

意匠測定データに対する高品質セグメンテーション (第5報)

— 形態学的な領域分割と領域競合による境界生成 —

日本ユニシス株式会社 土江 庄一, 豊田工業大学 東 正毅

High-quality segmentation of scanned data for industrial design object
— Morphological region splitting and boundary generation using region competition framework —

Nihon Unisys, Ltd. Shoichi TSUCHIE, Toyota Technological Institute Masatake HIGASHI

In mesh segmentation for industrial design objects, each segment defined by a region with closed boundary should correspond to its underlying surface constructed according to the designer's intention. In order to generate those segments from the scanned data, we propose a method in which (i) more suitable regions are extracted by the region splitting/merging processing with a new splitting scheme from the obtained clusters, (ii) smooth and consistent boundaries are generated as intersection or contacting curves between the adjacent underlying surfaces. We demonstrate the effectiveness of our method by applying it to the scanned data of the real-world industrial design objects.

1. 緒言

意匠データに対するリバースエンジニアリングでは、最終製品である現物の測定データから、構成面の違いを検出して曲面モデルを逆に読み解き、個々の基準面に対応するように測定データを分割して、該モデルを生成しなければならない。既報では、曲率変化に基づいてメッシュ頂点のクラスタリングを行い、同一ラベルを持つ連結メッシュを1つのセグメント領域とし、セグメント境界は2曲面の交線および接触対応線として計算する方法を提案した。本報では、実データへの適用という観点から、より適切な領域の抽出法と滑らかな境界の生成法について論じる。

1.1 既存の課題

より適切な領域を抽出するためには、Fig. 1 に示すような G^2 接続で繋がった領域の分割も求められる。しかし、曲率の変化に基づいた手法では該領域の分割は困難で、新たな手法が必要となる (課題 1)。Fig. 1 は意匠レリーフが途中で消滅し、その先の領域が G^2 接続している場合である。 G^2 接続の例としては特殊なケースだが、意匠データではよく見られる。

前報では、隣接する2曲面の断面線の交点および接触対応点 (Fig. 2) を繋いで G^0 および G^1/G^2 境界線を生成したが、閾値の設定や曲面の品質に左右されるという課題がある (課題 2)。



Fig. 1 既報の課題：丸印の G^2 接続部では領域分割ができない¹⁾

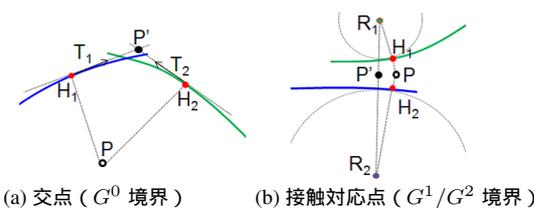


Fig. 2 セグメント境界の作成

1.2 本研究の貢献

より適切な領域を抽出するために、曲面フィッティングの誤差評価に基づく領域の分割・併手法の他に、形態学的領域分割 (morphological region splitting) 法を新たに提案する。形態学的処理のメッシュへの適用例としては、特徴線抽出 (skeletonizing)²⁾

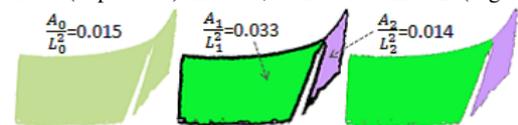
や領域成長法のシード生成³⁾があるが、我々は領域分割に適用し、上記の課題 1) を解決する。

また、課題 2) への対応として、画像処理のセグメンテーションで提案されている領域競合 (region competition) 法⁴⁾をセグメント領域の境界計算に応用する。得られる境界線は隣接領域に対する基準曲面と整合性をもち、 G^0 および G^1/G^2 境界の区別を要せずに計算することができる。

2. 提案手法

2.1 形態学的領域分割

領域 R_0 が与えられたとき (Fig. 3 (a)), 縮小操作 (contraction) により分割領域 $\{R_i\}$ ($i=1, 2, \dots$) を生成する (Fig. 3 (b)). ただし、以下の基準を満たす場合とする。次に、各分割領域に対して拡張操作 (expansion) を行い、新しい領域とする (Fig. 3 (c)).



(a) Base-region (b) Contraction (c) Expansion

Fig. 3 Morphological region splitting.

Criteria: (i) $|R_0| > T_{min}$, (ii) $\frac{|R_1|}{|R_0|} > \epsilon_1$, (iii) $\frac{A_1}{L_1^2} \geq \frac{A_0}{L_0^2}$.

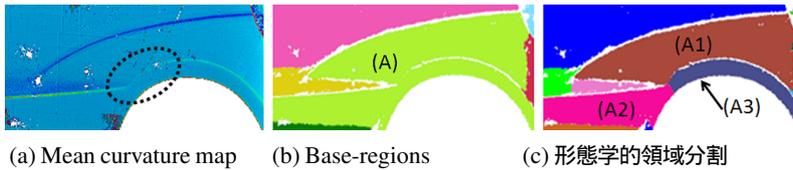
Small region Narrow region

ここで、 $\{R_i\}$ は各領域を構成するメッシュの頂点数 $|R_i|$ で降順にソートされているとし、 A, L は領域の面積と周長で、 T_{min} , ϵ_1 は閾値である。基準 (i), (ii) は小領域の発生を、(iii) は R_0 よりも細長い領域 ($\frac{A}{L^2} \ll 1$) の発生をそれぞれ抑止することを意味する。(2次元の場合、 $\frac{4\pi A}{L^2} \leq 1$ は等周不等式と呼ばれる。)

上記により、特徴線まわりの G^2 接続領域に対する形態学的領域分割 (morphological region splitting) が行われる。

2.2 境界の計算

画像処理における領域競合法⁴⁾のアイデアを用いた境界の計算方法を示す。領域競合法では、平滑化に伴う境界点 v の移動 (Fig. 4(a)) が、隣接領域 R_i, R_j からの力 f_i, f_j で制御される (Fig. 4(b))。ここで、領域からの力とは、領域毎に定義された特徴量 (画像の輝度 I など) からの乖離を抑止するものである。



(a) Mean curvature map (b) Base-regions (c) 形態学的領域分割
Fig. 6 形態学的領域分割 (Morphological region splitting) の結果

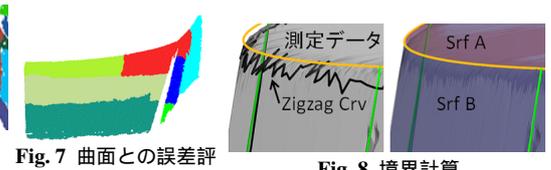


Fig. 7 曲面との誤差評価による領域分割

Fig. 8 境界計算

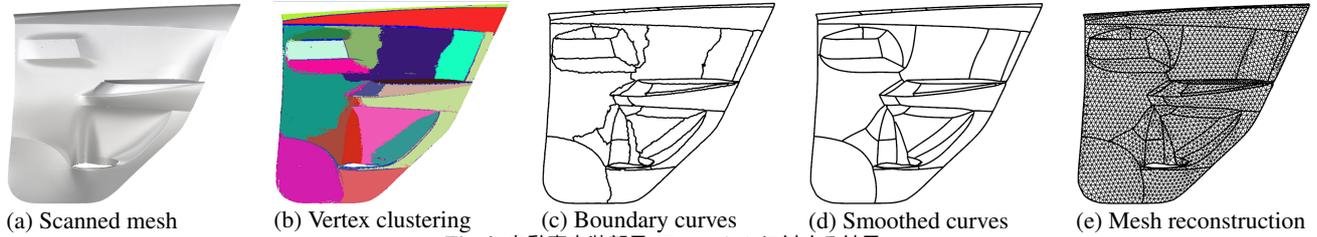


Fig. 9 自動車内装部品 (Door trim) に対する結果

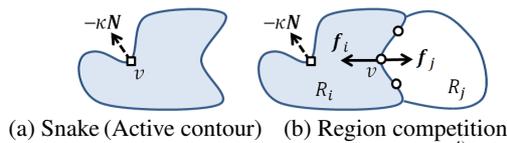


Fig. 4 領域競合 (Region competition) 法⁴⁾

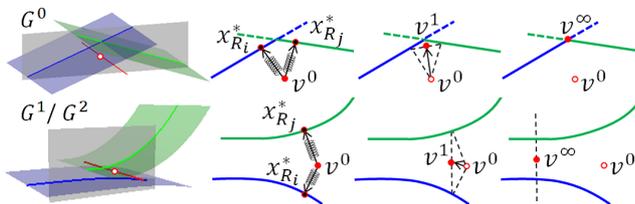


Fig. 5 境界線のタイプ: G^0 (上段) と G^1/G^2 (下段)

このとき、ピクセル座標系 (u, v) 上の領域 R_i と R_j の境界点 v の移動は、次の発展方程式で表される⁴⁾:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{v}(u, v; t) = \underbrace{-\kappa_{v(i)} \mathbf{N}_{v(i)}}_{\text{Smoothing}} + \underbrace{\log P(I_v | \alpha_i) \mathbf{N}_{v(i)} + \log P(I_v | \alpha_j) \mathbf{N}_{v(j)}}_{\text{Region competition}} \quad (1)$$

ここで、 $\kappa_{v(i)}$ と $\mathbf{N}_{v(i)}$ は領域 R_i 側を基準とする境界線の曲率と法線ベクトルで (Fig. 4), $P(I_v | \alpha_i)$ はパラメタ α_i が与えられたときの領域 R_i の境界点 v における I の確率分布関数である。 $f_i \equiv \log P(I_v | \alpha_i) \mathbf{N}_{v(i)}$ は *statistics force* と呼ばれ、 $\log P \leq 0$ なので、常に領域を圧縮する向きに働く (Fig. 4 (b))。

Eq. (1) をセグメントの境界計算に応用して、滑らかな境界線の生成式を導く。本報では、真の境界点 \mathbf{x}^* は基準曲面上に存在するとして、境界点 v の真値 \mathbf{x}^* からの乖離がばねの力 $\mathbf{f} = -k(\mathbf{v} - \mathbf{x}^*)$ で該曲面に引き戻され (Fig. 5), これを上記の *statistics force* とする。このとき、Eq. (1) の *region competition* 項は次式となる:

$$-k_{R_i}(\mathbf{v} - \mathbf{x}_{R_i}^*) - k_{R_j}(\mathbf{v} - \mathbf{x}_{R_j}^*).$$

ここで、 k_{R_i} は領域 R_i に対するばね定数である。したがって、境界計算式は次式で与えられる:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{v}(x, y, z; t) = -\kappa_v \mathbf{N}_v + k_{R_i}(\mathbf{x}_{R_i}^* - \mathbf{v}) + k_{R_j}(\mathbf{x}_{R_j}^* - \mathbf{v}). \quad (2)$$

収束条件は、境界上の任意の点 \mathbf{v}^t が $\|\mathbf{v}^{(t+1)} - \mathbf{v}^{(t)}\| \leq \epsilon_2$ を満足した場合とする。ここで、 $\epsilon_2 \ll 1$, t はステップ数である。

点 $\mathbf{x}_{R_i}^*$ は v の近くに存在すると仮定し、本報では v から領域 R_i の基準曲面への最近点とする。また、 $k_{R_i} = k_{R_j} = 0.5$ とす

る。このとき、点 v は、Eq. (2) の右辺第 1 項の平滑化処理と共に、2 曲面間の最短距離を与える点あるいは中点に向かって移動する。Fig. 5 は G^0 と G^1/G^2 境界における収束過程を示す。

3. 実験結果

形態学的領域分割の結果を Fig. 3 と Fig. 6 に示す。Fig. 6 (a) の平均曲率カラーマップから、ホイールアーチの特徴線が破線内部で消滅していることが分かる。曲率の変化に基づく方法¹⁾では、該領域に当たる Fig. 6 (b) の領域 A は一繋がりの領域になっているが、形態学的領域分割により、Fig. 6 (c) の領域 A1 ~ A3 に分割されている。Fig. 7 は Fig. 3 (a) に対して提案手法を用いず、曲面との誤差評価による通常の領域分割を行った結果である。提案手法による結果 Fig. 3 (c) と較べると、不適切な結果となっている。

境界計算の結果を Fig. 8 と Fig. 9 に示す。Fig. 8 では、小 R 部が 2 曲面の交線 (相貫線) として滑らかな G^0 境界線で表されている。また、Fig. 9 (d) では、 G^1/G^2 接続の領域においても滑らかな境界線が得られている。

4. 結言

本報では、形態学的領域分割法により、意匠レリーフや特徴線まわりの G^2 接続領域の分割ができ、より適切な領域抽出が可能となることを示した。また、領域競合法のアイデアに基づく境界計算法により、基準曲面と整合性のとれた滑らかな境界線が得られることを示した。

得られた境界線と各領域の基準曲面から領域データを再構築することで (前報)、測定データに対して高品質なメッシュによる曲面モデルが構築できる (Fig. 9 (e))。しかし、曲面式で同モデルを表現するためには、 G^1/G^2 境界における Fig. 5 のギャップを解消し、厳密に接続しなければならず、今後の課題である。

参考文献

- 1) S.Tsuchie, T.Hosino and M.Higashi: High-quality vertex clustering for surface mesh segmentation using Student-t mixture model, *Computer-Aided Design* **46**, 69-78, 2014
- 2) C.Rössl, L.Kobbelt, H.-P.Seidel: Extraction of feature lines on triangulated surfaces using morphological operators, In: *Smart Graphics, Proceedings of the 2000 AAAI Symposium*, 71-75, 2000
- 3) M.Vieira and K.Shimada: Surface mesh segmentation and smooth surface extraction through region growing, *Computer Aided Geometric Design* **22**(8), 771-792, 2005.
- 4) S.C.Zhu and A.Yuille: Region competition: Unifying snakes, region growing, and bayes/mdl for multiband image segmentation, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* **18**(9), 884-900, 1996.