

---

# 特徴抽出と稜線操作によるポリゴンメッシュの簡単化

Mesh Simplification Using Edge Operation with Feature Detection

早野 勝之\*      松岡 司\*      植田 健治\*

Masayuki HAYANO      Tsukasa MATSUOKA      Kenji UEDA

---

## 要 旨

ポリゴンメッシュの簡単化は、三次元CG(Computer Graphics)において、レンダリング処理の軽減などに用いられる重要な技術である。我々は特に、三次元測定機などから得た点群をもとに生成された三角形メッシュを対象として、メッシュの品質と処理速度の両方の条件をバランス良く満たす簡単化手法を提案する。従来の手法では、適用目的に応じてメッシュの品質と処理速度とのいずれかを優先させているのに対し、本手法では、元形状の特徴の局所的抽出や、基本的な稜線操作によるポリゴンメッシュ数の削減により、品質の保存と計算コストの削減の両立を実現している。

## ABSTRACT

A new method for mesh simplification satisfying both high quality and speed to generate the polygonal meshes from point-set data is proposed, which can reduce the cost for rendering. Most of the existing methods are focused on one of the simplification of mesh quality or processing speed. However, our method keep mesh quality and reduce computation cost by local feature extractions and iterative local edge operations.

---

\* 研究開発本部 ソフトウェア研究所  
Software Research Center,  
Research and Development Group

## 1. 背景と目的

三次元形状データの表現手段として、ポリゴンメッシュによる形状表現が現在主流になっている。三次元形状データの応用域の拡大とともに、より複雑でデータ量の多いメッシュを扱う必要が生じている。特に近年では、直接モデリングしたメッシュのみならず、三次元測定機によって得られる点群データなどから自動的に生成されたメッシュの利用が研究されている。しかし、数万点にものぼる測定点群をもとに生成されたメッシュは、膨大な数のポリゴンによって構成されている場合が多いので、そのままでは表示やデータ転送の効率が悪く、実用的でないという問題がある。

データ量を削減して実用的なサイズのメッシュを得るために、ポリゴンメッシュから冗長な要素を取り除いて簡単化する手法が研究されている。しかし、従来の簡単化手法は、エネルギー最小化計算や非三角形領域の再分割など、計算コストの高い処理が必要であったり<sup>2)4)5)</sup>、逆に、高速処理ができて特徴が失われ易かったり<sup>3)</sup>と、適用目的に応じてメッシュの品質と処理速度のどちらかを優先した手法が多かった。

そこで我々は、点群から生成されたメッシュの簡単化を目的とし、元形状の特徴の保存と処理速度の両方の条件をバランス良く満たすメッシュ簡単化手法を提案する。本手法では、ポリゴンの面のなす角度をもとに、形状特徴を表すポリゴン稜線を特徴稜線として抽出、保存する。点群からのメッシュ生成や均等なポリゴン削減の過程においては、メッシュの大域的な特徴を表すような連続した稜線列は断続的になってしまっていることが多い。そこで、すでに抽出されている特徴稜線列をメッシュの位相変更によって延長し、特徴稜線列を補間する操作を適用する。これにより、エネルギー最小化計算を行わずにより良質な形状特徴の抽出、保存ができる。また、ポリゴン稜線削除の位相操作でポリゴンを削除するため、簡単化の過程で非三角形領域が生成されることがなく、再メッシュ化の計算も不要である。

## 2. 技術

本手法では、点群から生成された初期三角形メッシュに対し、以下の処理を適用して簡単化を行う。

### 1. 特徴稜線の抽出と延長

隣接するポリゴンのなす角度を評価して特徴を表す稜線を抽出する。また、稜線交換操作を適用して特徴稜線列を延長する。

### 2. 特徴頂点の抽出

特徴稜線の接続数および頂点における曲率を評価して、特徴を表す頂点を抽出する。

### 3. 稜線縮退化によるポリゴン削減

特徴頂点を除くすべてのメッシュ頂点を、特徴稜線の端点である頂点群、それ以外の頂点群に分類する。2種類の頂点群からそれぞれ曲率最小の頂点を取り出し、これに接続する稜線のうち、稜線縮退化操作適用前後で最も形状の変化の少ない稜線に対して、稜線縮退化操作を適用する。

### 4. 終了条件

メッシュが設定した条件を満たすまで1.に戻って処理を繰り返す。条件としては、初期メッシュからの誤差距離、もしくは簡単化後のポリゴン数を設定しておく。

以下、それぞれの過程について順に説明する。

#### 2-1 特徴稜線の抽出と延長

着目した稜線の両側の面についての二面角を評価して特徴稜線を抽出する。二面角が指定した角度よりも鋭角である場合、特徴稜線と判定する。

次に、稜線交換操作<sup>2)</sup>によって特徴稜線列を延長する。

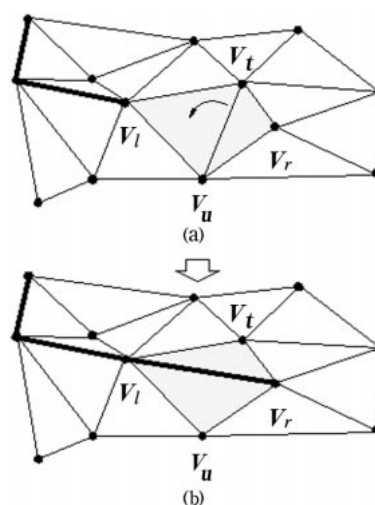


Fig.1 Extension of feature edge by edge swap

Fig.1(a)において、太線の稜線は特徴稜線、 $V_l$ は特徴稜線の途切れる個所にある頂点、稜線 $\{V_t, V_u\}$ は $V_l$ に対向する稜線である。三角形 $\{V_l, V_r, V_t\}$ および $\{V_l, V_u, V_r\}$ について算出した二面角が指定した角度よりも鋭角の場合、稜線 $\{V_t, V_u\}$ に対して稜線交換操作を適用する。稜線交換操作は、Fig.1(a)における稜線 $\{V_t, V_u\}$ を削除し、Fig.1(b)のように稜線をはさむ2つのポリゴンについて向かい合う頂点を端点とする稜線 $\{V_l, V_r\}$ を生成する操作である。稜線交換によって生成された稜線も特徴稜線と判定する。 $V_l$ が属する全ての面について以上の処理を適用する。

## 2-2 特徴頂点の抽出

頂点に接続する特徴稜線数が1か、もしくは3以上の場合、その頂点は形状のコーナー部分であると判断し、特徴頂点と判定する。特徴稜線数が0の頂点については、式(1)~(3)によって近似ガウス曲率を求め、特徴頂点抽出の基準とする。近似ガウス曲率 $K$ は、曲面を近似した多面体の頂点におけるガウス曲率の近似値である<sup>1)</sup>。

$$K = \frac{a}{S} \quad (1)$$

$a$ および $S$ は次のように定義される。また、 $a$ はFig.2のように表すことができる。

$$a = 2\pi - (V \text{ に集まる面の隅の角度の総和}) \quad (2)$$

$$S = \frac{1}{3}(V \text{ に集まる面の面積の総和}) \quad (3)$$

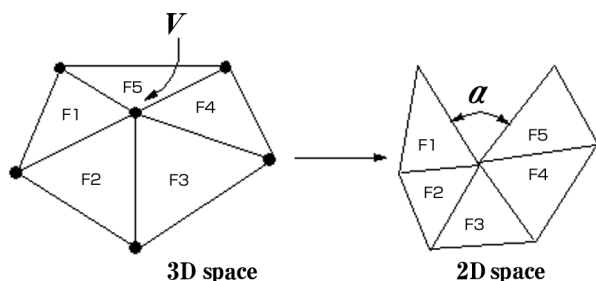


Fig.2 a: Angular defect at V

$K$ の絶対値が大きい頂点において、形状はより尖って（へこんで）いるといえる。 $K$ の絶対値が閾値より大きい場合、特徴頂点と判定する。

## 2-3 稜線操作によるポリゴン削減

特徴頂点以外の頂点について、頂点に接続する稜線に対し、稜線縮退化操作を適用してポリゴン数を削減する。稜線縮退化操作 (edge collapse operation) は、Fig.3のように稜線 $\{V_t, V_u\}$ を端点 $V_u$ に向かって縮退させることにより、1つの頂点と2つのポリゴンを削除する操作である<sup>2)</sup>。

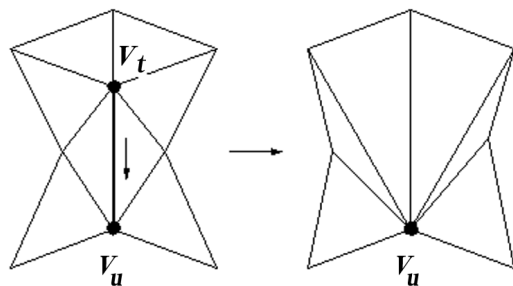


Fig.3 Edge collapse

## 2-3-1 一般稜線の縮退化

特徴稜線以外の一般稜線は、以下の方法で縮退させる。特徴稜線の接続数が0で、かつ特徴頂点でない頂点には、近似ガウス曲率 $K$ が設定されている。頂点における $K$ の絶対値 $K$ が小さいほど、その周辺で形状は滑らかで、周辺のポリゴンを削除しても形状の変化は小さいと考えられる。従って $K$ 最小の頂点に接続する稜線から順に縮退化の対象とする。また、 $K$ 最小の頂点に接続する稜線のうち、縮退化後に生成される面と削除される頂点との誤差距離が最小の稜線を選び、実際に縮退化操作を適用する。初期メッシュからの誤差距離が指定した値より大きくなる場合、縮退化操作は適用しない。これにより、初期メッシュから全体として一定の範囲内におさまるような簡単化ができる。

## 2-3-2 特徴稜線の縮退化

特徴稜線は以下の方法で縮退化させる。特徴稜線の端点で、かつ特徴頂点でない頂点に、特徴稜線上の近似曲率 $M$ を設定する。ここで $M$ は、特徴稜線の接続する方向における曲率の近似値であり、頂点が2本の特徴稜線に共有されている場合にのみ定義される。ある頂点を、2本の特徴稜線 $E_l, E_r$ が共有しているとき、頂点における近似最小曲率 $M$ は式(4)~(6)のように定義される<sup>1)</sup>。

$$M = \frac{b}{L} \quad (4)$$

$$b = \pi - (E_l \text{ と } E_r \text{ のなす角度}) \quad (5)$$

$$L = \frac{1}{2}(E_l \text{ と } E_r \text{ の長さの合計}) \quad (6)$$

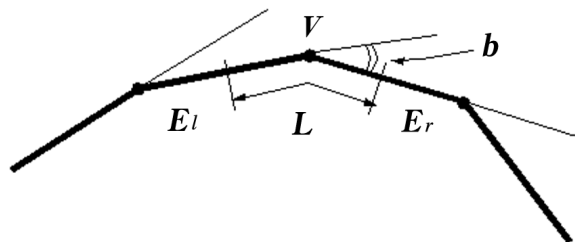
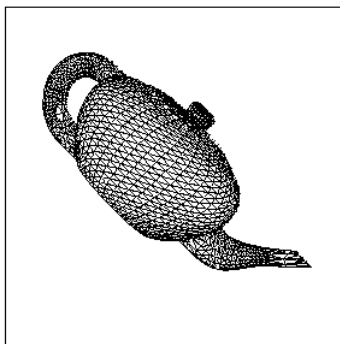


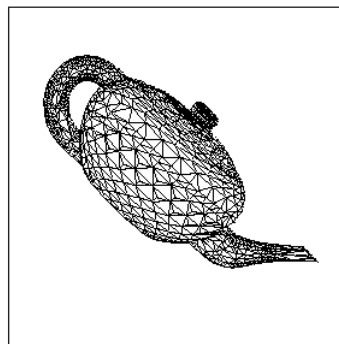
Fig.4 Parameters of curvature for feature edge

$M$ 最小の頂点に接続する2本の特徴稜線のうち、形状変化の少ない方の特徴稜線に対して稜線縮退化を適用し、ポリゴン数を削減する。一般稜線の縮退化と同様に、初期メッシュからの誤差距離が指定した値より大きくなる場合は、縮退化操作を適用しない。以上の操作を $M$ 最小の頂点について繰り返す。

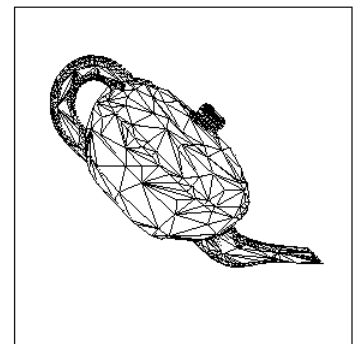
初期メッシュの頂点からの誤差距離、もしくは簡単化後のポリゴン数のいずれかを条件として指定しておく。条件を満たす限り形状特徴の抽出およびポリゴン削減を繰り返す。



(a) Initial Mesh  
(5932 polygons)

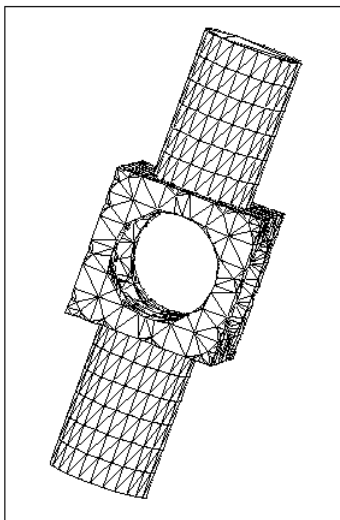


(b)  $t = 6$   
(4218 polygons)

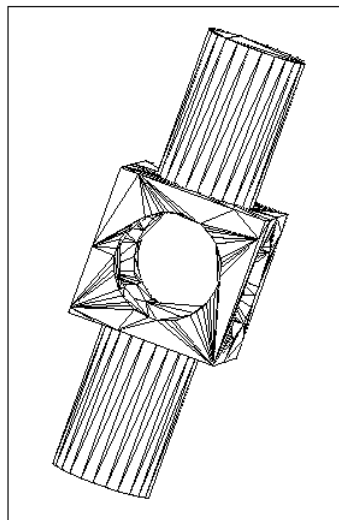


(c)  $t = 20$   
(2904 polygons)

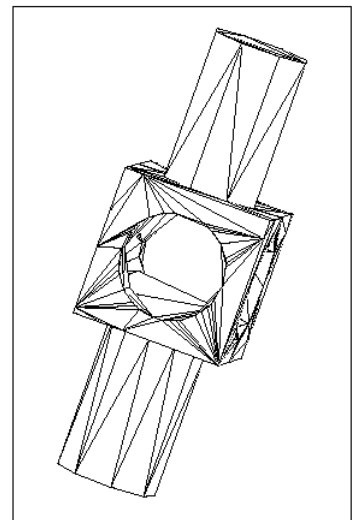
Fig.5 Example : Tolerance control



(a) Initial mesh  
(2028 polygons)



(b)  $K = 0.028$   
(706 polygons)



(c)  $K = 0.666$   
(450 polygons)

Fig.6 Example : Curvature control

### 3. 成果

本手法をPC/AT<sup>注1)</sup>互換機 (Pentium<sup>注2)</sup> II 266MHz, 128MBMemory) 上に実装してメッシュ簡単化を実行した結果を, Fig.5およびFig.6に示す. 各図の(a)は初期メッシュ, (b)と(c)は適用結果である. また, 各図にはメッシュのポリゴン数を示した. 初期メッシュは, CADソフトで作成したモデルを元に生成した.

Fig.5は, 初期メッシュからの誤差距離 $t$ の指定を変化させて適用した例である. (b)は $t$ が小さいため, 比較的滑らかな外周部分のみ簡単化され, 全体として初期メッシュからの形状変化が抑えられている. 一方(c)は $t$ が大きいため, 全体的に簡単化が行なわれていることがわかる.

Fig.6は,  $t$ を固定し, 稜線縮退化の閾値として曲率 $K$ を与えて簡単化した例である. (b)と(c)では, 平面の部分ではほぼ同程度簡単化されているのに対し, 円柱状の部分において簡単化の度合いに違いが表れている. またこの例からは, 特徴稜線の保存と, 特徴稜線方向への稜線縮退化が効果的に行なわれていることが分かる.

次に, メッシュの品質の評価のため, Fig.5のメッシュについて, 形状特徴の抽出や, 曲率による削除順の決定をおこなわず, ランダムに稜線を縮退化させた結果との比較をTable.1に示す. 指定した面数まで簡単化をおこなったメッシュについて, 初期メッシュと簡単化後のメッシュの平均誤差, 処理時間をまとめた. 削減したポリゴン数が同じなら, 平均誤差が小さいほど, メッシュの品質は良いといえる.

Table.1 Evaluation

	平均誤差	処理時間(sec.)
ランダム	0.77	3.96
本手法	0.13	7.04

本手法を用いることにより、もとのメッシュからの誤差の少ないメッシュが、短時間で生成されたことがわかる。

#### 4. 今後の展開

以上、元の形状の特徴をよく保存し、かつ低コストな新しいメッシュ簡単化法を用いて、必要に応じたデータ量のメッシュを生成する手法を提案した。今後は、生成される三角形形状の品質の向上、さらなる高速化、メッシュの詳細度調節機能への拡張などを目指し研究をすすめていく。

#### 謝辞

本研究をおこなうに当り、御協力、御指導をいただきましたソフトウェア研究所第三研究室の皆様に深く感謝致します。

#### 参考文献

- 1) C.R.Calladine: Gaussian curvature and shellstructures, The Mathematics of Surfaces, Oxford University Press, pp.179-196, 1986.
- 2) H.Hoppe et al.: Mesh Optimization, Proc. ACM SIGGRAPH '93, pp.19-26, 1993.
- 3) J.Rossignac and P.Borrel, Multi-resolution 3D approximation for rendering complex scenes, Modeling in Computer Graphics, Springer Verlag, pp.455-466, 1993.
- 4) W.J.Schroeder, J.A.Zarge, W.E.Lorensen: Decimation of triangle meshes, Proc. ACM SIGGRAPH '92, pp.65-70, 1992.
- 5) P.Veron, J.C.Lenon: Static polyhedron simplification using error measurements, Computer-Aided Design, 29, 4, pp.287-298, 1997.

注1) PC/ATはIBM Corporationの登録商標です。

注2) PentiumはIntel Corporationの登録商標です。