

触覚ディスプレイを用いた細分割曲面の変形方法に関する研究

田村博之<sup>†</sup>, 徳山喜政<sup>†</sup>, 今野晃市<sup>‡</sup>  
 東京工芸大学工学部<sup>†</sup>, 岩手大学工学部<sup>‡</sup>

1. はじめに

さまざまな分野に普及している3次元形状を扱うコンピュータ・グラフィックスには細分割曲面が多く採用されている。<sup>1)2)</sup> 細分割曲面の変形方法に関しては、極限点を求めて移動したあとに初期メッシュを求め極限点フィッティングという方法があるが、極限点の数とそれに対応する初期メッシュの頂点数が同じであることが必要なため、自由度が制限される。また、入力装置に関しては、マウスやペンタブレットなどの2次元座標入力装置を使用して変形を行っているが、その方法では直観性と対話性に欠け、操作になれるまでは非常に扱いにくい。そこで本研究では、極限点フィッティングに代わる頂点の移動による曲面変形方法と、その変形に3次元座標入力装置(ハプティックデバイス「PHANTOM」)を使用する変形システムを提案する。

2. 細分割曲面の変形方法

本研究では、次に示す方法で細分割曲面の変形を行う。

- (1) 初期メッシュの分割
- (2) 分割後の頂点の移動
- (3) 初期メッシュの再構成

2.1 初期メッシュの分割

初期メッシュを次の式(1)、式(2)を用いて細分割を行う。<sup>3)</sup>

$$e_j^{i+1} = \frac{v^i + e_j^i + f_{j+1}^{i+1} + f_j^{i+1}}{4} \quad (1)$$

$$v^{i+1} = \frac{n-2}{n}v^i + \frac{1}{n^2}\sum_j e_j^i + \frac{1}{n^2}\sum_j f_j^{i+1} \quad (2)$$

初期メッシュを複数回分割するかわりに式(3)を用いることによって各頂点の極限点を求めることが出来る。

$$v^* = \frac{n^2 v^1 + 4 \sum_j e_j^1 + \sum_j f_j^1}{n(n+5)} \quad (3)$$

また、初期メッシュの頂点座標と極限点座標との関係は次の行列式で求められる。

$$Ax = b \quad (4)$$

$x$  は初期メッシュの頂点、 $b$  は極限点の座標、 $A$  は式(3)により生成された正方行列である。式(5)を使用し、初期メッシュを求めて極限点フィッティングを行うことが出来る。

$$x = A^{-1} b \quad (5)$$

2.2 頂点の移動

形状を変形する場合には、式(5)により初期メッシュを求めても良いが、動かせるのが極限点だけであり、自由度が制限される。そこで本研究では、極限点の代わりに初期メッシュを一回細分割して生成されたメッシュの頂点を移動する。

2.3 初期メッシュの再構成

初期メッシュの頂点と一回細分割して生成されたメッシュの頂点との関係は次の行列式で求められる。

$$Sx = b_1 \quad (6)$$

$x$  は初期メッシュの頂点、 $b_1$  は一回細分割して生成されたメッシュの頂点、 $S$  は式(1)、式(2)により生成された行列である。

また、初期メッシュの頂点座標は最小二乗法によって求められる。

$$\mathbf{x} = (\mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T \mathbf{b}_1 \quad (7)$$

### 3. 触覚デバイスによる頂点の移動

3次元座標の入力と力覚の提示が可能な触覚デバイスを「PHANTOM」用いて頂点を移動する。

#### 3.1 触覚デバイス「PHANTOM」

PHANTOMは、コンピュータ上の仮想オブジェクト（CGモデル）に触れると、形状や質感などを計算し、それに応じた摩擦力や抵抗などの力をスタイラスを介してユーザー側にフィードバックする。PHANTOMの動作は、「OpenHaptics」というライブラリを使用して制御する。

### 4. 実行例

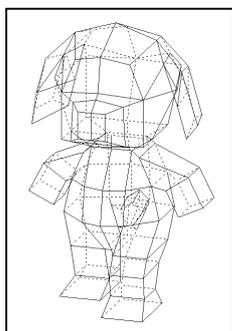


図1 初期メッシュ

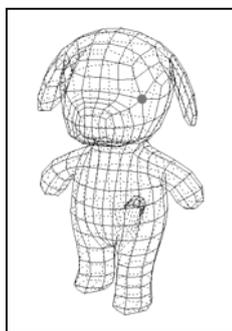


図2 一回分割後

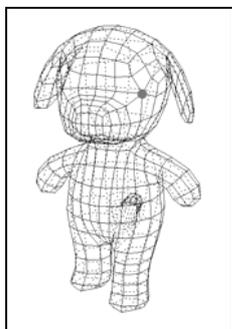


図3

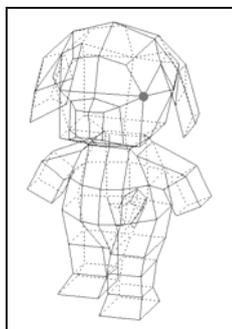


図4

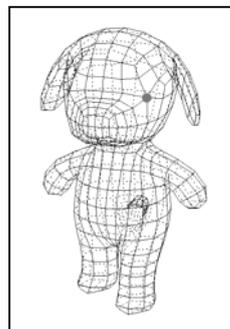


図5

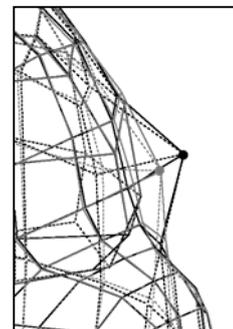


図6

図3は一回分割後のメッシュの頂点を移動した状態で、図4は再構築された初期メッシュである。さらに、図4の初期メッシュを一回分割して得られた形状が図5である。最後に図3と図5の頂点の位置を比較したものが図6である。

### 5. 結果と考察

頂点移動に関して、頂点の移動量がある閾値を超えると、分割後の頂点が初期メッシュより外側にはみ出してしまい、その状態で初期メッシュに細分割をかけた形状と分割後の形状の誤差が広がってしまった。

これを解決するためには、初期メッシュに新しく位相を追加する、または複数回細分割を行った形状に対して本手法を適用する方法が考えられる。

#### 参考文献

- [1] E. Catmull and J. Clark. Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes. *Computer aided Design*, 10(6):350-355, 1978.
- [2] C. T. Loop. Smooth subdivision surfaces based on triangles. Master's thesis Department of Mathematics, University of Utah, August 1987.
- [3] T. Deroose, M. Kass, and T. Truong. "Subdivision Surfaces in Character Animation", *Proceedings of SIGGRAPH 98*, pp.