特徴稜線部への高精度フィッティングが可能な 細分割曲面リバーースエンジニアリング*

遠藤 維** 伊達宏昭*** 金井 理*** 岸浪建史***

Reverse Engineering of a Subdivision Surface Enabling Accurate Fitting around Feature Edges

Yui ENDO, Hiroaki DATE, Satoshi KANAI and Takeshi KISHINAMI

This paper proposes a new algorithm for fitting a Loop subdivision surface to dense sample points. Our fitting algorithm uses marching cubes and shrink-wrapping to fit the initial control mesh to the points measured from objects. It uses quasi-interpolation to quickly calculate the positions of initial control points from subdivision limit points and uses QEM- and curvature-based mesh simplification to preserve feature boundaries of the minute fillet regions so as to accurately fit to the feature edges. The effectiveness of our fitting algorithm was verified in reverse engineering of broad range of engineering mock-ups such as housings of a handheld wireless communicator, a cellphone, and a turbine blade. The resulting initial control mesh of the subdivision surface that was fit to over 10^6 -point cloud had about several thousand of vertices with approximately 10^{-3} mean normalized fitting error.

Key words: reverse engineering, subdivision surface, surface fitting, quasi-interpolation, level of detail, mesh model

1. 結 言

リバーースエンジニアリング (RE) とは、三次元スキャンあるいは X 線 CT スキャンなどによって物理モデルなどを測定し、得られた測定点群にフィットする曲面モデルを生成する手法であり、スタイルデザインにおいて CAD システムにより直接設計することが困難であるような曲面モデルの生成や、内部構造をもつ解析用モデルの生成に適している。

従来、RE におけるフィッティング曲面モデルとして、ポリゴン曲面近似モデルや四辺形パラメトリック曲面が主として用いられてきた。しかしながら、前者は、面分数が莫大となるため幾何演算が高価であり、また滑らかな曲面を表現することができない。後者は、単一の四辺形曲面パッチのみによる、点群にフィットする滑らかな曲面の生成が困難で、また複数パッチ間を滑らかに接続するための処理が複雑となる。

その解決手法として、細分割曲面を測定点群に対するフィッティング曲面モデルとして利用する研究が提案されてきた。細分割曲面は、任意の接続性をもつメッシュ上に単一の滑らかな曲面を生成できるなど、RE のフィッティング曲面モデルとしての魅力的な特徴が多くある¹⁰⁾。また近年では、細分割曲面のモデリング機能を有する商用 3D モデリングソフトウェアも数多く存在し¹⁸⁾、また機械系 CAD システムにおいても細分割曲面を用いた意匠設計機能をもつものも現れている¹⁹⁾。

細分割曲面の RE 問題とは、細分割極限曲面が測定点群にフィットするような初期制御メッシュを導出する問題と定義できる。非接触測定器の発達により、近年では、多様なソースから得られた大規模かつ複雑な測定データに対する高性能なフィッティング能力を有することが細分割曲面の RE 問題にも要求さ

れている。これらの機能要求は、以下の 4 つであると考えられる。

- (1) **複雑な幾何構造をもつ物体に対する頑健なフィッティング**: スタイルデザインでつくられるデザインモックアップは、ボタン穴や放熱穴といった任意の種数をもつ複雑な幾何形状をもつことが多い。また、X 線 CT スキャンで測定された物体は、多重シェルや冷却管路のような複雑な内部構造をもつことがある。このような場合にも対応する複雑な初期制御メッシュを導出しなければならない。
- (2) **フィッティング誤差の管理**: フィッティング誤差は、生成される細分割曲面の品質を保つために、直接的または間接的に制御されなければならない。
- (3) **莫大な測定点群に対する高速なフィッティング**: フィッティング処理は、数百万点程度の莫大な測定点群に対してもできるだけ短時間で完了することが望ましい。
- (4) **特徴稜線部に対する高精度なフィッティング**: デザインモックアップや工業製品には、「特徴稜線」と呼ばれる、表面の曲率が急激に変化する領域が数多く存在する。これらの領域は、完全にシャープな稜線としてではなく、実際には微小半径のフィレットとして存在している。それゆえ、これらの微小半径のフィレットを認識し、適切な位相と幾何形状をもつ初期制御メッシュを導出して、このようなフィレットとして存在する特徴稜線部を、その細分割曲面の極限曲面において再現する必要がある。

しかし、既存研究において、これら 4 つの機能要求をすべて満たす研究はなく、特に(1)と(4)の機能要求を同時に満たすものは存在していない。

そこで本研究では、特徴稜線部を含む複雑な形状の高密度測定点群に対しても、高精度かつ頑健、高速に適切な Loop 細分割曲面の初期制御メッシュ (ICM: Initial Control Mesh) を生成する RE 手法の提案を目的とする。

* 原稿受付 平成 16 年 12 月 16 日

** 学生会員 北海道大学大学院情報科学研究科 (札幌市北区北 14 西 9)

*** 正 会 員 北海道大学大学院情報科学研究科

2. 関連研究

測定点群から細分割曲面を生成する RE の代表的な研究として Hoppe ら⁵⁾⁶⁾の研究がある。この手法では、エネルギー最小化を用いて、稜線がタグづけされた Loop 細分割曲面を点群から生成し、タグづけされた稜線方向には異なる細分割ルールを適用することで、完全にシャープな特徴稜線を表現できる。鈴木ら¹⁷⁾の研究では、単純な幾何形状で少ない面分数の初期制御メッシュをもとにフィッティングしていく。初期制御メッシュは、誤差エネルギー関数の最小化および制御頂点の挿入を繰り返すことでその幾何・位相構造が改良され、その細分割極限点が測定点群にフィットするように調節される。この手法は高速であるが、正確なフィッティングのためには、マニュアルで初期制御メッシュを定義しなければならない。Joeng ら⁷⁾は、測定点群からの Displaced subdivision surface (DSS) の生成を提案した。DSS は滑らかな細分割曲面にスカラー・ディスプレイメント・マップを重ね合わせることで、モデルの詳細を表現する。この手法では、Shrink-wrapping⁹⁾および、Quadratic error metrics (QEM)に基づく簡略化⁴⁾を用いて測定点群から初期制御メッシュを直接生成することが可能であるが、任意の種数をもつ物体の測定点群に細分割曲面をフィットできない。Razdan ら¹⁵⁾も DSS に対するフィッティングを提案したが、このアルゴリズムは高密度メッシュを入力として用いており、測定点群には対応していない。Kanai ら⁸⁾が提案した手法では、初期制御メッシュは、細分割極限点に対する QEM に基づいた高密度メッシュの簡略化によって生成される。この手法は、安定して高密度メッシュから初期制御メッシュを生成することができるが、測定点群からのフィッティングについては議論されておらず、また微小なフィレット領域を認識した正確なフィッティング能力に問題がある。

以上のような既存研究は、コンピュータ・グラフィックスへの応用を目的とした点群からの細分割曲面の生成手法としては優れた方法であるといえる。しかし、前節に挙げた機能要求、特に(1)や(4)を必ずしも満足しているものではない。

これに対し本論文では、先に述べた 4 つの機能要求をすべて満たし、複雑かつ高密度な測定点群に対して頑健かつ高精度、高速に Loop 細分割曲面¹³⁾をフィットさせるアルゴリズムを提案する。次節に本アルゴリズムの詳細を述べる。

3. フィッティングアルゴリズム

3.1 アルゴリズムの特徴と概要

本論文で提案する細分割曲面 RE アルゴリズムは、先に挙げた 4 つの機能要求を、以下の手法で実現する。

- (1) Marching cubes 法および Shrink-wrapping 手法の改良アルゴリズムを用いて、多くの穴や内部構造を持つ複雑な形状に対しても適切に初期制御メッシュを生成できる。
- (2) 初期制御メッシュの簡略化に Quadratic error metrics (QEM) を用いて、初期制御メッシュの面分数を指定することでフィッティング誤差を間接的に制御できる。
- (3) フィッティング計算の高速化のために、Quasi-interpolation アルゴリズムを用いている。本手法は、数百万の測定点に対して数分で全処理を完了できる。
- (4) 特徴稜線を実際に構成しているフィレット面の境界線となる稜線、簡略化において初期制御メッシュに残すことで、少ない面分数の増加で微小半径のフィレット部の

Fig. 1 Our fitting algorithm

誤差を減らすことができる。なお、以降において、微小な半径のフィレット領域を「特徴領域」、フィレット領域の境界を「特徴境界」と呼ぶ。

図 1 にフィッティングアルゴリズムの概要を IDEF0 により示す。本手法は以下の 4 つのステップから構成される。A1: ボクセルモデルを用いた高密度メッシュの構築, A2: 特徴境界の抽出, A3: 高密度メッシュの簡略化による、特徴境界を保存した初期制御メッシュシードの生成, A4: Quasi-interpolation による初期制御メッシュの幾何改良である。以下、3.2~3.5 節にアルゴリズムの詳細を述べる。

3.2 高密度メッシュの生成

複雑形状の測定点群に対し、高精度に細分割曲面をフィットさせるには、点群が表す形状の位相構造、幾何特徴を良く反映し、かつ少ない頂点数の初期制御メッシュシード（初期制御メッシュ推定形状）を安定に生成することが必要である。本手法では、このシード生成の前処理として、以下の手順によって、まず高密度メッシュを生成する。

3.2.1 Marching Cubes による概略メッシュ生成

入力となる高密度測定点群 U を、間隔 w のボクセル空間内に配置し（図 2(a)）、各ボクセルの U に対する内外判定を行う。ボクセル格子点を中心とする辺長 w の立方体空間に測定点が含まれる場合には格子点属性値に 1 を、それ以外の格子点には

Fig. 2 Mesh approximation by marching cubes

格子点属性値に 0 を割り当てる (図 2(b)). その後さらに格子点を x, y, z 方向に走査して, 属性値 1 の格子点群で囲まれた空間内にある格子点の属性値を 1 に変える (図 2(c)). 各ボクセルの格子点属性値パターンに基づき, Marching cubes 法¹⁴⁾を適用することで, 点群の形状を正しくとらえたボリュームベース・メッシュ M_0 が生成される (図 2(d)).

3.2.2 Shrink-wrapping による高密度メッシュ生成

次に, Shrink-wrapping 法⁹⁾の一部を用いて M_0 から高密度メッシュ M_1 を生成する. 以下の(1)~(4)により, M_1 の各頂点が U 内のある一点と同位置になり, M_1 を U に正確にフィットできる.

- (1) M_0 の各頂点 v における頂点位置 $\mathbf{v}$ を, 式(1)の操作を全頂点に一括して適用することによって緩和する:

$$\mathbf{v} \leftarrow (1-\alpha)\mathbf{v} + \frac{\alpha}{\sum_{v_j \in \text{nbhd}(v)} d_j} \sum_{v_j \in \text{nbhd}(v)} d_j \mathbf{v}_j \quad (1)$$

ここで, $\text{nbhd}(v)$ は v の 1 近傍頂点集合, d_j は v_j の 1 近傍稜線長の平均, $\alpha \in [0, 1]$ はリラクゼーション係数で, 本研究では $\alpha = 0.5$ とした.

- (2) v を測定点群 U にフィッティングする: M_0 における v の平均法線 $\mathbf{n}_v$ (v を頂点にもつ面分法線の平均値) 方向の直線に最も近い点 $u_{\text{near}} \in U$ の位置に v の頂点位置を修正する.
- (3) M_0 の U に対する誤差判定を行う: 本論文では, M_0 の U に対する誤差を, U 内の各点と, その点に最も近い M_0 上の面との距離として定義する. 平均誤差がメッシュ生成トレランス τ_m より小さければ, M_0 を高密度メッシュ M_1 として出力する. そうでなければ, (4)を実行する.
- (4) M_0 を一回 Loop 細分割し, (2)~(3)を繰り返す.

3.3 頂点曲率評価に基づく特徴境界稜線抽出

3.3.1 基本概念

デザインモックアップや工業製品の表面には, 多数の特徴稜線が存在し, これらの稜線は, 実際には微小半径のフィレット領域として実現されている. そこで, このような領域 (特徴領域) の測定点群に対しても細分割曲面が適切にフィットできるように, その初期制御メッシュの位相構造や幾何形状を適切に導出する必要がある.

高密度メッシュ M_1 は, これを初期制御メッシュとして用いるには面分数が多すぎるので, 簡略化によって面分数を減らさなければならない (図 3(a)). 簡略化処理が進むと, 特徴領域上の小さな三角形面分数は減少し, 一箇所の特徴領域は一本の特徴稜線に縮退してしまう (図 3(b)). しかしながら, このような簡略化を用いて生成された初期制御メッシュから得られる細分割極限曲面は, 特徴稜線周辺で過度に平滑化されるため, これらの周辺部での, 点群に対する極限曲面のフィッティング精度が落ちる (図 3(c)). この問題を解決するため, 図 3(d)に示すように, 簡略化の結果において特徴領域の両端に 1 本ずつ特徴境界となる稜線群が残るようにする必要がある. このように特徴境界の対を保存することによって, 特徴領域周辺でのフィッティング精度が向上する (図 3(e)).

この目的のため, 本手法では, 3.3.2~3.4.2 に示すように, まず高密度メッシュ M_1 上の特徴境界を構成する稜線群を, M_1 の頂点における曲率を評価することで抽出し, この曲率に基づいた稜線コラプス操作によって, 特徴境界を保存したまま M_1 を簡略化する. このメッシュ簡略化によって, 適切な特徴境界が稜線群として残された初期制御メッシュシードを得ることができる.

Fig. 3 A comparison of mesh simplification methods

Fig. 4 A feature boundaries extraction algorithm by evaluating a mesh curvature

3.3.2 メッシュの曲率評価による特徴境界の抽出

M_1 の特徴領域では, 主曲率の絶対値の最大が M_1 のその他の領域のそれより大きい. このため, M_1 の各頂点の曲率を評価することにより M_1 の特徴領域を抽出することができる. 本論文では, Alliez ら¹⁾が提案した手法によってこの曲率評価を行う. 式(2)の曲率テンソル $\mathcal{S}(v)$ から, その固有値の絶対値の最大値を M_1 の頂点 v での主曲率の評価値 $\kappa(v)$ とする.

$$\mathcal{S}(v) = \frac{1}{|B|} \sum_{e \in B} \beta(e) |e \cap B| \bar{\mathbf{e}} \bar{\mathbf{e}}^T \quad (2)$$

ここで, B は頂点 v を中心とした半径 r の球内に含まれる面分の集合, $|B|$ は B に含まれる面分面積の総和, $\beta(e)$ は稜線 e を共有する 2 面分の符号付き 2 面角, $|e \cap B|$ は e の B に含まれる部分の稜線長, $\bar{\mathbf{e}}$ は e と同じ方向の単位列ベクトルである. 本研究では, r は M_1 のバウンディングボックスの対角線長の 1/100 程度としている¹⁾. r をこの程度にとることで, 測定ノイズによる狭い区間での鋭い凹凸による好ましくない影響を避けることができる. 主曲率評価値 $\kappa(v)$ を用いて, 以下のステップによって M_1 上の特徴境界の稜線を抽出する.

- (1) M_1 の各頂点 v に対し $\kappa(v)$ を求める (図 4(a)).
- (2) ユーザーが定義した曲率評価トレランス τ_c と $\kappa(v)$ を比較し, v に対し属性値 $\phi(v)$ を式(3)で設定する (図 4(b)).

$$\phi(v) = \begin{cases} 1 & (\kappa(v) > \tau_c) \\ -1 & (\kappa(v) < -\tau_c) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

- (3) v の 1 近傍の頂点がすべて属性値 1 (またはすべて -1) である場合は, $\phi(v) = 0$ に変更する.
- (4) 両端頂点の属性値が共に 1 である稜線の特徴境界とする (図 4(c)).

3.4 初期制御メッシュシードの生成

3.2 節で得られた高密度メッシュ M_1 は面分数が多いため, これ

Fig. 5 A method of an edge collapse to preserve feature boundaries

ない。そこで、 M_1 を簡略化することで、点群の形状を近似し、かつ面分数の少ないメッシュ、初期制御メッシュシード M_2 を生成する。本研究では、QEMを評価し、かつ特徴境界を保存する新しい稜線コラプスアルゴリズムを3.4.2節のように提案する。

3.4.1 QEMに基づく稜線コラプス

Quadric error metrics (QEM) に基づく稜線コラプス (EC) によるメッシュの簡略化は、Garland ら⁴⁾によって提案され、広く用いられている。一回の EC において、頂点 i, j を接続する稜線 (i, j) は、以下のように、 (i, j) に対するコスト $Q_{ij}(k)$ を計算することにより、頂点 k に縮退される。

- (1) 各頂点 i に対し fundamental quadric $Q_i = (A_i, b_i, C_i)$ の要素 A_i, b_i, C_i を計算する。ここで、

$$A_i = \sum_{f \in f^*(i)} \mathbf{n}_f \mathbf{n}_f^T, \quad b_i = - \sum_{f \in f^*(i)} (\mathbf{n}_f^T \mathbf{p}_i) \mathbf{n}_f^T, \quad C_i = \sum_{f \in f^*(i)} (\mathbf{n}_f^T \mathbf{p}_i)^2 \quad (4)$$

$\mathbf{p}_i$ は頂点 i の位置を表す列ベクトル、 $\mathbf{n}_f$ は三角形面分 f の単位法線列ベクトル、 $f^*(i)$ は頂点 i に接続されている面分の集合を表す。

- (2) 各稜線 (i, j) に対し、稜線の縮退 $(i, j) \rightarrow k$ にかかるコスト $Q_{ij}(k)$ を式(5)で計算する。

$$Q_{ij}(k) = \mathbf{p}_k^T (A_i + A_j) \mathbf{p}_k + 2(b_i + b_j) \mathbf{p}_k + (C_i + C_j) \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{p}_k$ は新しい頂点位置で、式(6)で表される。

$$\mathbf{p}_k = -(A_i + A_j)^{-1} (b_i + b_j)^T \quad (6)$$

- (3) コスト $Q_{ij}(k)$ が最も小さい稜線 (i, j) を新しい頂点 k に縮退させ、 $Q_k \leftarrow Q_{ij}(k)$ とする。
- (4) (2)~(3)をユーザが指定した面分数になるまで繰り返す。

3.4.2 特徴境界を保存する EC

前節で述べた QEM に基づく EC による簡略化では、高密度メッシュ M_1 上の特徴境界が保存される保証はない。そこで、これを保存するための、新たな EC のアルゴリズムを提案する。これにより、特徴境界を保存したまま、面分数が減少した初期制御メッシュシード M_2 が生成される。図5に示すように、稜線 (i, j) を頂点 k に縮退させた時の、コストと新しい頂点位置を以下のルールを用いて定めることとする。

- 稜線 (i, j) の2頂点 i, j がともに特徴境界上になく、かつ (i, j) 自身も特徴境界でない場合、稜線の縮退コスト $Q_{ij}(k)$ は式(5)の値とし、新頂点位置は式(6)の値とする(図5(a))。
- 稜線 (i, j) が特徴境界である場合、稜線の縮退コスト $Q_{ij}(k)$ は特徴境界との誤差も含む式(7)のコスト²⁾とする。

$$\begin{aligned} \hat{A}_i &= A_i + \sum_{e \in \hat{e}^*(i)} \begin{pmatrix} 1-d_{ex}^2 & -d_{ex}d_{ey} & -d_{ex}d_{ez} \\ -d_{ex}d_{ey} & 1-d_{ey}^2 & -d_{ey}d_{ez} \\ -d_{ex}d_{ez} & -d_{ey}d_{ez} & 1-d_{ez}^2 \end{pmatrix} \\ \hat{b}_i &= b_i + \sum_{e \in \hat{e}^*(i)} (-\mathbf{p}_i + (d_e^T \mathbf{p}_i) \mathbf{d}_e)^T \\ \hat{C}_i &= C_i + \sum_{e \in \hat{e}^*(i)} (-\mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_i + (d_e^T \mathbf{p}_i)^2) \end{aligned} \quad (7)$$

Fig. 6 Geometric improvement by using quasi-interpolation. $\mathbf{v}_{(2)}$ is a position of $\mathbf{v} \in M_2$, and M_2^∞ is a subdivision limit surface of a mesh M_2 .

ここで $\mathbf{d}_e = (d_{ex}, d_{ey}, d_{ez})^T$ は特徴境界である稜線 e の単位方向ベクトル、 $\hat{e}^*(i)$ は頂点 i に接続されている特徴境界である稜線の集合である。 (A_i, b_i, C_i) の代わりに $(\hat{A}_i, \hat{b}_i, \hat{C}_i)$ を用いて、式(5)からコストを計算し、また式(6)から新頂点位置を求める(図5(b))。

- 稜線 (i, j) が特徴境界ではなく、2頂点 i, j のうちどちらかが特徴境界上にある場合、式(5)によって稜線 (i, j) の縮退コストを計算し、新頂点位置は i, j のうち特徴境界上にある頂点の位置と一致させる(図5(c))。
- 稜線 (i, j) が特徴境界ではなく、2頂点 i, j がともに異なる特徴境界上にあるとき、この稜線は縮退させない。

なお、現在のところ簡略化目標面分数は、特徴境界が失われる程度にユーザの判断により定めている。

3.5 Quasi-interpolation を用いた初期制御メッシュの幾何改良

M_2 を初期制御メッシュとして Loop 細分割を行うと、極限曲面は測定点群を通過しない。そこで、Quasi-interpolation (QI)¹¹⁾を用いて細分割極限点が M_2 の頂点に一致するように M_2 の頂点位置を修正する。QIは、初期制御メッシュ上の頂点及びその1近傍頂点群に対応する細分割極限点位置から、局所的な計算により高速に初期制御メッシュの頂点位置を逆算できる。QIを用いたメッシュ M_2 の各頂点 $\mathbf{v}$ の位置 $\mathbf{v}$ の修正は、式(8)によって定義される(図6)。

$$\mathbf{v} \leftarrow (1-k\gamma)\mathbf{v} + \gamma \sum_{\mathbf{v}_j \in \text{nbhd}(\mathbf{v})} \mathbf{v}_j \quad (8)$$

ここで、 k は $\mathbf{v}$ の値数、 $\gamma = -1/(2k)$ である。

M_2 に対してQIを適用したものを Loop 細分割曲面の初期制御メッシュ M_3 とし、これを最終的な出力とする。これにより、測定点群に対する極限曲面 M_3^∞ の誤差は、3.4節の簡略化によるものが支配的になり、簡略化後の M_2 の面分数を指定することで誤差を間接的に制御することが可能となっている。

4. 結果および考察

図7にIT機器筐体のデザインモックアップから得られた測定点群に対する、本手法による Loop 細分割曲面フィッティング結果を示す。極限曲面において、特徴領域となる微小フィレット面が正しく再現されていることが分かる(図7(g))。図8(a)に本結果の正規化フィッティング誤差(M_3^∞ の U に対する誤差を測定点群のバウンディングボックスの対角線長で正規化したもの)分布、図8(b)に簡略化としてQEMのみに基づくECを用いた場合の正規化フィッティング誤差分布を示す。特徴稜線部に対応する特徴領域周辺でのフィッティング精度が本手法において向上していることが分かる。

図9に、携帯電話のフロントパネルのCADデータの表面をサンプリングして得られた測定点群に対する本フィッティング手法を適用した結果を示す。このモデルには複雑な穴や特徴領域が含まれるが、点群のもつこのような幾何形状を適切に反映した細分割曲面初期制御メッシュが生成でき、その極限曲面が

Fig. 7 Results and our fitting process of a design mock-ups

Fig. 8 A comparison of fitting error distribution maps of resulting subdivision surfaces

正しくフィッティングされていることがわかる。

図 10 にタービンブレードの CT スキャンから得られた測定点群に対する本手法の適用結果を示す。このモデルは、非常に複雑な冷却管路を内部に含んでいるが、得られた細分割曲面は適切にこれを反映している。

表 1 に、測定点群の点数、各制御パラメタ、フィッティングされた細分割曲面の初期制御メッシュの面分数、極限曲面の正規化フィッティング誤差の最大・平均・標準偏差、および処理時間を示す。本アルゴリズムにより、 10^{-3} 程度の正規化誤差を保ちながら、100 分の 1 から 500 分の 1 程度の頂点数の初期制御メッシュによって数分以内にフィッティングが可能である。

5. 結 言

穴や特徴稜線を含む複雑形状の高密度測定点群に対し、メッシュ上の曲率評価に基づいて、微小フィレットとなる特徴稜線部に対しても適切な位相構造をもつ初期制御メッシュを推定し、高精度かつ高速な Loop 細分割曲面へのフィッティングが可能な手法を提案し、その有効性を計算機実験により確認した。

謝 辞

本研究は、文部科学省知的クラスタ創成事業補助金 (IT カロツェリア) により実施されたことを付記する。

参 考 文 献

- Alliez, P. et al.: Anisotropic polygonal remeshing, SIGGRAPH 03 Conference Proceedings, (2003) 485.
- Date, H. et al.: Multiresolution finite element mesh generation, ASME

Fig. 9 Results of a cellphone front panel

Fig. 10 Results of a turbine blade

Table 1 Testing data and fitting errors

	Design Mock-up	Cell-phone Panel	Turbine Blade
#Sample Points U	1065050	538688	3531036
#Faces of ICM M_3	5000	10000	10000
#Vertices of ICM M_3	2512	4952	4990
Max Normalized Error	8.3×10^{-3}	10.6×10^{-3}	56.0×10^{-3}
Mean Normalized Error	0.4×10^{-3}	1.0×10^{-3}	4.0×10^{-3}
Voxel Dividing Resolution w	0.1	0.4	0.06
Mesh Generation Tolerance τ_m	0.2×10^{-3}	0.2×10^{-3}	0.2×10^{-3}
Curvature Tolerance τ_c	0.064	0.0074	0.086
Error Standard Deviation	0.8×10^{-3}	1.0×10^{-3}	7.6×10^{-3}
Processing Time	4min	3min	4min

Windows PC Xeon 3GHz, 2GB RAM

- DETC 04 Proceedings, DETC2004-57663(CD-ROM) (2004).
- DeRose, T. et al.: Subdivision surfaces in character animation, SIGGRAPH 98 Conference Proceedings, (1998) 85.
- Garland, M. et al.: Surface simplification using quadric error metrics, SIGGRAPH 92 Conference Proceedings, (1992) 209.
- Hoppe, H. et al.: Surface reconstruction from unorganized points, SIGGRAPH 92 Conference Proceedings, (1992) 71.
- Hoppe, H. et al.: Piecewise smooth surface reconstruction, SIGGRAPH 94 Conference Proceedings, (1994) 295.
- Joeng, W. et al.: Direct reconstruction of displaced subdivision surface from unorganized points, Pacific Graphics 01 Conference Proceedings, (2001) 160.
- Kanai, T.: MeshToSS: Converting subdivision surfaces from dense meshes, 6th International Fall Workshop on Vision, Modeling and Visualization 01 proceedings, (2001) 325.
- Kobbelt, L. P. et al.: A shrink wrapping approach to remeshing polygonal surfaces, EUROGRAPHICS 99 Proceedings, (1999) 119.
- Lee, A. et al.: Displaced subdivision surfaces. SIGGRAPH 00 Conference Proceedings, (2000) 85.
- Levin, A. et al.: Polynomial generation and quasi-interpolation in stationary non-uniform subdivision, CAGD 03 proceedings, 20, 1 (2003) 41.
- Litke, N. et al.: Trimming for subdivision surfaces, CAGD 01 Proceedings, 18, 5 (2001) 463.
- Loop, C.: Smooth subdivision surfaces based on triangles, Master Thesis, University of Utah, Department of Mathematics (1987).
- Lorensen, W. E. et al.: Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm, Computer Graphics, 21, 4 (1987) 163.
- Razdan, A. et al.: Reverse engineering using a subdivision surface scheme, 3D Modelling 03 Proceedings (2003).
- Schröder, P.: Subdivision for modeling and animation, Course notes of SIGGRAPH 98 (1998).
- 竹内真悟, 鈴木宏正ほか: 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, 日本機械学会論文誌 C 編, 67, 653 (2001) 284.
- 例えば, MAYA, <http://www.alias.co.jp>
- CATIA version 5, <http://www-306.ibm.com/software/applications/plm/catiav5/prods/ima/>