

## 広域的法線評価と改良 Watershed 法に基づく特徴稜線抽出手法 ～フィレット部の抽出とソリッドモデル生成への応用～

北海道大学 ○溝口 知広, 伊達 宏昭, 金井 理, 岸浪 建史

### 要 旨

本研究では、メッシュモデルの効率的な利用を目的とした、広域的法線評価と改良 Watershed 法に基づく特徴稜線抽出手法を提案する。本手法では、従来の手法では抽出しにくかった、フィレット部の境界を特徴稜線として抽出できる。さらに、抽出した特徴稜線を3次元CADシステムへ読み込み、ソリッドモデル生成を支援するシステムについても報告する。

### 1 はじめに

現在、製品開発期間短縮のために、製品の意匠設計段階で、クレイモデル等のモックアップを作成し、この測定データをもとにソリッドモデルを生成するリバースエンジニアリング技術の効率化が望まれている。このためには、測定点群、または、これより得られたメッシュモデルからの適切な特徴稜線の抽出が必要となる。そこで本研究では、このソリッドモデル生成を支援するための、メッシュモデルからの特徴稜線抽出手法を提案する。本手法は、メッシュの分割方法やノイズに影響を受けにくく特徴稜線を抽出できる、また、従来の特徴稜線抽出手法では困難であった、工業製品に多く含まれるフィレット面の境界を特徴稜線として抽出できるといった特徴を持つ。

### 2 提案手法の概要と特徴

測定点群から生成されたメッシュモデルに基づくソリッドモデル生成を前提とすると、特徴稜線抽出手法に関する要求として、抽出される特徴稜線がループをなし、これに囲まれた1つの領域を認識できること、またメッシュの分割方法や測定ノイズに抽出結果が影響を受けにくいことが望ましい。

特徴稜線抽出手法は、一般的に大きく2つのステップからなる<sup>[1][2]</sup>：まず、メッシュモデルの頂点や稜線の特徴量を算出し、次に、算出した特徴量をもとに稜線や頂点をグルーピングする。特徴量算出を局所的に行う手法では、メッシュの分割方法や測定ノイズに、抽出される特徴稜線が影響を受け易い。稜線をグルーピングし特徴稜線を抽出する手法<sup>[1]</sup>では、抽出される特徴稜線がループをなさず、複雑な後処理が必要となる。一方、頂点のグルーピングに基づいて領域分けを行う手法<sup>[2]</sup>では、領域の境界線をループをなす特徴稜線と認識できるが、隣接領域間に隙間が出来るといった問題がある。さらに1通りのパラメータ設定では要求するすべての特徴稜線の抽出が困難であるといった問題がある。

そこで、本研究ではこれらの問題を解決する手法を提案する。本手法は図1に示すように大きく2つのステップからなる：

1. ユークリッド距離に基づき定めた領域内での広域的な法線評価により、稜線や頂点の特徴量を算出する。これにより、メッシュの分割方法やノイズに影響を受けにくい特徴稜線が抽出される。
2. 1で算出した特徴量に基づいて、頂点をグルーピング可能な Watershed 法<sup>[2]</sup>を拡張した手法を用いて面分集合からなる領域分けを行い、この領域境界を特徴稜線とする。これにより、抽出される特徴稜線がループをなす。

さらに、これら2つのステップを、異なる抽出パラメータ

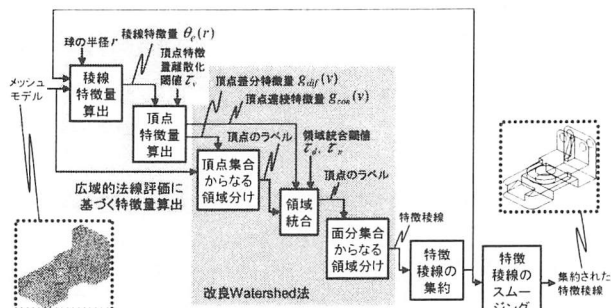


図1：アルゴリズムの概要

設定で数回繰り返し実行し、各パラメータ設定で抽出される特徴稜線を対話的に集約することで、ユーザーが求める特徴稜線のみを抽出できる。また、抽出した特徴稜線に対しては、ソリッドモデル生成を考慮して、スムージングを行う。本手法は、従来の特徴稜線抽出手法では抽出が困難であった、工業製品に多く含まれるフィレット面の境界を特徴稜線として抽出できるといった特徴を持つ。

### 3 広域的な法線評価に基づく特徴量算出

本研究で提案する特徴量算出手法では、稜線  $e$  の中点を中心とする半径  $r$  の球  $B$  に含まれる三角形の集合を評価することで、ノイズやメッシュの切り方の影響を受けにくく、稜線や頂点の特徴量を算出できる。

まず、球  $B$  と、 $B$  に含まれる三角形の面法線ベクトルの和  $\mathbf{n}$  と稜線  $e$  とで定義される平面を用いて、2つの半球  $B_R, B_L$  を定義する(図2)。次に  $B_R, B_L$  内の面面積で重み付けした面法線ベクトルの和  $\mathbf{n}_{B_R}, \mathbf{n}_{B_L}$  を計算する。最後に  $\mathbf{n}_{B_R}, \mathbf{n}_{B_L}$  のなす角度を式(1)で算出し、これを稜線  $e$  の特徴量  $\theta_c(r)$  とする。

$$\theta_c(r) = \cos^{-1} \left( \frac{\mathbf{n}_{B_R} \cdot \mathbf{n}_{B_L}}{\|\mathbf{n}_{B_R}\| \|\mathbf{n}_{B_L}\|} \right) \quad (1)$$

また、頂点  $v$  に接続する稜線集合  $e^*(v)$  内の稜線の特徴量のうち、最も大きな特徴量を式(2)で示す、 $v$  の連続特徴量

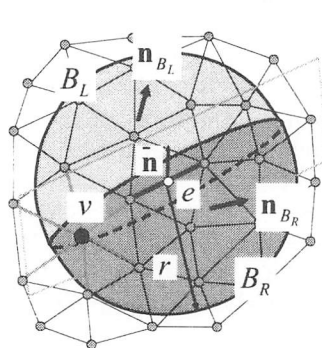


図2：稜線特徴量算出

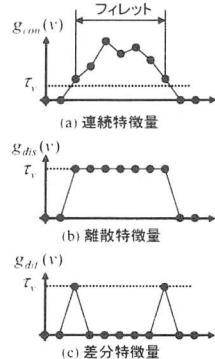


図3：頂点特徴量算出

$g_{con}(v)$ とする.

$$g_{con}(v) = \max_{e \in e^*(v)} \theta_e(r) \quad (2)$$

この連続特徴量では、図3(a)のように本来1つの領域として認識したいフィレット部分の頂点特徴量にばらつきが生じ、これをもとに次章で述べる Watershed 法を適用すると、フィレット部が中央で2つの領域に分割されてしまう。そこで、閾値  $\tau_r$  を用いて 0 または  $\tau_r$  に離散化した特徴量を  $g_{dis}(v)$  とし、これによりフィレット部の頂点の特徴量を一定値にする(図3(b)). さらに、この離散特徴量では Watershed 法の性質上、抽出したいフィレット部はそれに滑らかに接続する部分と同じ領域と認識されてしまう。これを解決するため、近傍頂点との特徴量の差分を式(3)で計算し(図3(c)), これを差分特徴量  $g_{dif}(v)$  とする.

$$g_{dif}(v) = \begin{cases} g_{dis}(v) - \min_{v' \in v^*} g_{dis}(v') & \text{if } (g_{dis}(v) \geq \min_{v' \in v^*} g_{dis}(v')) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

ここで  $v^*$  は  $v$  の隣接頂点集合である.

#### 4 改良 Watershed 法

Watershed 法は、水が低い所へ流れ落ちるように、特徴量の大きい頂点から小さい頂点へと辿り、その過程で辿った頂点に共通のラベルをつけ、頂点をグルーピングする手法である<sup>[2]</sup>. 従来の Watershed 法は頂点のみにラベル付けするため、3つの頂点ラベルが一致せず、どの領域にも属さない三角形面からなる隙間領域が生じ、隣接領域の境界線が一致しないといった問題があった。そこで本研究では、Watershed 法をベースにした、面分へのラベル付けに基づいて隙間のない領域分けを行える手法を提案する.

Watershed 法では、まず式(3)で算出した差分特徴量をもとに、各頂点に領域ラベルを割り当て、同じラベルを持つ頂点集合からなる領域分けを行う。次に、頂点ラベルの割り当て状況に従って、各三角形に対して1つずつ領域ラベルを割り当てる。3つの頂点が共通のラベルを持つ三角形面分にはその共通ラベルを、3つの頂点ラベルが一致しない三角形面分には、3つの頂点のうち最も低い差分特徴量を持つ頂点のラベルを割り当てる。最後に、同一ラベルを持つ三角形集合を一つの領域とし、その境界線の特徴稜線として抽出する.

#### 5 ソリッドモデル生成のための準備

##### 5.1 領域統合による不要な特徴稜線の除去

Watershed 法では、頂点集合からなる領域分けを行った際に、少ない数の頂点集合からなる小さな領域が得意。これらの領域の境界線として後に抽出される特徴稜線は、入力メッシュの形状特徴を表しておらず、CAD システムに読み込み、ソリッドデータを生成する際に不要な稜線である。そのため、小さな領域は隣接領域に統合し、除去する必要がある。そこでまず、Watershed 深さと呼ばれる、領域内の最も低い連続特徴量を持つ頂点と、その領域の境界とその領域に隣接する領域の境界の頂点のうちの最も低い連続特徴量を持つ頂点  $v_{hou}$  との連続特徴量の差分を計算する。領域内の頂点数が閾値  $\tau_n$  より少なく、かつ、Watershed 深さが閾値  $\tau_d$  より小さい領域を、 $v_{hou}$  に隣接する領域と統合する。この処理を、上の条件を満たす領域がなくなるまで繰り返し、小さな領域を除去する.

##### 5.2 特徴稜線の集約

提案手法を1通りの抽出パラメータ  $\{r, \tau_r, \tau_d, \tau_n\}$  の設定で一度実行しただけでは、要求する特徴稜線のすべてを抽出することは困難である。そこで、以上の手法を異なるパラメータ設定で繰り返し実行し、各パラメータ設定で抽出される特徴稜線のうちのユーザーの要求する稜線をディ

スプレイ上で対話的に選択し、これらを集約する機能を実現し、この問題を解決している.

#### 5.3 特徴稜線のスムージング

本手法により抽出される特徴稜線は、メッシュの稜線上を通過するので、稜線の構造に応じた凹凸が含まれる。そこで、抽出された特徴稜線上の頂点に対して、ラプラシアンスムージング<sup>[3]</sup>を適用する。ただし、3つ以上の特徴稜線が接続しているコーナー頂点は除く.

#### 6 実験結果と評価

図4, 図5にCADモデルをFEMメッシュで分割したモデルに本手法を適用した結果を示す。図4より、従来の手法では抽出が難しかったフィレット部の境界が抽出できること、また隙間領域ができないことが分かる。図5より、異なるパラメータ設定で抽出される特徴稜線が集約できることが分かる。処理時間は、図5のモデルに対する一度の処理で、約4秒であった。また本手法で抽出した特徴稜線を3次元CADシステムで読み込んだ結果を図6に示す.

#### 7 結論

本研究では、メッシュモデルの機能面単位の処理を目的とした、広域的な法線評価と Watershed 法に基づく特徴稜線抽出手法を提案し、実験によりその有効性を確認した。今後の課題としては、抽出した特徴稜線の精度評価がある.

##### 参考文献

- [1] 渡辺大地, 千代倉弘明: 任意三角形メッシュからの特徴稜線抽出, 電子情報通信学会論文誌 J83.5, pp.1344-1352, 2000
- [2] A.P.Mangan, R.T.Whitaker: Partitioning 3D Surface Meshes Using Watershed Segmentation, IEEE TRANS. VISUALIZATION AND COMPUTER GRAPHICS, 5.4, pp.308-321, 1999
- [3] Jun Mitani, Hiromasa Suzuki: Making Papercraft Toys from meshes using Strip-based Approximate Unfolding, SIGGRAPH2004, 2004

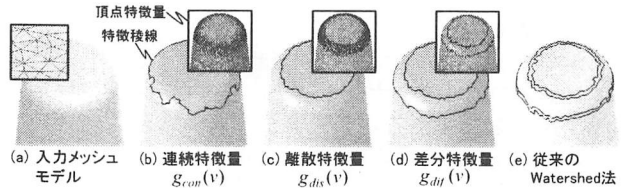


図4: フィレットの頂点特徴量とその境界の特徴稜線

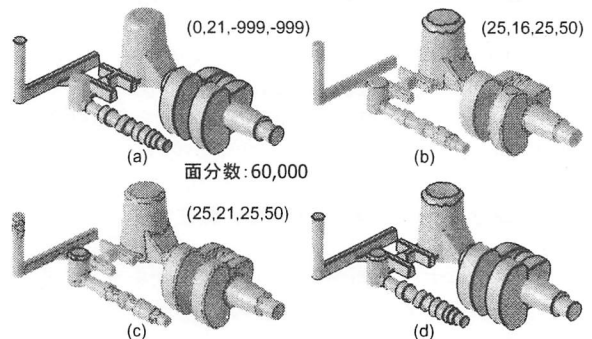


図5: 特徴稜線の集約。(a)-(c)異なるパラメータ設定で抽出された稜線のユーザーが選択した稜線。(d)集約された特徴稜線。(図中の数値は左から抽出パラメータ  $r, \tau_r, \tau_d, \tau_n$ )

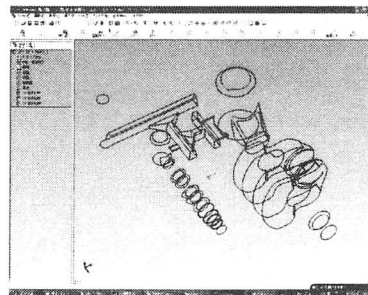


図6: 3次元CADシステムへの読み込んだ特徴稜線