

## 細分割曲面を用いたリバースエンジニアリングの研究 —不連続部を含むメッシュモデルの細分割曲面表現と実装—

北海道大学大学院工学研究科 ○名知 数馬 金井 理 岸浪 建史

### 要旨

意匠性の高い曲面形状を効率よくモデリングするため、物理モデルから形状モデルを生成するリバースエンジニアリングが用いられている。本研究では、リバースエンジニアリングの形状モデルとして細分割曲面を生成することを目標に置き、そのための前段階として、細分割曲面、特に不連続部を含む Loop 細分割曲面の細分割極限点とその法線ベクトルの算出アルゴリズムについて調査し、実装を行った。

### 1. はじめに

意匠性の高い工業製品の曲面形状を効率よくモデリングする一手法として、物理モデルの測定点群から形状モデルを生成するリバースエンジニアリングが用いられている。本研究では、従来のパラメトリック曲面に比べ、さまざまな利点を持つ細分割曲面を、リバースエンジニアリングの形状モデルとして生成することを目標に置く。本報告では、そのための前段階として、細分割曲面、特に不連続部を含む Loop 細分割曲面の細分割極限点とその法線ベクトルの算出アルゴリズムについて調査し、実装を行った。関連研究に Hoppe の研究[1]があるが、処理時間が膨大であるなどの問題点がある。竹内らの研究[2]では不連続部の処理を行っていない。

### 2. 研究の概要

図1に本研究で提案する細分割曲面を用いたリバースエンジニアリングの全体処理の概要を表す。本報告では、細分割曲面生成部を研究対象としている。

### 3. 細分割曲線・曲面

細分割とは、与えられた初期制御メッシュに対して、繰り返し詳細化とスムージングを行っていき、メッシュを詳細化した極限で滑らかな曲線や曲面を定義する図2のような手法である。

細分割曲面には、従来のパラメトリック曲面にはない以下の特徴がある[3]。

- ① 従来のパラメトリック曲面では、四辺形のパッチを貼り合わせるため、連続性を保つパッチ間の接続接続処理が複雑であったが、細分割曲面は複雑な位相の初期制御メッシュに対して、連続性を保ったまま、単一の曲面をフィッティングすることができる。
- ② 細分割式を一部変更することで曲面内に不連続部をも表現できる。

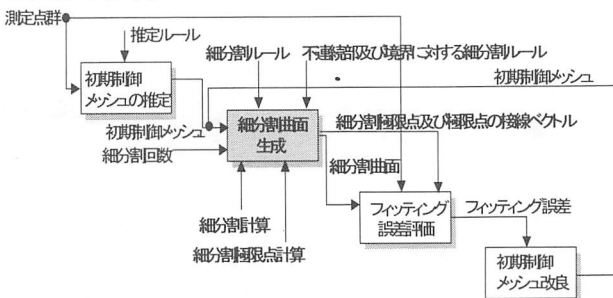


図1 細分割曲面を用いたリバースエンジニアリングの概要

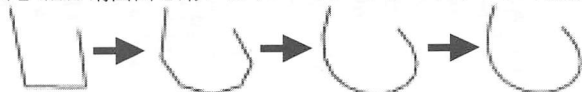


図2 細分割曲線の例

### 4. Loop 細分割曲面

細分割にはさまざまな曲面細分割式がある。それらは、分割するメッシュの位相、分割点の算出方法によって分類される。本研究では、工業製品の特徴線などの不連続部を曲面にフィッティングすることを考慮し、リバースエンジニアリングで生成する細分割曲面として、Loop 細分割曲面を用いる。Loop 細分割は任意の三角形メッシュに対して、各々の三角形を4:1分割にするように頂点を挿入していくと共に、スムージングを行う手法である[4]。

#### 4.1 Loop 細分割式 (連続部)

Loop 細分割式によって細分割を行うと2種類の頂点が発生する。一つは、前の分割段階の頂点  $Q$  と、その隣接頂点群  $P_j$  ( $j=1 \dots n$ ) の重み平均をとることにより生成される Vertex point と呼ばれる頂点  $Q'$ 、他方は、前の段階のエッジ上に新しく生成される Edge point と呼ばれる頂点  $P'_j$  である。これらの頂点を計算する Loop 細分割式は以下ようになる。

- Vertex point  $Q'$

$$Q' = (1-n\beta)Q + \beta \sum_{j=1}^n P_j \quad (1)$$

- Edge point  $P'_j$

$$P'_j = \frac{3}{8}Q + \frac{3}{8}P_j + \frac{1}{8}P_{j-1} + \frac{1}{8}P_{j+1} \quad (j=1,2 \dots n) \quad (2)$$

ここで、 $\beta = \frac{1}{n} \left( \frac{5}{8} - \left( \frac{3}{8} + \frac{1}{4} \cos \frac{2\pi}{n} \right)^2 \right)$ 、 $n$  は頂点  $Q$  の次数である。

Loop 細分割曲面において、頂点の次数が6の場合、その頂点は regular vertex と呼ばれ、分割極限における極限曲面では  $C^2$  連続になる。それ以外の頂点は extraordinary vertex と呼ばれ、極限曲面では  $C^1$  連続になる。細分割で新たに生成される頂点は必ず次数が6になり regular vertex となる。

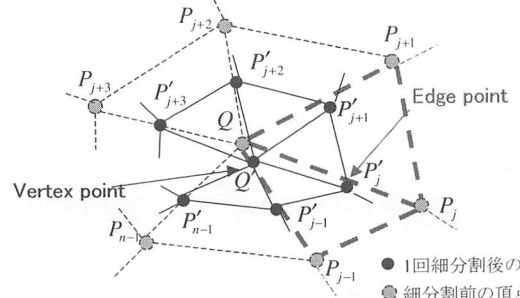


図3 連続部の細分割

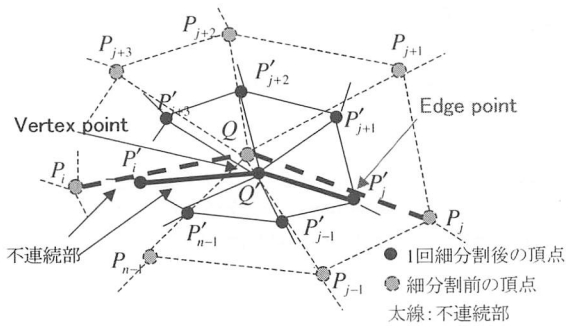


図4 不連続部の細分割

4.2 Loop 細分割式 (不連続部)

曲面上の特徴線などの不連続部には、式(1)、(2)の代わりに、不連続部に対する細分割式(3)、(4)を用いる。図4で示すように、 $P_j, Q, P_i (i \neq j)$  を結ぶ太線で指定された不連続部を持つ細分割式は、不連続部が分割極限で3次 B-スプライン曲線に収束するという条件から以下のようなになる。

・ Vertex point  $Q'$

$$Q' = \frac{3}{4}Q + \frac{1}{8}P_{n-1} + \frac{1}{8}P_j \quad (3)$$

・ Edge point  $P'_j$

$$P'_j = \frac{1}{2}Q + \frac{1}{2}P_i \quad (4)$$

4.3 極限点・極限曲面の法線ベクトル

Loop 細分割式において初期制御メッシュの頂点  $Q$  に対する極限点  $Q^\infty$  は、式(1)、(2)の離散フーリエ変換、逆変換より、以下のように求められる[5]。

$$Q^\infty = (1-n\chi)Q + \chi \sum_{j=1}^n P_j \quad (5)$$

ここで、 $\chi = \frac{8\beta}{3+8n\beta}$  である。

またこの極限点  $Q^\infty$  における極限曲面の法線は、極限点における 2 本の接線ベクトル  $t_1, t_2$  を用いて次のように書ける。

$$n = t_1 \times t_2 \quad (6)$$

ここで、接線ベクトル  $t_1, t_2$  は式(7)で与えられる。ただし、不連続部では定義できない。

$$t_1 = \sum_{j=0}^{n-1} \cos \frac{2\pi j}{n} P_j$$

$$t_2 = \sum_{j=0}^{n-1} \sin \frac{2\pi j}{n} P_j \quad (7)$$

5. 実装結果

不連続部を含まない Loop 細分割曲面、不連続部を含む Loop 細分割局面生成の実装結果を図5 (a),(b)に示す。三角形数、頂点数は(a),(b)で同じである。図5 (a),(b)を比較すると不連続部に指定された稜線において稜線をまたいで、曲線が不連続となり、かつ、稜線は曲線に近づいてゆくのがわかる。

次に、極限点における法線ベクトル計算の実装結果を図6に示す。また、式(5)によって求められる極限点と

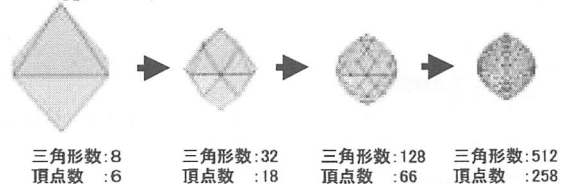
実際に細分割で求められる頂点位置の関係を図7に示す。細分割回数が増えると細分割点が極限点に収束してゆくのわかる。

6. 終わりに

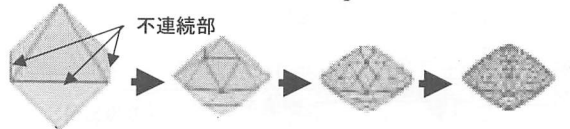
不連続部を含む Loop 細分割曲面において、その細分割式、極限点・法線ベクトルの算出方法を調査し、実装を行った。今後、極限点・法線ベクトルを用いた曲面フィッティング誤差評価、点群からの初期制御メッシュの推定、フィッティング誤差に基づくメッシュ改良のアルゴリズムを開発し、細分割曲面を用いたリバースエンジニアリングを完成させる予定である。

【参考文献】

- [1] Hoppe, H. et al: Piecewise Smooth Surface Reconstruction, proc. of SIGGRAPH'94, pp295-302, (1994)
- [2] 竹内真悟 他: 点群および多面体データに基づく細分割曲面の生成手法, 日本機械学会学論文誌 C 編, 67 巻, 653 号, pp284-289, (2001)
- [3] Zorin, D. Schröder, P.: Subdivision for Modeling and Animation, SIGGRAPH 2000 Course Notes, pp.13~75, (2000)
- [4] Loop, C.: Smooth Subdivision Surfaces Based on Triangles, Master's thesis, University of Utah, Department of Mathematics, (1987)
- [5] Ball, A.A. Storry, D.J.T.: Conditions for tangent plane continuity over recursively generated B-spline surfaces, ACM Transactions on Graphics, Vol. 7 No.2, pp83-102, (1988)



(a) 不連続部を含まない Loop 細分割



(b) 不連続部を含む Loop 細分割  
図5 Loop 細分割の実装結果

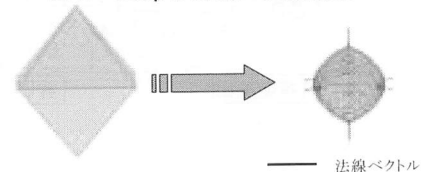


図6 法線ベクトル計算の実装結果

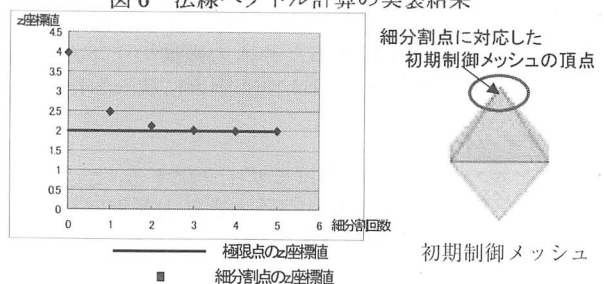


図7 細分割点の座標値の推移と細分割極限点