

メッシュ変形操作に基づく 設計検討のためのラフモデルの生成法

正 増田 宏 (東大) 学 吉岡康博 (東大)
正 古川 慈之 (産総研)

Creation of Rough Models based on Mesh Modification for Early Design Phases

Hiroshi MASUDA, The University of Tokyo, 1-7-3 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo
Yasuhiro YOSHIOKA, Yoshiyuki FURUKAWA

Since product design is frequently changed in the early stage of design, the creation of its rough models is useful for communication among the design team. In this paper, we propose modeling operations based on a volume-based cut-and-paste method for generating rough 3D models. Cut-and-paste editing extracts a characteristic feature from a source model and copies it to a target model. To realize such a cut-and-paste technique, this paper introduces a new method that consists of mesh segmentation and surface/volume fitting. In our method, a feature region and its surrounding area are separated from the user-specified area, and they are used for generating a parametric volume that involves the feature region. In feature pasting, parametric volumes are deformed and pasted to the target model, and then, features inside the volume are adaptively deformed and pasted to the target. The experimental result shows our operations can effectively generate new models by removing, pasting, and deforming partial shapes in existing models.

Key Words: 3D model, CAD, Mesh Segmentation, Cut-and-Paste, Deformation, Volume Fitting

1. はじめに

製品開発においては、初期の段階で製品の企画や仕様が決められ、次に、それらを実現するための製品コンセプトとその製品構成が検討される⁽¹⁾。この際、自動車や船舶のような比較的成熟した製品では、過去の設計を流用してラフな製品モデルを作成することが多い。この段階では詳細な形状は決まっていないため、ラフな製品モデルは、過去の製品群から似た形状や性能を持った部品モデルを選び出し、それらを組み合わせで作成する。

ラフモデルは、重量やコスト、開発期間などの大まかな推定に用いられ、また、製品コンセプトがある程度絞り込まれた段階では、その下流の詳細設計、生産準備、保守などを担当するメンバによってレビューされ、後工程で発生しうる問題点の洗い出しや改善のために利用される。

設計初期では設計変更の自由度が大きいと、これらの検討結果を反映して設計が見直され、製品開発のライフサイクルに関わる様々な要因を初期の設計案に織り込んでいく。これらの過程はフロントローディングと呼ばれ、製品開発における利益、信頼性、性能、製造性、保守性などに影響を与える重要なプロセスである。

現状では、ラフモデルの表現法として、簡単なスケッチや断面図などの2次元モデル、もしくは、過去の3D CADモデルを流用することが多いようである。

現在では、部品の多くが3D CADを用いて設計されていること、また、3Dモデルの利用は製品コンセプトを正確かつ直感的に伝えるために非常に有効であることを考えれば⁽²⁾、ラフモデルの表現でも3Dモデルの利用が増大していくと考えられる。特に近年では、様々な検討を前倒して行う試みが注目されており、情報共有しやすい3D表現の重要性が増している。さらに、3Dスキャニングにより実在の製品を取り込んで3Dモデルを作成することも容易になり、3D情報が作成しやすい環境も整いつつある。

本研究では、設計初期における検討を支援する目的で、ラフモデルの生成に適した3Dモデル生成法について考える。設計初期では、設計検討のために、情報伝達や大まかな検討のためのラフなモデルが作成できればよく、高精度の表現は必ずしも必要とされない。

ラフな3Dモデルの生成方法として二つのアプローチが考えられる。

ひとつは、フィーチャベースのテンプレートモデルを作成し、設計のバリエーションを自動生成する方法である。ただし、この方法を用いるには、暗黙知を形式知化

することが必要となるため、モデリングが難しく、また可能であっても業務プロセスを解析して定式化された手続きを抽出するには非常に時間がかかるという問題がある。業務分析をしなくても、パラメトリックモデリングのフレームワークを用いて過去のモデルを編集することも可能であるが、現実には、パラメータの定義の仕方は設計者によって様々であるため、パラメトリックモデルの再利用は容易ではない。

もうひとつの方法は、より直感的な方法で、3Dモデルの変形したい箇所を直接変形する方法である。この方法では、そのモデルが作られた履歴に関係なく、変形したい箇所を直接指定して製品のバリエーションを作成する。特定のCADに依存させないことも可能なので、複数のCADを利用していたり、複数のベンダを活用した製品開発をしている場合には、有利である。その場合、形状表現としては、メッシュ表現もしくは専用の軽量曲面表現が用いられることが多く、いくつかの商用のシステムも開発されている。ここでは、正確さは必ずしも要求されないため、メッシュを用いることを考える。すなわち、本研究においては、既存の類似形状モデルをメッシュモデルに変換し、メッシュ変形操作によって製品のバリエーションを作成する方法について考えていく。

メッシュモデリングは、CGのコミュニティで盛んに研究され、近年、大きく進歩した。メッシュモデルはそもそも近似表現であるため、CADモデルよりも自由度が大きく扱いが容易という特徴がある。

メッシュ変形の代表的な操作としては、デフォーメーションとカット&ペースト操作⁽³⁾⁻⁽⁶⁾がある。デフォーメーションは、位相変形を伴わない変形で、 R^3 から R^3 への写像 I を定義して、頂点座標を変換する方法である。一方、カット&ペースト操作は位相変形を伴う操作である。カット操作とは面上の凹凸を滑らかな曲面で置き換えてフィーチャを除去する操作、ペースト操作とは別のフィーチャを付加する操作を指す。

本研究では、これらの変形手法に関して、メッシュセグメンテーションとボリュームペースティングを用いて統一的に扱う方法を提案する。

2. 手法の概要

本手法は、対象領域の選択、Bスプライン曲面とボリュームのフィッティング、カット操作とペースト操作によって構成される。

メッシュモデルでは、操作の対象となる領域の指定がCADモデルほど容易ではない。なぜならば、メッシュモデルでは、CADモデルと異なり、faceやパッチ、フィーチャといった比較的大まかな分割がモデル中に存在しない

ためである。CADモデルにおいては、製品の構造をある程度反映した位相構造を持つため、操作の対象領域の指定は比較的容易であった。しかし、メッシュモデルでは、形状変形の自由度は大きいものの、製品構造を反映した位相情報を保持していないため、その抽出を支援するための処理が必要である。そこで、我々は、そのためのセグメンテーション法を導入することとする。

Fig. 1に処理の流れを示す。まず、ユーザがマウス等を用いて、大まかに特徴領域を指定すると、セグメンテーションアルゴリズムによって、特徴領域と周辺領域の境界を抽出する。この仕組みを用いることによって、メッシュモデルの欠点であった領域指定の困難さを補うこととする。

次に、周辺領域に対して、Bスプライン曲面当てはめを行い、ベース曲面を生成する。特徴領域は、ベース曲面上に定義されているものとする。

カット操作では、分離された特徴領域をベース曲面で置き換えることで実現される。

また、特徴領域を別のモデル上に転写するペースト操作においては、パラメトリックボリュームに基づくデフォーメーション法を導入する。まず、ベース曲面を底面

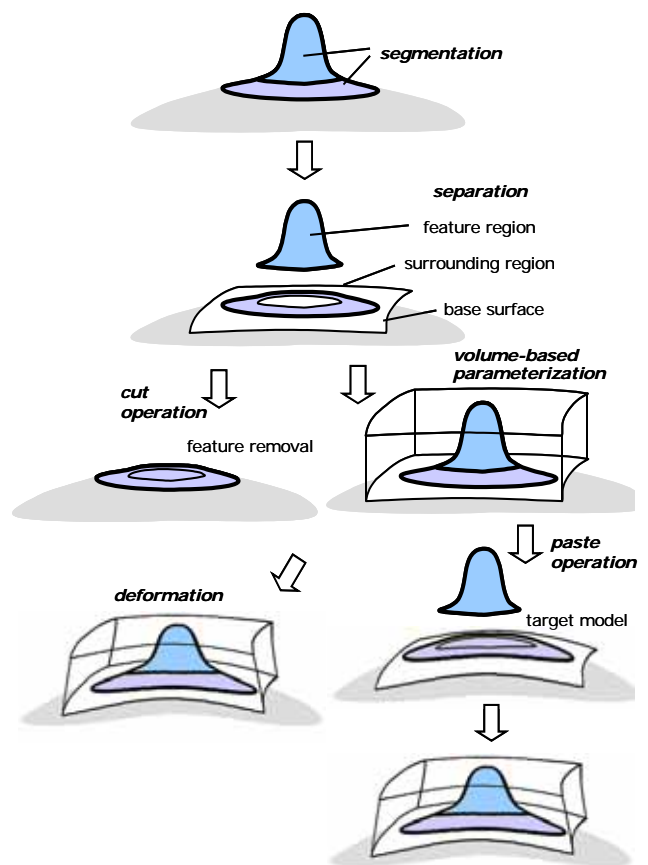


Fig.1. A process of modeling operations.

とするBスプラインボリュームを生成する．Bスプラインボリューム $V(u,v,w)$ は、 \mathbb{R}^3 から \mathbb{R}^3 への写像であるので、特徴領域の形状は、このボリュームの制御格子の制御によって変形させることができる．また、ボリューム内の形状をパラメータ空間で正規化することで、別のモデルや同一モデル内の別の位置に貼り付けを行うことができる．

ボリュームの変形を自動化するために、貼り付けの際には、最適化計算によって、ボリュームの底面が貼り付け領域に一致し、かつ全体が滑らかに変化するような、制約付の最適化計算を施す．得られたボリュームに合わせて、特徴領域の変換写像 $V(u,v,w)$ が変化するので、貼り付け先のモデルに自然な形で特徴領域を転写することができる．

3. セグメンテーション

メッシュモデリングの場合には、パッチや face といった明示的な分割を持たないので、特徴領域の抽出に工夫が必要である．そこで、ユーザが特徴領域の境界付近をラフに指定することによって、インタラクティブに特徴抽出を行うことを考える．

その実現法としては、面の接続関係を調べ、面間角度が相対的に大きいエッジを探索して分割領域を決定する方法が考えられるが、局所探索では平坦な部分での境界の同定が難しい．また、ノイズのために正しく境界が設定できない、ジグザグな境界がでやすい、という問題が生じる．特に、リバースエンジニアリングによって作成された場合にはこの問題が顕著である．

そこで、我々は、局所的な探索手法は取らず、全体の最適化によって分割領域を決める方法を採用する．そのための手法がいくつか提案されているが⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾、本研究に適した手法として、Kats らの提案した方法⁽⁹⁾を用いることとした．

この方法では、Fig.2 のように、面をノード、エッジをアークとするメッシュの双対グラフを作成する．この図では、元のメッシュを破線、その双対グラフを実線で示している．次に、各アーク (i, j) に対して、面間の角度に応じた流量 $C(i, j)$ を後で示すように設定する．

その上で、図のように、ソース S とシンク T を設定し、ソースからシンクに至る流量が最大になるような流れを設定する．このとき、ノードを二つの集合 V と $\sim V$ に分割し、 V と $\sim V$ にまたがるアークの集合を $E(V)$ とする．このとき、 E の流量の総和が最小となるような分割を最大流最小カットと呼ぶ．このエッジを領域の境界とするものとする．

アークの流量は以下の式で決める．ここで θ_j は隣り合う三角形と j のなす角度を示す． η は定数で、凸領域では 0.1、凹領域では 1.0 とする．

$$d(i, j) = \eta(1 - \cos \alpha_{i,j}),$$

$$C(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{d(i, j)} & (i, j \neq s, t) \\ 1 + \frac{d(i, j)}{\text{average}(d(\mathbf{E}))} & (i, j = s, t) \\ \infty & (i, j = s, t) \end{cases}$$

この方法では、かならず二つの領域に分割されるので、本研究の目的に合致する．また、我々が評価した結果では、ノイズを含んだモデルでも安定した解が算出でき、平坦な部分でも境界として検出できるので、ラフな指定から正確な境界の抽出を必要とする本研究の目的に適していると考えられる．

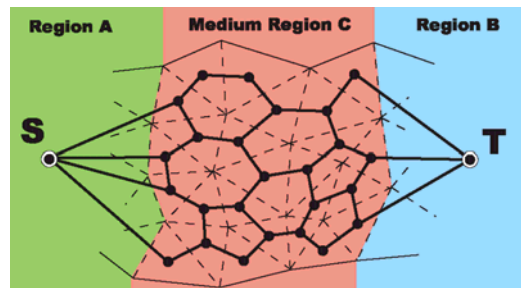


Fig.2. Mesh Segmentation.

4. 曲面・ボリュームフィッティング

ユーザが選択したラフな領域から、上記の手法によって、特徴領域と周辺領域の境界が算出される．ここでは、周辺部分の頂点群 $\{Q_t\}$ ($t=0, \dots, s-1$) を用いて曲面当てはめを行い、ベース曲面 $S(u, v)$ を生成する．この問題は、下記の最適化問題として解くことができる． η は定数である．

$$\sum_{t=0}^{s-1} \|Q_t - S(u_t, v_t)\|^2 + \beta \iint (|S_{uu}|^2 + 2|S_{uv}|^2 + |S_{vv}|^2) dudv \rightarrow \min$$

この定式化では、各頂点のパラメータ (u_t, v_t) を与える必要があるが、この推定は一般には難しい問題である．そこで、我々は、Weiss らの提案した B-spline 曲面の制御点計算とパラメータ修正を交互に行う方法を用いる⁽¹⁰⁾．この方法では、まず初期パラメータを用いてラフな曲面当てはめを行い、次に、次式を用いてパラメータ修正を行う．すなわち、各頂点にもっと近い面上の点を計算し、その点のパラメータ (u, v) を新たなパラメータとして用いる．

$$\begin{cases} \mathbf{S}_u^T \cdot (\mathbf{S}(\hat{u}_t, \hat{v}_t) - \mathbf{Q}_t) = 0 \\ \mathbf{S}_v^T \cdot (\mathbf{S}(\hat{u}_t, \hat{v}_t) - \mathbf{Q}_t) = 0 \end{cases}$$

得られたパラメータを用いて、再度、曲面当てはめを行う。この処理を繰り返して、当てはめ精度を向上させる。しかし、曲率の高い部分に対しては、そもそも自由度が不足しているため、十分な精度での当てはめはできない。そこで、そのような箇所では自動的にノット挿入を行い、自由度を適応的に向上させることで対応する。

次に、我々は、Weiss らの手法をボリュームに拡張し、算出されたベース曲面を等パラメータ面とするB-spline ボリューム $V(u,v,w)$ を算出する。この場合においても、元の特徴領域とのずれができるだけ小さくなり、かつ、滑らかなようなボリュームを最適化処理によって算出する。この方法の利点は、Fig.3 に示すように、曲率が大きい個所に特徴領域のペーストを行った場合でも、形状の折れ曲がりに対してはペナルティが科されるため、自己干渉を生じない滑らかな写像 V が生成できることである。

初期ボリュームは、抽出したフィーチャが内部に含まれるように決める。ベース曲面が $V(u,v,0)$ と一致し、かつ交差が起こらない最適化として、以下の式を用いて最適化計算を行う。

$$\sum_{i=0}^{v-1} |Q_i - S(u_i, v_i, w_i)|^2 + \beta \iiint (|V_{uu}|^2 + |V_{vv}|^2 + |V_{ww}|^2 + 2|V_{uv}|^2 + 2|V_{vw}|^2 + 2|V_{uw}|^2) dudvdw \rightarrow \min$$

この場合においても、頂点のパラメータを推定する必要はあるが、曲面の場合と同様に、最初はパラメータを仮決めしておき、以下の式を用いてパラメータ修正を行う。

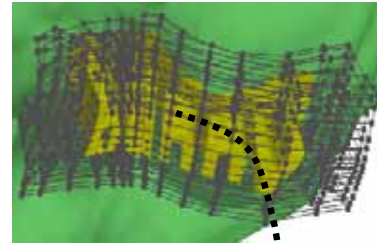
$$\begin{cases} \mathbf{V}_u^T \cdot (\mathbf{V}(\hat{u}_i, \hat{v}_i, \hat{w}_i) - \mathbf{Q}_i) = 0 \\ \mathbf{V}_v^T \cdot (\mathbf{V}(\hat{u}_i, \hat{v}_i, \hat{w}_i) - \mathbf{Q}_i) = 0 \\ \mathbf{V}_w^T \cdot (\mathbf{V}(\hat{u}_i, \hat{v}_i, \hat{w}_i) - \mathbf{Q}_i) = 0 \end{cases}$$

次に、生成されたボリューム内の各頂点を、パラメータ (u,v,w) ($0 \leq u,v,w \leq 1$) と対応付けて、特徴領域の座標の正規化を行う。再利用のためのデータとしては、正規化された座標と制御格子の縦横高さの比を保持しておく。

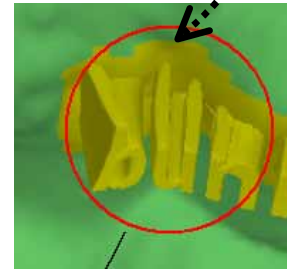
5. カット操作とペースト操作

セグメンテーション操作で抽出された特徴領域を除去することによって、フィーチャ除去が実現できる。それにより、メッシュに穴が空くが、この穴をベース曲面上の点を用いてリメッシュすることで、滑らかな曲面に置き換えることができる。

貼り付けにおいては、まず、貼り付けるべきターゲット領域と貼り付ける向きを指定する。次に、ターゲット領域の点群を用いて、B スプライン曲面当てはめを行い、その上にもボリュームを生成する。登録フィーチャはこ



B-spline volume.

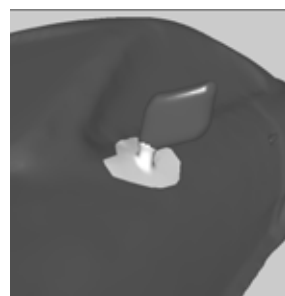


No self-intersections.

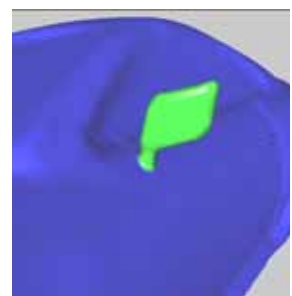
Fig.3. Volume-fitting.

のボリュームのパラメータ値に対応するように座標変換される。

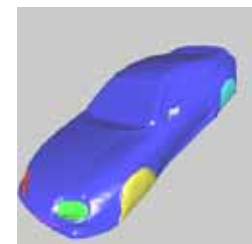
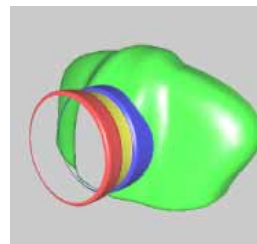
また、必要に応じて、制約条件の追加や制御点の移動によって、ペーストされたフィーチャの調整を行うことができる。ある頂点 $P_i(u_i, v_i, w_i)$ が指定された頂点 P_e となるような制約条件は、 $V(u_i, v_i, w_i) = P_e$ と書けるので、その条件を最適化の式に追加して、ボリュームの再計算を行えばよい。



(a) An area specified by a user.



(b) The extracted region.



(c) Examples of segmentation.

Fig.4. Segmented models.

6. 結果

Fig. 4 にユーザが指定したラフな領域(a) と抽出された特徴領域 (b) を示す . ユーザは、境界の候補となる領域をマウスによるストロークで指定すると、その領域から境界を自動的に計算し、パーツを切り出す . また、(c) に別のモデルに適用した例を示す . ここに示したように、マウスによるラフな境界の指定から、かなり正確な境界抽出が安定して行える . 計算時間は非常に短く、リアルタイム (PC Pentium 4.3.0GHz で 0.25秒以下) に行うことができる .

Fig. 5 (a) はベース曲面を作成して、特徴領域を除去した例である . この特徴領域は、ボリュームフィッティングによって正規化され、別のモデルへの貼り付けに利用される . (b) は、(a) のモデルの特徴領域を別のモデルにペーストした例を示している . その際、貼り付け領域に対して曲面当てはめを行い、その曲面に合うようにボリュームを生成する . 特徴領域はそのボリューム内に生成される .

Fig. 6は抽出領域にデフォーメーションを適用したものである . この例のように、境界は連結でなくても構わない . デフォーメーションが特定の部分のみに対して行えれば、柔軟な形状変形が可能が行え、製品モデルのバリエーションを作成するのに有効である .

Fig.7 は、非連結な境界を持つ特徴領域を抽出し、貼り

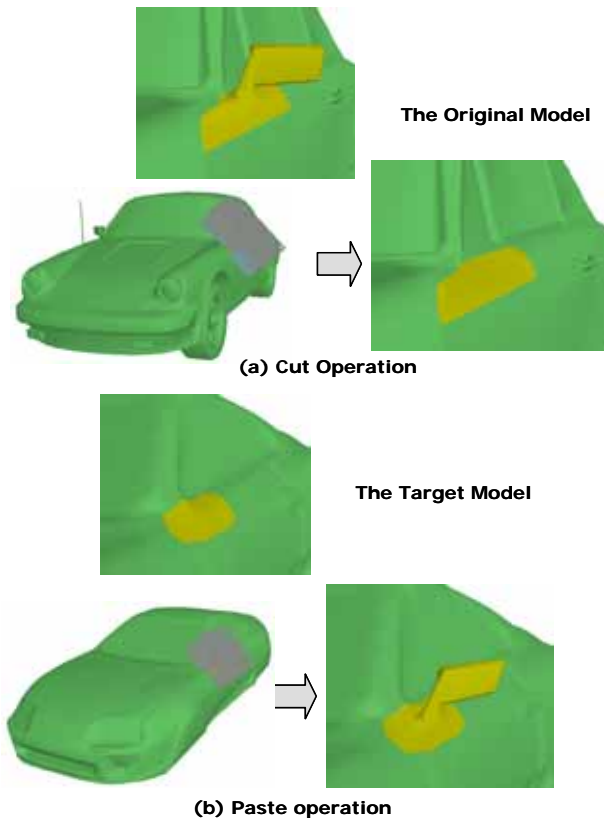
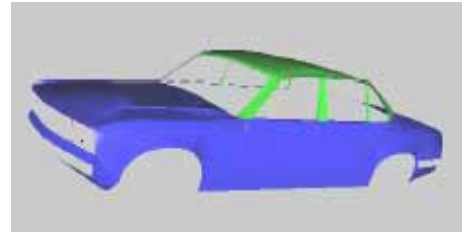
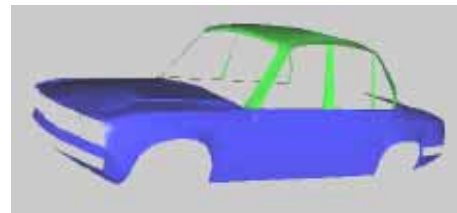


Fig.5. Cut-operation and paste-operation.

付けを行った例である . 本手法では、ボリュームを用いた変形を行うので、非連結な境界を持つ領域であっても、ボリューム内に収まっている限りにおいて、適切にペースト操作を適用することができる .



(a) The Original Model .



(b) The Deformed Model .

Fig.6. Deformation of the extracted region.

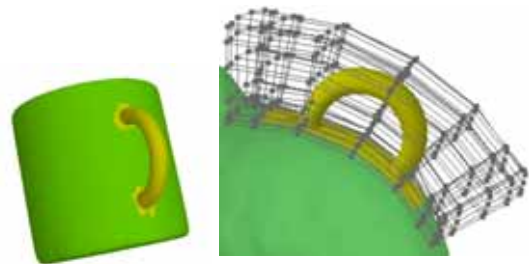


Fig.7. Pasting of a region with disconnected boundaries.

7. 結論

本研究では、設計の初期段階でのラフモデル作成のために、既存の3Dモデルを改変して新しいモデルを作成する方法を示した . 本研究では、メッシュモデルをベースにして、特徴領域を容易に抽出する操作を示し、それに基づいて、カット操作、ペースト操作、デフォーメーション操作を実現する方法を示した . 従来、メッシュモデリングの柔軟性については知られていたが、CADモデルのようなパッチや face による明示的な位相を持たなかったために、工業製品のモデリングは容易ではなかった . ここでは、メッシュセグメンテーション法を利用することでこの問題を解決し、容易な特徴領域指定を可能にした . また、形状変形操作については、その実装を行い、評価

実験を行った。その結果、特徴領域の抽出、除去、ペースト、変形が容易にかつ実時間で行えることを確認した。今後、本手法を発展させ、分散協調型 CAD のフレームワークの中でのリアルタイムモデリングに適用する可能性を検討していく予定である。

参考文献

1. Ulrich, K. T. and S. D. Eppinger (1995). "Product design and development," New York, McGraw-Hill, Inc.
 2. Dahan, E. and Srinivasan, V (2000), The Predictive Power of Internet-Based Product Concept Testing Using Visual Depiction and Animation. *Journal of Product Innovation Management*, 17, pp. 99-109
 3. Biermann, H., Martin, I., Bernardini, F., and Zorin, D. (2002). "Cut-and-paste editing of multiresolution surfaces," *ACM Transaction on Graphics*, 21(3), pp. 312-321.
 4. Kanai, T., Suzuki, H., Mitani, J., and Kimura, F (1999). "Interactive mesh fusion based on local 3D metamorphosis," *Graphics Interface 99*, pp. 148-156.
 5. Suzuki, H., Sakurai, Y., Kanai, T., and Kimura, F (2000). "Interactive mesh dragging with an adaptive remeshing technique," *The Visual Computer*, 16(3-4), pp. 159-176.
 6. Forsey, D. R. and Bartels, R. H. (1995), "Surface fitting with hierarchical splines," *ACM Transactions on Graphics*, 14(2):134-161.
 7. Mangan, A. P. and Whitaker, R. T. (1999). "Partitioning 3D surface meshes using watershed segmentation," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 5(4), pp. 308-321.
 8. Chazelle, B., Dobkin, D. P., Shouraboura, N., and Tal, A (1995). "Strategies for polyhedral surface decomposition: An experimental study," *Symposium on Computational Geometry*, pp. 297-305.
 9. Katz, S. and Tal, A (2003). "Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts," *ACM Transactions on Graphics*, 22(3), pp. 954-961.
 10. Weiss, V., Andor, L., Renner, G., Varady, T. (2002). "Advanced surface fitting techniques," *Computer Aided Geometric Design*, 19, pp. 19-42.
 11. 吉岡康博, 最大流最小カットを用いたメッシュモデルからの特徴領域抽出に関する研究, 東京大学システム創成学科卒業論文, 2004.
 12. 古川慈之, 自由曲面形状の生成と再利用に関する研究, 東京大学工学系研究科博士論文, 2003.
-