

パラメトリックボリュームフィッティングを用いた 3次元形状モデルのカットアンドペースト編集

古川 慈之[†] 増田 宏^{††} 大和 裕幸^{†††}

本論文は、3次元形状モデルに対する新たなカットアンドペースト編集手法を提案する。カットアンドペースト編集は滑らかな曲面形状の上に存在する詳細な形状を対象として形状の切り取りと貼り付けを行うものである。本研究では、この操作をBスプライン曲面・ボリュームフィッティングに基づく新しいパラメータ化手法の導入によって実現する。従来手法では、貼り付けの対象領域が高い曲率を有すると貼り付け後の詳細形状に自己交差が生じるという問題があったが、提案する手法ではボリュームフィッティングを用いることでそのような自己交差を効果的に回避する。このボリュームフィッティングは、平滑さの指標を含む目的関数を用いた最適化計算によって実現される。加えて、ユーザが定義する制約によってパラメータ化を制御することができるため、ユーザの意図に応じた貼り付け操作が可能である。さらに、詳細形状を囲むボリュームを用いて平面と同相でない詳細形状のカットアンドペーストができるため、従来より複雑な詳細形状を用いた編集が可能となる。

Cut-and-Paste Editing of 3D Geometric Models Based on Parametric Volume Fitting

YOSHIYUKI FURUKAWA,[†] HIROSHI MASUDA^{††}
and HIROYUKI YAMATO^{†††}

This paper proposes an advanced cut-and-paste editing for three-dimensional models. A cut-and-paste editing operation cuts a detail feature from the source model and pastes it to the target model. We realize this operation on the basis of a new parameterization technique based on constrained B-spline surface and volume fitting. Conventional cut-and-paste editing may cause self-intersections when it is applied to highly curved regions, but our method can effectively avoid this problem by smooth volume fitting, which is realized by optimizing an objective functional that consists of a distance error factor and a smoothness factor. In addition, our method allows to paste regions that are not homeomorphic to disks, and to control parameterization by user-defined constraints. This capability is useful for controlling cut-and-paste editing by the user's intent.

1. はじめに

カットアンドペースト編集とは、対象とする部分の切り取りや複製を行い、他の領域に貼り付ける操作のことである。このような操作は文書や画像の編集において広く用いられており、作業の手間の軽減や、データの再利用を促進するために有用なものとなっている。

近年では、3次元形状モデリングにおいてもカットアンドペースト編集に関する研究が多数行われるようになり、パラメトリック曲面、ポリゴンメッシュ、細分割曲面、点群モデルに対する手法が提案されている¹⁾³⁾⁴⁾⁶⁾²⁾⁵⁾。いずれの表現でも、従来の研究では、既存の曲面形状から特徴的な凹凸を抽出し、それを別の滑らかな曲面形状の上に転写する操作をカットアンドペースト編集と定義している。本研究でも、カットアンドペーストをこの意味で使い、総称して自由形状のカットアンドペースト編集と呼ぶことにする。また、カットアンドペーストの元になる形状をソース形状、転写先の形状をターゲット形状と呼ぶ。ソース形状から特徴的な凹凸を抽出するためには、図1に示すように、元の形状を詳細形状とベース曲面に分離する必要がある。分離

[†] 産業技術総合研究所ものづくり先端技術研究センター
Digital Manufacturing Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

^{††} 東京大学大学院工学系研究科
School of Engineering, The University of Tokyo

^{†††} 東京大学大学院新領域創成科学研究科
Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

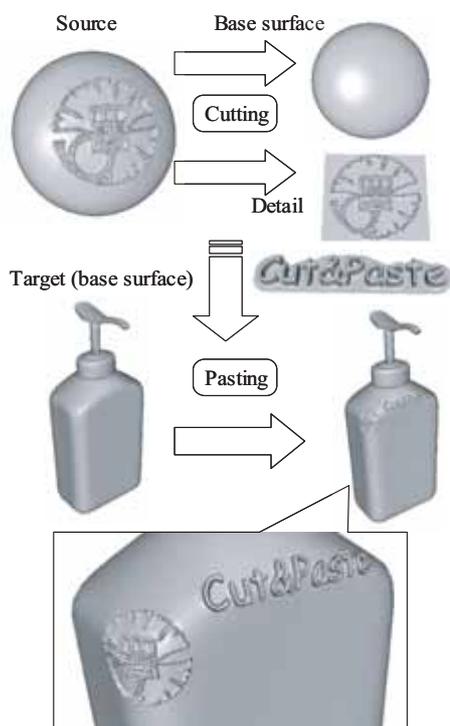


図 1 自由形状のカットアンドペースト編集
Fig. 1 Cut-and-paste editing of free-forms

にあたっては、形状簡略化や曲面フィッティングを用いて生成される滑らかな形状をベース曲面とし、この曲面と元の形状との差分を詳細形状とすることが多い。抽出した詳細形状をターゲット形状に貼り付けるためには、ターゲット形状と抽出した詳細形状の位置合わせを行い、詳細形状をターゲット形状に追加する。位置合わせは、詳細形状とターゲット形状に 2 次元のパラメータ座標を割り当て、このパラメータ座標間の対応関係を取ることで行う。このようにパラメータ座標を割り当てることをパラメータ化と呼ぶ。

このようなカットアンドペースト手法において問題となるのは、形状に歪みを生じることや、貼り付けに際してユーザの意図を反映させるのが難しいことである。歪みについては、非線形の最適化を用いることで低減させる試みもあるが⁸⁾、頂点数の大きいメッシュモデルでは計算時間が膨大になるという問題がある。また、従来の研究では、詳細形状を差分ベクトルとして記述することが多い。しかし、単純にターゲット形状に差分ベクトルを加えるだけでは、貼り付け後の詳細形状が自己交差する恐れがあり、ユーザが自己交差を生じないように再編集するのは面倒な作業であった。さらに、詳細形状とターゲット形状の対応を取るためには、両者が平面と同相である必要があり、位相が異なる場

合の貼り付けは容易ではないという問題もある。

本論文では、これらの問題を解決するために、3 角形メッシュモデルを対象としたカットアンドペースト編集を取り上げ、以下の手法を提案する。

- (1) メッシュのパラメータ化に適応的 B スプラインフィッティングを適用し、パラメータ化とベース曲面抽出を協調させて行うことで、自然なパラメータ化を実現する。
- (2) 自己交差の回避や意図した貼り付けを行うために、B スプラインボリュームのフィッティング手法を導入し、空間的なパラメータ化に基づいた詳細形状の付加手法を用いる。

これらの手法によって、自然なパラメータ化による詳細形状の貼り付けや、ユーザによる拘束条件の付加、空間的な対応を考慮したカットアンドペースト編集手法が可能となることを示す。

2. 関連研究

3 次元形状モデルを対象とするカットアンドペースト編集に関する研究は、これまでに多数行われている。

パラメトリック曲面を対象としたカットアンドペースト編集手法の草分としては、階層化スプラインによる詳細形状の付加手法¹⁾³⁾⁴⁾がよく知られている。これはスプライン曲面で定義されるパラメータ空間に他のスプライン曲面を階層的に付加する手法である。この手法では曲面の階層的なモデリングが主眼であり、詳細形状の抽出や切り取りには言及していない。

Biermann ら²⁾は準正則な多重解像度細分割曲面に対するインタラクティブなカットアンドペースト編集を提案した。伊達ら⁵⁾は 3 角形メッシュのカットアンドペースト編集において詳細形状内の距離を保存し、幾何制約を可能な限り満たす操作を実現した。これらの研究では、詳細形状を差分ベクトルと見なしたカットアンドペースト編集を扱っている。

Kanai ら⁶⁾は二つの 3 角形メッシュを調和写像を用いてパラメータ化し、モーフィングによって融合する手法を提案した。この手法では凹凸の大きい詳細形状の貼り付けも可能であるが、メッシュのパラメータ化において平面と同相であることを前提としている。

また、Kuriyama と Kaneko⁷⁾はメッシュモデルのデフォメーションのために局所的なパラメータ化手法を提案している。

一方、メッシュを構成する点群をパラメトリック曲面に当てはめる研究も盛んに行われてきた。古典的な曲面フィッティングでは、点群に対して何らかの手段でパラメータを推定し、そのパラメータを満たすよう

な制御点を算出する．パラメータの推定が不十分な場合には，曲面に歪みが生じるが，曲面フィッティングにおいてもパラメータの推定は難しい問題であった．これに対して，Weiss ら⁹⁾ はパラメータ化とフィッティングを繰り返し行い，フィッティング精度が高まるに従って歪みの少ないパラメータ配置が再計算される手法を提案した．この手法によって歪みの少ない自然なパラメータ化が実現でき，またベース曲面も同時に得られるので，カットアンドペースト編集でも有効であると考えられる．本研究では，曲面フィッティングに関して Weiss らの手法に基づくが，空間的な制御を可能にするために，この手法をボリュームフィッティングに拡張する手法を示し，カットアンドペースト編集に応用する方法について述べる．

3. ボリュームフィッティングを用いたカットアンドペースト編集

図 2 に本研究で提案するカットアンドペースト編集の流れを示す．まず (a) ユーザはソース形状から転写すべきソース領域を選択する．次に (b) 選択領域を近似する B スプライン曲面を計算する．この近似曲面はベース曲面として用いられ，元の形状との差分が詳細形状となる．さらに，その曲面を等パラメータ面とする B スプラインボリュームを，選択領域が含まれるように生成する．このとき，ボリューム内の各頂点は，B スプラインボリュームのパラメータ空間を用いてパラメータ化される．必要であれば (c) ソース領域の形状をベース曲面形状に置き換えることで切り取り操作を行う．続いて (d) ユーザはターゲット形状からターゲット領域を選択する (e) ソース領域と同様に，ターゲット領域に対しても曲面フィッティングとボリュームフィッティングによるパラメータ化が行われる．最後に (f) 詳細形状をターゲット領域の形状と接続し，貼り付け操作を完了する．

このような編集操作を実現するために，B スプライン曲面・ボリュームフィッティングに基づく局所的パラメータ化手法 (Local Parameterization based on Constrained B-spline surface and volume Fitting) を導入する．以降では，これを LPCBF 法と呼び，その概要を図 3 に示す．LPCBF 法は (a) ユーザが 3 次元形状からある領域を選択したとき (b) この領域を近似する曲面を求め (c) その曲面を等パラメータ面としたボリュームを定義することで空間的なパラメータ化を行う手法である．選択する領域は高曲率領域や取手形状，複数の不連続領域を含んでもよい．また，曲面フィッティングに用いる点群として，図 3 (b) に示す

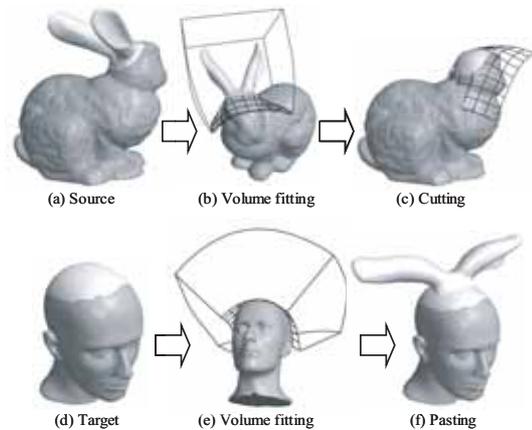


図 2 ボリュームフィッティングを用いたカットアンドペースト編集の流れ

Fig. 2 Flow of cut-and-paste editing with volume fitting

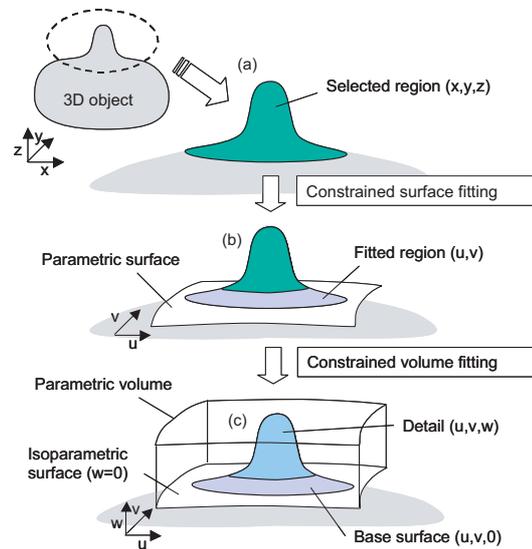


図 3 パラメトリックボリュームフィッティングに基づくパラメータ化

Fig. 3 Parameterization based on parametric volume fitting

ように選択領域の境界付近の頂点のみをユーザが選択して，ベース形状を作成することもできる．また，曲面とボリュームのフィッティングは，ユーザによって与えられる制約条件や平滑さの指標を含む目的関数の最小化問題として解くことが可能である．

4. LPCBF 法

LPCBF 法は B スプライン曲面・ボリュームフィッティングを用いたパラメータ化手法である．図 4 にその処理の流れを示す．入力にはユーザによって選択された領域内の頂点群であり，出力は各頂点に対応するパ

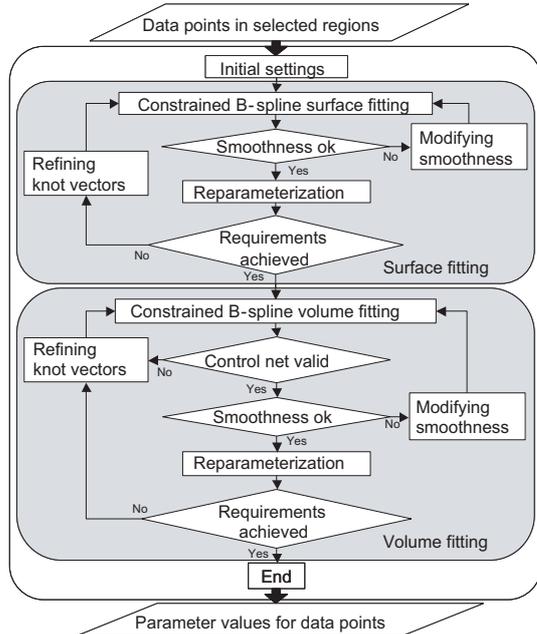


図 4 B スプライン曲面・ポリウムフィッティングに基づくパラメータ化の流れ

Fig. 4 Flow of parameterization based on constrained B-spline surface and volume fitting

ラメータ座標である。図 4 はフィッティングのための初期設定を前処理として、曲面フィッティング、ポリウムフィッティングの 2 段階から構成され、それぞれの段階でフィッティングと再パラメータ化が繰り返し行われる。フィッティングと再パラメータ化の繰り返し計算を行うという枠組みは Weiss ら⁹⁾ の曲面フィッティング手法と同様であるが、我々はポリウムフィッティングにも適用し、かつこれら二つを組合せ、ポリウムフィッティングの制約としてフィッティングで得られた曲面を用いている。

4.1 曲面フィッティングと再パラメータ化

B スプライン曲面 S と B スプラインポリウム V を以下のように定義する。

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \mathbf{P}_{ij} \quad (1)$$

$$V(u, v, w) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} \sum_{k=0}^{l-1} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) N_{k,r}(w) \mathbf{P}_{ijk} \quad (2)$$

ただし、 \mathbf{P}_{ij} , \mathbf{P}_{ijk} は制御点、 p, q, r と n, m, l は各パラメータ方向に関する次数と制御点数、 $N_{i,p}, N_{j,q}, N_{k,r}$ は B スプライン基底関数である。

入力として与えられた頂点群 $\{\mathbf{Q}_t | t = 0, \dots, s-1\}$ に対する曲面フィッティングを考える。頂点 \mathbf{Q}_t に曲

面フィッティングを行うときは、各点に曲面 S のパラメータ座標 (u_t, v_t) を対応付けることが必要である。ここで、点 \mathbf{Q}_t の初期パラメータ座標が (u_t, v_t) と設定されたとき、入力データと曲面の二乗誤差 F_p^S を次式のように定義する。初期パラメータ座標は大まかな値でよい。ここでは、頂点群 $\{\mathbf{Q}_t\}$ を近似する平面への投影点を用いて算出しておく。

$$F_p^S = \sum_{t=0}^{s-1} |\mathbf{Q}_t - S(u_t, v_t)|^2 \quad (3)$$

次に、曲面 S に関する平滑さの指標 F_s^S を次式で定義する。

$$F_s^S = \iint (|S_{uu}|^2 + 2|S_{uv}|^2 + |S_{vv}|^2) dudv \quad (4)$$

また、曲面 S に対して特定の通過点集合 $\{\mathbf{Q}_h^c\}$ を指定するために以下の制約式 C_h^S を導入する。

$$C_h^S = S(u_h, v_h) - \mathbf{Q}_h^c \quad (5)$$

フィッティングは、制御点集合 $\mathbf{P} = \{\mathbf{P}_{ij}\}$ を未知数として以下のように定式化される。

$$F_p^S(\mathbf{P}) + \beta F_s^S(\mathbf{P}) \rightarrow \min \\ \text{subject to } C^S(\mathbf{P}) = 0 \quad (6)$$

ここで、 β^S は非負重み、 $C^S = \{C_h^S\}$ である。式 (6) はラグランジュ乗数法により、次式の最小化問題として解くことができる。

$$F_p^S(\mathbf{P}) + \beta F_s^S(\mathbf{P}) + \mathbf{A}(C^S(\mathbf{P})) \quad (7)$$

ただし、 \mathbf{A} はラグランジュ乗数ベクトルである。式 (7) は未知数 \mathbf{P} , \mathbf{A} に関する微分を 0 と置くことによって線形連立方程式を数値的に解く問題に帰着する。式 (6) の目的関数は二次形式の単調増加関数であり、制約に問題がなければ、上記の方法で解は一意に求められる。

求めた曲面に面の裏返りや自己交差が生じた場合には、 β^S を大きくして再計算を行う。 β^S を大きくすると、フィッティング精度は低下するが滑らかさが重視されることになるので、面の裏返りが抑制される。そのような不具合がなくなれば、新しく得られた形状によってデータ点の再パラメータ化を行う。

再パラメータ化では、頂点 \mathbf{Q}_t と曲面 S の距離が最短となる点を算出し、その点のパラメータ座標 (\hat{u}_t, \hat{v}_t) を新しいパラメータ座標とする。このとき、次式が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} S_u & S_v \end{bmatrix}^T \cdot \{S(\hat{u}_t, \hat{v}_t) - \mathbf{Q}_t\} = 0 \quad (8)$$

式 (8) は既に与えられているパラメータ座標を初期値としてニュートン法によって解くことができる。

フィッティングと再パラメータ化の後、曲面が要求す

る精度を満足していない場合にはノットを挿入することで曲面の自由度を上げ、再度フィッティングを行う。

(u, v) 二つのパラメータ方向に関してノットの挿入位置を決定するために、データ点 \mathbf{Q}_t とフィッティング曲面 S を用いて各ノット区間に対する重みを計算する。 u 方向に関するノット区間 $[\mu_k, \mu_{k+1}]$ 内にパラメータ化されたデータ点 \mathbf{Q}_t のインデックス集合を $T_{k,u}$ とすると、対象ノット区間に対する重み $w_{k,u}$ は次式で得られる。

$$w_{k,u} = \sum_{t \in T_{k,u}} m_{t,u}^2 \bar{\delta}_t, \quad \bar{\delta}_t = \frac{\delta_t}{\epsilon} \quad (9)$$

ただし、 δ_t はデータ点 \mathbf{Q}_t と曲面 S の距離で、許容誤差 ϵ で正規化している。 $m_{t,u}$ はパラメータ u に対する距離の変化率であり、その定義は A.1 に示す。

式 (9) による重み順に、挿入するノット区間を選択する。各区間に挿入するノット位置 $\bar{\mu}$ は次式で求める。

$$\begin{aligned} \bar{\mu} &= (1 - \lambda)\mu_k + \lambda\mu_{k+1} \\ \lambda &= \begin{cases} \alpha & (\bar{\lambda} \in [0, \alpha]) \\ \bar{\lambda} & (\bar{\lambda} \in [\alpha, 1 - \alpha]) \\ 1 - \alpha & (\bar{\lambda} \in (1 - \alpha, 1]) \end{cases} \quad (10) \\ \bar{\lambda} &= \frac{1}{\mu_{k+1} - \mu_k} \left(\frac{\sum_{t \in T_{k,u}} u_t \delta_t^2}{\sum_{t \in T_{k,u}} \delta_t^2} - \mu_k \right) \end{aligned}$$

ただし、 u_t はデータ点 \mathbf{Q}_t のパラメータ値である。スカラー値 $\alpha \in [0, 1/2]$ は既存ノットの近くに新しいノットが発生することを防ぐために設定する値で、ここでは $\alpha = 0.2$ を用いる。 v 方向のノット区間に関しても、同様の手法で重みと挿入位置を決定する。

以上で述べた曲面フィッティングと再パラメータ化の繰り返し計算により、曲面は与えられた頂点群を近似する滑らかな形状となる。

この方法の利点はパラメトリック曲面の一部（トリム曲面）として形状がパラメータ化できることにある。言い換えると、曲面をフィッティングしたときに対象とする点が曲面に近いところであればよい結果が得られるが、曲面での近似が難しい形状に対しては適用が難しい。また、境界が複雑な形状をしている場合は、フィッティングする曲面の制御点数を増やす必要がある。平滑さの指標を導入することは、入力データの不足部分に対する外挿時の安定性を向上する役割を持ち、またデータ点の滑らかで自然なパラメータ化の実現に寄与する。フィッティングの初期パラメータ座標を平面に投影して求めることの制限としては、得られたパラメータ座標分布が全体的に大きな歪み（裏返りや重なり）が生じる場合にその後のフィッティングがうまく

いかないことが挙げられる。歪みが局所的または小さい場合には問題にならない。問題が生じた場合は、対象領域に沿った単純な初期曲面をユーザが作成することで、その後の処理を同様に行うことができる。

4.2 ポリウムフィッティングと再パラメータ化

ポリウムフィッティングでは、曲面と同様に与えられた制約条件の下で評価式を最小化するポリウムの制御点を求める。ポリウムに関する平滑さの指標 F_s^V は次式で定義する。

$$F_s^V = \iiint (|\mathbf{V}_{uu}|^2 + |\mathbf{V}_{vv}|^2 + |\mathbf{V}_{ww}|^2 + 2|\mathbf{V}_{uv}|^2 + 2|\mathbf{V}_{vw}|^2 + 2|\mathbf{V}_{wu}|^2) dudvdw \quad (11)$$

また、入力データとポリウムの二乗誤差 F_p^V は、以下のように定義する。

$$F_p^V = \sum_{t=0}^{s-1} |\mathbf{Q}_t - \mathbf{V}(u_t, v_t, w_t)|^2 \quad (12)$$

$$\mathbf{C}_h^V = \mathbf{V}(u_h, v_h, w_h) - \mathbf{Q}_h^c$$

ただし、制約式 $\mathbf{C}^V = \{\mathbf{C}_h^V\}$ は、通過点の指定を示す。

ポリウムフィッティングにおけるパラメータ座標の初期値は、曲面の場合よりさらに大まかな値で良い。ここでは、曲面の場合の初期値計算で用いた平面に平行な面を持ち、全ての頂点を含む直方体型のポリウムを定義して、その内部のパラメータ位置を用いている。

以上の指標を用いて、フィッティングは式 (6) と同様に次式で定式化され、線形連立方程式を数値的に解く問題に帰着する。

$$F_p^V(\mathbf{P}) + \beta F_s^V(\mathbf{P}) \rightarrow \min \quad (13)$$

subject to $\mathbf{C}^V(\mathbf{P}) = 0$

式 (13) の目的関数は曲面の場合と同様、二次形式の単調増加関数であるため、解が一意に求められる。

得られたポリウムによる再パラメータ化は、頂点 \mathbf{Q}_t とポリウム \mathbf{V} におけるパラメータ座標 $(\hat{u}_t, \hat{v}_t, \hat{w}_t)$ が次式を満たすことを用いて行う。

$$[\mathbf{V}_u \ \mathbf{V}_v \ \mathbf{V}_w]^T \cdot \{\mathbf{V}(\hat{u}_t, \hat{v}_t, \hat{w}_t) - \mathbf{Q}_t\} = \mathbf{0} \quad (14)$$

式 (14) は曲面の場合と同様に、既に与えられているパラメータ座標を初期値としたニュートン法によって解くことができる。

ポリウムフィッティングにおいては、制約となるベース曲面の湾曲に応じて得られたポリウムの歪みが大きくなる。ポリウムの歪みが大きくなるとポリウムに自己交差が生じることがある。このとき、得られたポリウムの制御点が滑らかで規則正しく配置されていれば、ポリウム内の空間が自己交差することは

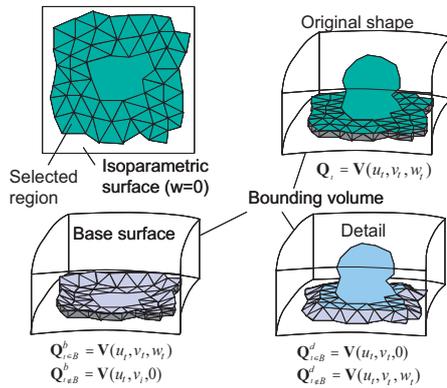


図 5 ポリウムを用いたベース曲面と詳細形状の表現

Fig. 5 Base and detail representation using the bounding volume

ない。このような制御点配置は、平滑さの指標 F_s^V を評価式に導入していることから、ノットの挿入とフィッティングを繰り返すことで実現でき、それによって貼り付け形状の自己交差を効果的に抑制できる。

ノット挿入に関しては、対象区間と位置の指定を自動的に決定するが、実際にノット挿入を行うかどうかはユーザが判断するものとした。ユーザはフィッティングによって得られたポリウムの制御点配置が滑らかでないか判断したとき、ベース曲面形状の影響範囲を狭めるようにノットを挿入することができる。ノット挿入位置 $\bar{\omega}$ は次式で与える。

$$\bar{\omega} = (1 - \gamma)\omega_k + \gamma\omega_{k+1} \quad (15)$$

ただし、対象とするノット区間 $[\omega_k, \omega_{k+1}]$ はベース曲面のパラメータ位置 ($w = 0$) を含む区間である。また、ここでは $\gamma = 0.5$ を用いる。

以上で述べたポリウムフィッティングと再パラメータ化の繰り返し計算により、ポリウムは前段階で得られた曲面を等パラメータ面とした滑らかな形状となり、空間的に自然なパラメータ化が実現できる。

5. LPCBF 法を用いた切り取りと貼り付け

5.1 ベース曲面と詳細形状の分離

フィッティングによって得られたポリウムを用いて、図 5 に示すように対象領域の形状はベース曲面と詳細形状に分離される。対象領域の頂点群 $\{Q_t | t = 0, \dots, s-1\}$ がポリウム V によってパラメータ化されたとき、頂点 Q_t は次式で表される。

$$Q_t = V(u_t, v_t, w_t) \quad (16)$$

このとき、対象領域におけるベース曲面の頂点 Q_t^b と詳細形状の頂点 Q_t^d は次式で記述される。

$$Q_t^b = \begin{cases} V(u_t, v_t, w_t) & (t \in B) \\ V(u_t, v_t, 0) & (t \notin B) \end{cases} \quad (17)$$

$$Q_t^d = \begin{cases} V(u_t, v_t, 0) & (t \in B) \\ V(u_t, v_t, w_t) & (t \notin B) \end{cases} \quad (18)$$

ここで、 B は対象領域の境界を構成する頂点のインデックス集合である。

5.2 詳細形状の切り取り操作と貼り付け操作

切り取り操作では、詳細形状を取り除き、ベース曲面の形状に置き換える。図 6 に示すように、詳細形状の位相要素を取り除き、空いた穴の部分に対して頂点のリサンプリングとリメッシュによる位相要素の再構成を行う。リサンプリングはフィッティングした曲面上で行い、その座標値は式 (17) で与えられる。

貼り付け操作では、図 7 に示すように、ターゲット側のベース曲面上 (パラメータ空間内) で詳細形状の位置決めをした後、ベース曲面の位相要素を一度取り除いて、詳細形状と接続する位相要素を再構成することで実現できる。ベース曲面上の詳細形状の位置はユーザによる編集が可能である。このとき、ターゲット側の対象領域の境界が、詳細形状の境界を完全に含んでいる必要がある。その条件を満たしていれば、境界の形状を合わせる必要はない。ベース曲面の位相要素の再構成では、切り取り操作の場合と同様に頂点のリサンプリングとリメッシュを行う。ここでも、リサンプリングはフィッティングした曲面上で行われる。貼り付け後の詳細形状 (頂点座標) Q_t^d は、位相要素が再構成された後に詳細形状の各頂点のパラメータ座標 (u_t, v_t, w_t) を用いて、ターゲット側のポリウム V' から次式で決定される。

$$Q_t^d = V'(u_t, v_t, w_t) \quad (19)$$

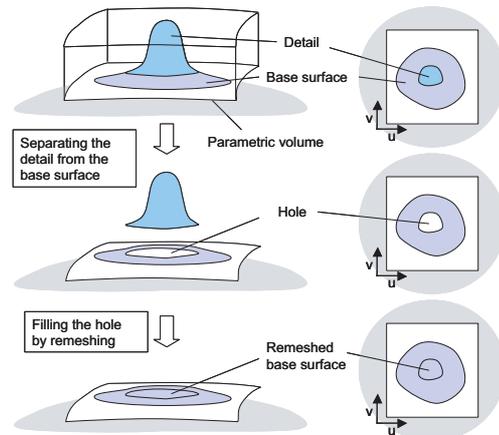


図 6 切り取り操作

Fig. 6 Cutting operation

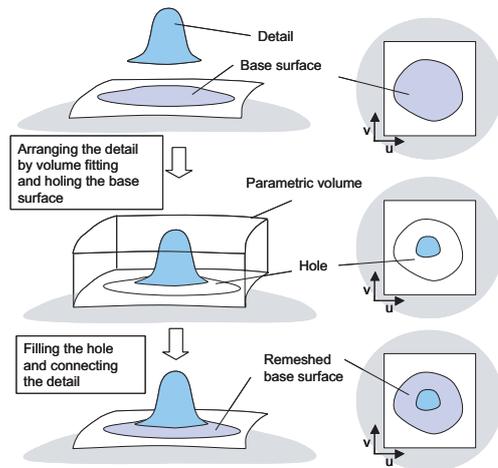


図 7 貼り付け操作
Fig. 7 Pasting operation

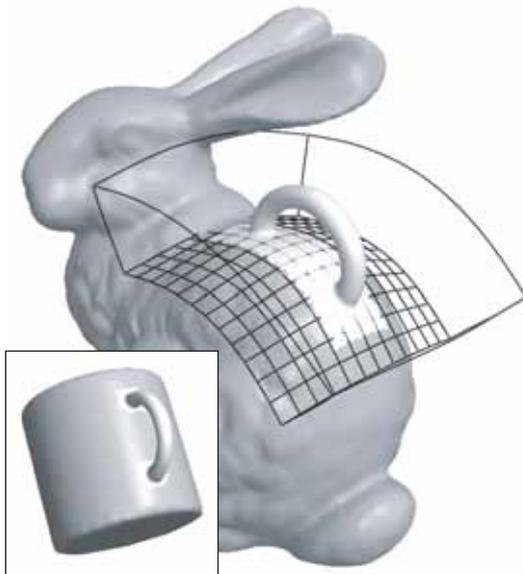


図 8 取手形状の貼り付け操作
Fig. 8 Pasting a handle

6. 実装と評価

提案するカットアンドペースト手法を実装し、例題を用いて評価を行った。図 1 と図 2 もそれぞれが例題の一つを示している。実装環境は、CPU が Pentium4 3.2GHz、メモリが 2GB、OS は Windows XP で開発環境は Visual C++ .NET を用いた。3 次元シーンの描画には OpenGL を用いている。また、連立方程式を解く際の数値計算には CLAPACK¹⁰⁾ の LU 分解ライブラリを用いた。

まず、平面と同相でない形状のカットアンドペース

ト操作の一例を図 8 に示す。ここではマグカップのモデルから取手形状を抽出し、ウサギのモデルに貼り付けている。この場合の詳細形状の抽出では、初期曲面の制御点数 4×4 から開始して、 5×5 ($\beta^S = 0.1$)、 7×7 ($\beta^S = 0.01$) と適応的に曲面フィッティングを行ってベース曲面を求め、続いて初期ボリウムの制御点数 $7 \times 7 \times 4$ から、ボリウムフィッティングにより $7 \times 7 \times 7$ ($\beta^V = 0.1$) のボリウムを得た。また、詳細形状の貼り付けでも同様のフィッティングを行った。図 8 に示すように、曲面とボリウムのフィッティングによって、平面と同相でない領域から空間的に詳細形状を抽出でき、ターゲット領域に別のボリウムを定義してそれを容易に貼り付けられることがわかる。

次に、詳細形状の貼り付け操作においてターゲットが高曲率領域である場合の例を図 9 に示す。ここではテキストから作成した押し出し形状をウサギのモデルに貼り付けている。この場合の詳細形状の抽出では、制御点数 4×4 の初期曲面と制御点数 $4 \times 4 \times 4$ の初期ボリウムを直接用いた。また、詳細形状の貼り付けでは、制御点数 4×4 の初期曲面から開始して、 5×5 ($\beta^S = 0.1$)、 7×7 ($\beta^S = 0.01$)、 10×10 ($\beta^S = 0.001$) のフィッティングを経て最終的に 14×14 ($\beta^S = 0.0001$) のベース曲面を求め、初期ボリウムの制御点数 $14 \times 14 \times 4$ から制御点数 $14 \times 14 \times 7$ ($\beta^V = 0.1$) のボリウムを得た。図 9 に示すようにターゲットが高曲率領域の場合 (a) 従来手法 (例えば 2)) では自己交差を生じてしまうという問題があるが (b) LPCBF 法によって制御点の並びが正しく配置されるようにフィッティングを行うと、自己交差を抑制可能であることがわかる。制御点の並びが正しく配置されるボリウムフィッティングは、制御点数を段階的に増やしながらか β^V の値を変更して数回再計算することで容易に得られた。

最後に、計算時間に関する評価について述べる。提案するカットアンドペースト手法において、ユーザによる操作以外にかかる計算時間は、対象とする詳細形状の頂点数と、フィッティングを行う曲面とボリウムの制御点数に依存する。詳細形状の頂点数の増加に対しては、計算時間がほぼ線型で増加し、中でも再パラメータ化にかかる時間が最も影響が大きい。前述のテキスト押し出し形状の貼り付け例では、2 万点程度の頂点数で 2 秒程度を要した。一方、曲面とボリウムの制御点数の増加に対しては、連立方程式の解を求めるための計算時間が二乗より大きい割合で増加する。図 10 にボリウムの制御点数とフィッティングに要した時間の関係を示す。前述のテキスト押し出し形状の例では、最終的なボリウムの制御点数 1372 での

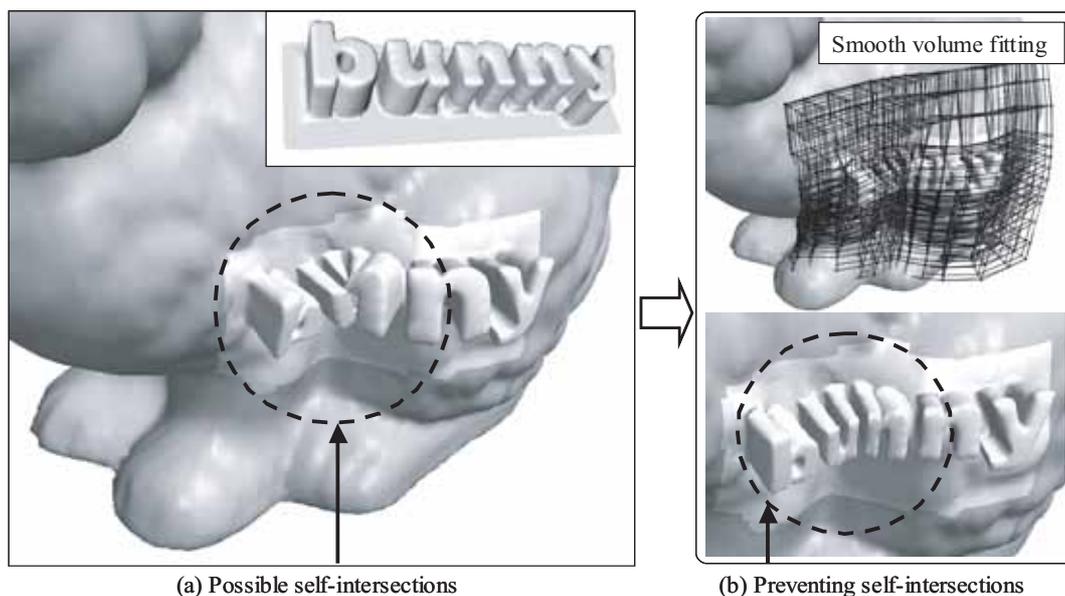


図 9 高曲率領域への貼り付けにおける自己交差の抑制

Fig. 9 Preventing self-intersections on highly curved regions

フィッティングに 3 秒強を要している。曲面のフィッティング段階で制御点数を増やした場合の最終的なポリウムの制御点数 $20 \times 20 \times 7 = 2800$ で計算を行った例では 28 秒を要した。このように、制御点数を増やすと計算時間が著しく増加するが、ここに示した程度以上に制御点数を増やすことは考えにくいので、全体としてもユーザのインタラクティブ性を確保できると考えられる。

7. まとめ

本論文では、B スプライン曲面・ポリウムフィッティングを用いたパラメータ化手法 (LPCBF 法) と、それを用いた 3 角形メッシュ形状に対するカットアンドペースト手法を提案した。提案した手法は、平面と同相でない形状に対しても適用可能であり、詳細形状を貼り付ける際にベース形状の状態に依存して生じる自己交差を防げることを示した。今後は 3 次元形状モデリングにおけるユーザの試行錯誤を支援し、コンテンツの再利用につなげる予定である。

参考文献

- 1) Barghiel, H., Bartels, R., Forsey, D.: Pasting spline surfaces, In *Mathematical Methods for Curves and Surfaces*, Ulvik, Norway, Vanderbilt University Press, pp. 31-40 (1994)
- 2) Biermann, H., Martin, I., Bernardini, F., Zorin, D.: Cut-and-paste editing of multiresolution surfaces, *ACM Transactions on Graphics*,

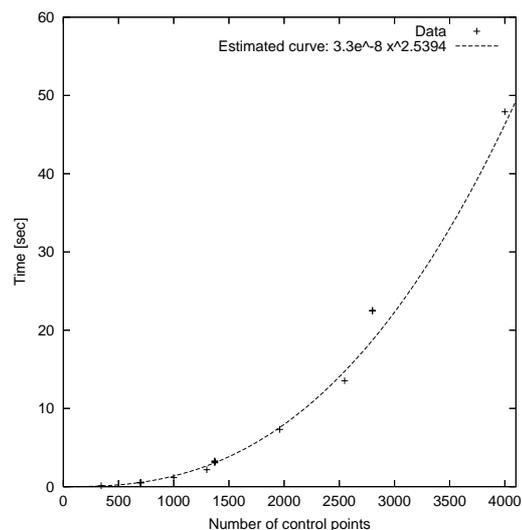


図 10 ポリウムの制御点数とフィッティングに要する計算時間
Fig. 10 Number of control points and calculation time for volume fitting

Vol. 21, No. 3, pp. 312-321 (2002)

- 3) Chen, L.K.Y., Mann, S., Bartels, R.: World space surface pasting, *Proc. of Graphics Interface '97*, pp. 146-154 (1997)
- 4) Conrad, B., Mann, S.: Better pasting via quasi-interpolation, *Curve and Surface Design: Saint-Malo, 1999*, Vanderbilt University Press, pp. 27-36 (2000)
- 5) 伊達宏明, 金井理, 岸浪建史: パラメタライゼー

- ションを用いた表面詳細合成形状の三角形メッシュモデリング, 精密工学会誌, Vol. 69, No. 4, pp.581-585 (2003)
- 6) Kanai, T., Suzuki, H., Mitani, J., Kimura, F.: Interactive mesh fusion based on local 3D metamorphosis, *Proc. of Graphics Interface '99*, pp. 148-156 (1999)
- 7) Kuriyama, S., Kaneko, T.: Discrete parameterization for deforming arbitrary meshes, *Proc. of Graphics Interface '99*, pp. 132-139 (1999)
- 8) Sheffer, A., de Sturler, E.: Surface parameterization for meshing by triangulation flattening, *Proc. of 9th International Meshing Roundtable*, pp. 161-172 (2000)
- 9) Weiss, V., Andor, L., Renner, G., Varady, T.: Advanced surface fitting techniques, *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 19, pp. 19-42 (2002)
- 10) <http://www.netlib.org/clapack/index.html>

付 録

A.1 データ点とフィッティング曲面の距離変化率
データ点を通過する連続な曲面 Q が, データ点に対するフィッティングで得られた曲面 S と曲面上の単位法線ベクトル \mathbf{n}^S によって次式で表されるとする.

$$Q(u, v) = S(u, v) + \delta(u, v)\mathbf{n}^S(u, v) \quad (20)$$

ただし, δ は曲面 Q と曲面 S の距離である.

上式を微分すると, 次式となる.

$$\begin{bmatrix} Q_u \\ Q_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_u + \delta n_u^S + \delta_u n^S \\ S_v + \delta n_v^S + \delta_v n^S \end{bmatrix} \quad (21)$$

ここで, 曲面 Q 上の単位法線ベクトル \mathbf{n}^Q と式の両辺との内積を取り, $Q_u \cdot \mathbf{n}^Q = 0$ と $Q_v \cdot \mathbf{n}^Q = 0$ を用いてこれを変形することにより, 次式を得る.

$$\begin{bmatrix} \delta_u \\ \delta_v \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{n}^Q \cdot (S_u + \delta \mathbf{n}_u^S)}{\mathbf{n}^Q \cdot \mathbf{n}^S} \\ \frac{\mathbf{n}^Q \cdot (S_v + \delta \mathbf{n}_v^S)}{\mathbf{n}^Q \cdot \mathbf{n}^S} \end{bmatrix} \quad (22)$$

また, 曲面 Q と曲面 S の誤差変化率を正規化した行列 D は, 曲面 S の第 1 基本形式を用いて次式で定義される.

$$D \equiv \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} \\ \mu_{21} & \mu_{22} \\ \frac{G\delta_u^2 - F\delta_u\delta_v}{EG - F^2} & \frac{E\delta_u\delta_v - F\delta_v^2}{EG - F^2} \\ \frac{G\delta_u\delta_v - F\delta_v^2}{EG - F^2} & \frac{E\delta_v^2 - F\delta_u\delta_v}{EG - F^2} \end{bmatrix} \quad (23)$$

ただし, $E = S_u \cdot S_u$, $F = S_u \cdot S_v$, $G = S_v \cdot S_v$ で

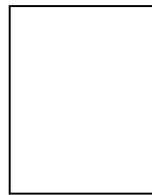
ある.

法線ベクトル \mathbf{n}^S と法線ベクトル \mathbf{n}^Q が平行でないとして仮定すると, データ点 Q_t と曲面 S に関して, 行列 D の対角成分が (u, v) 二つのパラメータ方向の距離の変化率 m_t であり, 次式で表される.

$$m_t \equiv \begin{bmatrix} m_{t,u} \\ m_{t,v} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{\mu_{11}^2 + \mu_{22}^2}} \begin{bmatrix} \mu_{11} \\ \mu_{22} \end{bmatrix} \quad (24)$$

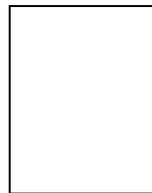
(平成 16 年 1 月 29 日受付)

(平成 17 年 1 月 11 日採録)



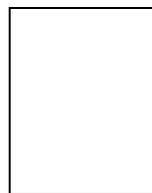
古川 慈之 (正会員)

1975 年生. 1998 年東京大学工学部船舶海洋工学科卒業. 2003 年同大学院工学系研究科環境海洋工学専攻博士課程修了. 同年独立行政法人産業技術総合研究所のづくり先端技術研究センターに入所, 現在に至る. 3 次元形状処理および設計・製造支援用ソフトウェア基盤に関する研究に従事. 博士 (工学). ACM, 精密工学会, 日本造船学会, 各会員.



増田 宏 (正会員)

1961 年生. 1987 年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了. 同年日本アイ・ビー・エム (株) 入社. 1998 年東京大学人工物工学研究センター助教授を経て, 2003 年より東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻助教授. 3 次元形状処理, 設計支援システムに関する研究に従事. 工学博士. IEEE, 情報処理学会, 人工知能学会, 精密工学会, 日本造船学会, 各会員.



大和 裕幸

1954 年生. 1982 年東京大学大学院工学系研究科船舶工学専門課程博士課程修了. 同年科学技術庁航空宇宙技術研究所入所. 1988 年東京大学工学部船舶工学科助教授. 同大学院工学系研究科環境海洋工学専攻教授を経て, 1999 年より東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻教授. 設計工学, 自動制御, 人工知能に関する研究に従事. 工学博士.