

## 単層細胞膜モデルを用いた幾何属性・曲面モデラー

3ZC-6

宮崎 仁† 栗山 繁† 金子 豊久†

豊橋技術科学大学 情報工学系

### 1. はじめに

近年、3次元CADの分野では、幾何学的な拘束条件を「属性値」として与え、その条件を満たす最適な形状を自動生成する機構、いわゆる属性(ビヘイビア)モデリングが注目され始めている。しかしながら、現在市販されているCADシステムの属性モデリングの機能では、変形の方法や範囲をあらかじめ指定する必要があるため、生成される形状が非常に限られたものとなっている。よって、本研究では、形状の変形規則を自動的に構成していくことで、より広範な空間で与えた属性値を満たす形状を探索し生成する形状設計システムを、理論生物学の分野で提案されている形態発生モデルを用いて構築する。

### 2. 単層細胞膜モデルにおける曲面形状の表現<sup>4)</sup>

我々が用いる生物の形態発生モデル<sup>1)2)</sup>は、生物の表皮膜が単層の細胞の集合で構成され、その形状が仮想的な物質である形態因子の濃度  $m_i$  で決定されると考える(以下、このモデルを単層細胞膜モデルと呼ぶ)。各細胞には  $m_i$  の関数で与えられる局所的な厚さ  $T_i$  と、内外の弧長の増減率を表す膜膨張係数  $E_i$  という2つのパラメータがあり、その細胞における曲率は、それらのパラメータを用いた以下の式で求められる。

$$S_i = 2E_i/T_i \\ T_i = B(1 + D \tanh(m_i)), \quad E_i = \tanh(m_i) \quad (1)$$

ただし、 $B$  と  $D$  は各々の膜の厚さの平均値と変動率を設定する定数である。したがって、各細胞における形態因子の濃度によりその個所における曲率が決定され、その値により細胞膜全体の曲面形状が計算される。

また、曲面形状における曲率の値を数学的に定義するには、複数方向に対する曲率の値を考慮する必要があるが、本研究では、各方向の曲率の平均によって定義される平均曲率を用いることにする。

#### 2.1 曲面形状の生成

ここでは、ポリゴン曲面を構成する各頂点が、単層細胞膜モデルにおける細胞を表したものであると考え、各頂点における形態因子の濃度から求めた平均曲率から、曲面形状を計算する手法を説明する。

ポリゴン曲面の形状生成は、次の2つの条件を満たすように補正をすることで行われる。

まず一つ目の条件としては、ある頂点とそれに隣接する頂点の座標値から離散的な計算で求まる平均曲率と、その頂点における形態因子の濃度から求まる平均曲率が一致することである。二つ目としては、正則化規則と呼ばれる拘束条件を満たすことである<sup>3)</sup>。これは、頂点に隣接する頂点を投影して構成される多角形の重心に、その頂点の位置を一致させるというものであり、この条件を加えることにより、生成される曲面形状の一意性を保つことができる<sup>3)4)</sup>。これらの条件を満たすような補正ベクトルを求め、それを加えることで各頂点の位置座標を更新する。この補正ベクトルの大きさがある範囲内で収まったとき、補正のための繰り返し計算を終了し、形状生成が完了する。

#### 2.2 ポリゴン曲面からの形態因子の導出

我々が提案する属性モデリングにおいては、基本となる初期形状から求めた形態因子に対して、属性値から計算される形態因子を加減することにより初期形状を変形させるので、形状から形態因子への逆計算が必要とされる。

式(1)で与えられる平均曲率を求める関数の逆写像を用いて、各頂点における形態因子の値は、その頂点における平均曲率、および定数  $B$ 、 $D$  を引数とする対数関数で表される<sup>4)</sup>。ただし、平均曲率の最大と最小の値に対して、対数関数の引数が正となるように、 $B$  と  $D$  の値を決定する必要がある。

### 3. 単層細胞膜モデルを用いた属性モデリング

単層細胞膜モデルでは、形態因子の濃度というスカラー量の分布を決定することにより曲面形状が決定されるので、形態因子間の演算を導入することによって曲面形状が柔軟に制御できる。したがって、この演算を用いて属性値を満たす形状を計算するといったモデリングシステムの構築が可能となる。

我々が提案する属性モデリングの機構では、曲面上の特定の頂点において目標となる幾何学的な値を属性値として与え、曲面形状がその属性値をどれほど満たしているかを評価し、曲面を修正・変形するために用いる形態因子の濃度分布を自動的に生成する。そこで、与えた属性値と現在の曲面形状から計算される幾何学的な値との差から現在の曲面形状に加減する形態因子の濃度を求める関数を導入する。

#### 3.1 属性値との誤差を用いた形態因子の生成

形状を修正・変形するための形態因子の濃度分布は、修正後の曲面形状の滑らかさを保存するのが望ましい。したがって、その濃度値が滑らかな分布となるように

Behavior Modeling of Free-Form Surfaces Using a Cellular Monolayer Model

Hitoshi Miyazaki, Shigeru Kuriyama and Toyohisa Kaneko

† Toyohashi University of Technology

Tempaku-cho, Toyohashi, Aichi 441-8580, Japan

計算する。

まず、属性値を指定した頂点においては、その頂点における加減する形態因子の濃度を現形状から計算される属性値の誤差に比例する値に固定し、また曲面形状の境界上の頂点においては、境界での形状を保存するために、加減する形態因子の濃度を0に固定する。

その他の頂点における加減する形態因子の濃度  $\bar{m}_i$  は、次の式で表される拡散演算を繰り返すことによって決定する。

$$\bar{m}_i \leftarrow \bar{m}_i + \frac{\lambda}{\sum_{j \in C_i} s_j^{-1}} \sum_{j \in C_i} \left( \frac{\bar{m}_j - \bar{m}_i}{s_j} \right)$$

ただし、 $C_i$  は頂点  $c_i$  に隣接する頂点の集合であり、 $s_j$  は頂点  $c_i$  と隣接する頂点  $c_j$  との距離である。また、 $\lambda$  は、0 から 1 の範囲に設定した拡散定数である。

また、複数の頂点に同じ種類の属性値を設定したり、属性値の種類が複数存在する場合、加減する形態因子の濃度分布は、各属性値について求めた形態因子の濃度分布に重み付けをした和をとることで求める。ただし、重み付けに用いる係数の値は、あらかじめ与えられるものとする。

### 3.2 形態因子の合成規則の最適化

初期形状から求まる形態因子の濃度を  $m_i$ 、属性値との誤差により求まる形態因子の濃度を  $\bar{m}_i$  とすると、膜膨張係数  $E_i$  と厚さ  $T_i$  を求める式 (1) は、以下のように拡張される。

$$E_i \leftarrow \tanh(m_i + \alpha \bar{m}_i)$$

$$T_i \leftarrow B(1 + D \tanh(m_i + \beta \bar{m}_i))$$

ただし、係数  $\alpha$  と  $\beta$  は、膜膨張係数  $E_i$  と厚さ  $T_i$  への濃度  $\bar{m}_i$  の加減の割合を示すものである。

上式により、属性を満たす曲面形状の探索は、係数  $\alpha, \beta$  の最適値を求めることとなり、本研究ではこの係数の最適値を線形探索により求める。

### 3.3 属性値による曲面形状の生成例

平均曲率と法線ベクトルを、属性値として与えた時の曲面形状の生成結果を下図に示す。図1は初期形状であり、図中の線分はその頂点において満たすべき法線ベクトルの向きを、その長さは満たすべき平均曲率の大きさを表している。(ただし、平均曲率の向きは、可視性を重視して逆方向に描画している。) 図2、図3、図4は、属性値を満たす曲面形状を生成した結果であり、それぞれ平均曲率のみを考慮(図2)、法線ベクトルのみを考慮(図3)、平均曲率と法線ベクトルの双方を考慮(図4)したものである。これらの図中の線分は、属性値を与えた頂点における形状生成後の法線ベクトルの向きと平均曲率の大きさを示している。

また、図3、図4に示した実行においては、変形・修正を行うために用いる形態因子の濃度分布を、3.1節で述べた方法で求めたものでは良好な結果が得られなかったため、属性値を与えた頂点の両側で拡散演算における減衰率を変化させている。

今回の実行では、残念ながら法線ベクトルに関して

は、属性値を十分に満たす形状が生成できなかった。しかしながら、形態因子の濃度分布を生成する方法を拡張することで、生成される曲面形状の変形パターンも拡張され、より最適な曲面に近付くことが確認できた。これにより、曲面形状を修正・変形させる形態因子の濃度分布の生成パターンを十分に用意すれば、属性値を満たす曲面形状の生成ができるものと思われる。

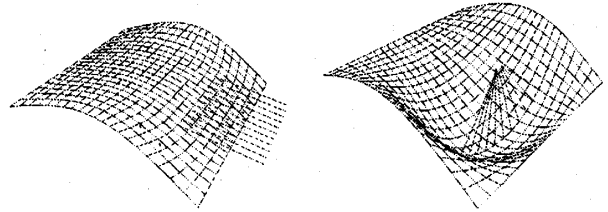


図1 初期形状

図2 平均曲率を考慮した生成結果

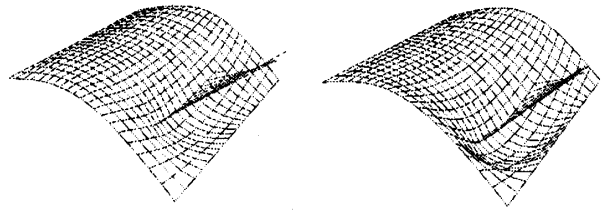


図3 法線ベクトルを考慮した生成結果

図4 双方を考慮した生成結果

## 4. おわりに

本研究では、属性値の指定により曲面形状を設計するシステムを、形態因子に基づく形態発生モデルを応用して構築した。しかしながら、現段階では、誤差から形態因子の濃度分布を生成する機構のパターンの少なから生成される曲面形状が限られたものとなり、その範囲において最適解を探索しているため、属性値を最適に満たす曲面形状は生成されなかった。よって、今後の課題としては、より広域な範囲における曲面形状の検索を可能とするために、濃度分布を自動的に生成する規則の自由度を上げ、多様な変形規則を適応的に構成する機構を導入すること等が挙げられる。

## 参考文献

- 1) F. W. Cummings, "Aspects of Growth and Form", *Physica D* 79, pp. 146-163(1994).
- 2) F. W. Cummings, "Geometrical Concepts in Epithelial Sheets", *J. Theor. Biol.* 179, pp. 41-49(1996).
- 3) H. Y. Shum, M. Hebert, and K. Ikeuchi, "On 3D Shape Synthesis", *Object Representation in Computer Vision 2: ECCV'96 International Workshop*, pp. 131-148(1996).
- 4) 栗山 繁, 金子 豊久, "単層細胞膜モデルを用いた曲面形状の制御", *Visual Computing グラフィックスと CAD 合同シンポジウム'99 予稿集*, p.49-54.