分割

この手法は図9のような幾何学的な形状において効果的である。

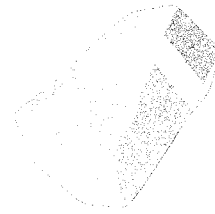


図9 幾何学的形状におけるクラスタリング
ユーザーのマウス入力によって母点を指定。適切な位置であれば、モデルの角が緩やかな場合でも、特徴稜線に隔てられたクラスタリングができる。

4. 今後の展望

本研究の目的は、表面の特徴に基づく非等方メッシュからの等方メッシュ構造の構築である。本報告では、表面特徴を評価するための主曲率、および主曲率方向の算出法、モデル表面のクラスタリング手法について説明した。今後は上記の手法をさらに改良し、さらに2次元の周期的パラメタリゼーションを導入することによって、等方化することを考えている。また、Yosizawa[4]等の手法も応用し、より正確な稜線特徴を検出する予定である。

4. まとめ

(1) 主曲率・主曲率方向の算出について

本報告で提案した手法は、主曲率、主曲率方向の算出方法として、良好な手法である。また、本報告では、各三角形フェースの頂点となる3点を基準に主曲率を算出したが、3点をより広域的に採ることで、ノイズに強い手法になると予想される。

(2) クラスタリングについて

本手法におけるボロノイ分割は、オブジェクト形状の稜線を、ボロノイ境界として検出できることがわかった。本手法は特に図9のような緩やかな稜線の検出に有効な手法である。今後の課題としては、母点の指定に関する自動化がまだ充分ではないことが挙げ

られる。本手法は現段階ではユーザーの手作業にゆだねられる部分が多く、理想的な自動化を行うには、母点の指定に関する考察が必要となる。

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]K.Sagi,T.Ayellet, “Hierarchical Mesh Decomposition using Fuzzy Clustering and Cuts”, Proc SIGGRAPH 2003, 2003
- [3]N.Ray, W.Li, B.Lévy, I-Alice, A.Sheffer, “Periodic Global Parameterization”,ACM Transaction on Graphics, volume 25, Page:1460-1485, 2006
- [4]S.Yoshizawa,A.Belyaev,H-P.Scidel,”Fast and robust detection of crest lines on meshes”, In: SPM’05:Proceedings of the 2005 ACM on Solid and physical modeling. ACM Press, pp. 227-232.
- [5]D.Cohen-Steiner and J-M.Morvan,” Restricted delaunay triangulations and normal cycle”, 2003
- [6]Y-L.Yang, Y-K.Lai, S-M.Hu, H.Pottmann, “Robust Principal Curvatures on MultipleScalse” Eurographics Symposium on Geometric Processing, 2006