

中間曲面を用いたメッシュ形状の関心領域パラメータ化と カット&ペースト編集

古川 慈之
産業技術総合研究所

本研究では、編集するメッシュ形状に対して関心領域 (ROI) を部分的にパラメータ化し、それによってインタラクティブなカット&ペースト編集を実現する手法を提案する。ROIのパラメータ化は、メッシュ形状から近似的に得られる中間曲面を求めることで実現され、インタラクティブな編集は中間曲面が有するパラメータ空間での形状処理と、中間曲面の移動によって実現される。通常は中間曲面としてディスクと同相な (平面的な) 曲面を用いるが、円筒型の中間曲面を導入することで編集のバリエーションを増やせることを示す。

Parameterization and Cut-and-Paste Editing of Mesh Geometry in ROI Using Intermediate Surfaces

Yoshiyuki Furukawa
National Institute of Industrial Science and Technology

This paper proposes a method that parameterizes mesh geometry in ROI to edit by cut-and-paste operation. This ROI-parameterization is achieved by approximating mesh geometry with intermediate surfaces. Additionally, interactive editing operations are achieved by geometry processing over parameter spaces. While the type of the intermediate surface is typically the disk-like surface, we add the cylindrical surface that enables to enhance the variation of editing operations.

1 はじめに

曲面形状のカット&ペースト編集とは、パラメトリック曲面や細分割曲面およびメッシュ形状などで表現される曲面形状の上に貼り付いた特徴的な形状を切り取り、他の曲面形状の上に転写する編集手法である。このようなカット&ペースト編集では、編集対象となる領域をベース曲面と詳細形状に分離し、コピー元の形状 (ソース形状) の詳細形状を切り取り (カット操作)、貼り付け先の形状 (ターゲット形状) のベース曲面上に配置することで貼り付ける (ペースト操作) という方法が一般的である。このとき、ベース曲面と詳細形状を対応付けるために2次元のパラメータ平面への写像 (パラメータ化) が必要となり、これを実行することによって両者の対応付けがパラメータ平面上で行われる。また、曲面形状のカット&ペースト編集では、ベース曲面の変更によって特徴形状の編集結果が変化することから、形状変形の要素も含んでいる。曲面形状のカット&ペースト編集手法における課題としては、ベース曲面と詳細形状それぞれの位相に関する制約と、貼り付けられた詳細形状がベース曲面の影響でどのように変形するかを制御方法、さらにベース曲面上

における詳細形状の配置の制御などが挙げられる。ベース曲面と詳細形状それぞれの位相に関する制約はパラメータ化と深く関係し、変形の制御は詳細形状の表現方法に影響を受け、詳細形状の配置の制御はパラメータ化と詳細形状の表現方法に依存する。

本論文では、曲面形状のカット&ペースト編集における変形制御と詳細形状の配置制御を効率的に扱うことができるように中間曲面という概念を導入し、またベース曲面の位相的制約を緩和するために円筒型の中間曲面を導入する。これによって、曲面編集のカット&ペースト編集における編集のバリエーションを増やせることを示す。

2 関連研究

メッシュ形状に限らず、3次元形状モデルを対象とするカット&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。

本研究で対象とする曲面形状のカット&ペースト編集に分類される手法として代表的なものは、Biermannら [1] の手法である。これは準正則な多重解像度細分割曲面に関して、ベース曲面と詳細形状が1対1に対応する形状に対してのインタラクティブ

なカット&ペースト手法を提案している。この手法は、ベース曲面と詳細形状の両方がディスクと同相な(平面的な)形状に制限されている。また、Kanaiら[8]は3角形メッシュのモーフィングによるペースト手法を提案している。この手法は対象領域に対して凹凸が大きい形状の貼り付けが可能であるが、やはり平面的な形状を対象としている。古川ら[6][7]はパラメトリック曲面とパラメトリックボリュームをフィッティングすることで、ベース曲面が平面的で、詳細形状がディスクと同相でない(空間的な)詳細形状の編集を実現している。Fuら[4]もパラメータ化の方法を工夫することで空間的な詳細形状を扱える編集を実現している。ただし、これら空間的な詳細形状が扱える手法であっても、詳細形状の境界に関しては平面的なベース曲面上に自然に埋め込める形状に制限されている。

その他、3次元形状モデルを対象とするカット&ペースト編集に関する他の手法については、上記の文献(例えば[4][7])で述べられている。

曲面形状のカット&ペースト編集における技術要素の一つとして、パラメータ化が挙げられる。メッシュ形状のパラメータ化については、多数の研究がなされており、手法を系統的に比較したFloaterとHormannによる解説[3]がある。

一方、メッシュの頂点上で定義される離散的なラプラス演算子を用いた形状変形が近年盛んであり、これは曲面上に貼り付いた特徴形状を保存した変形が可能手法である[2][11][15]。これらの手法は、この離散的な演算子によって得られる計量の分布を抽出することで、特徴形状を他の形状に転写することが可能である。この種の形状変形手法に関するいくつかの論文でも、適用事例としてカット&ペースト編集を挙げるものが多く、親和性が高い。離散的なラプラス演算子を用いた形状編集手法としては、例えばYuら[15]がポアソン方程式を解くことによる変形を提案し、Sorkineら[11]は回転を考慮した最適化関数の導入による変形を提案した。ラプラス演算子を用いた形状編集および処理手法については、Sorkineによる網羅的な解説[12]がある。ただし、これらの手法を用いても、特徴形状の転写を実行するためには、カット&ペースト編集と同様にパラメータ化による対応付けと幾何の再構成が必要である。よって、これらの手法をカット&ペースト編集に取り入れたとしても、前述の問題は残る。

3 関心領域の2階層表現とカット&ペースト編集

本研究では、カット&ペースト編集の対象領域を関心領域(ROI)と呼ぶ。また、この関心領域を2階層の形状、すなわちベース曲面と詳細形状に分解す

る。このとき、ベース曲面と詳細形状はパラメータ平面对で対応付けが得られるものとする(図1参照)。

ベース曲面はカット操作後の形状であり、詳細形状はカット操作とペースト操作の対象となる形状である。ソース形状からカットまたはコピーされた詳細形状は、ターゲット形状のベース曲面上のパラメータ平面对で位置決めされ、最終的な形状として合成される。

3.1 中間曲面を用いた詳細形状表現

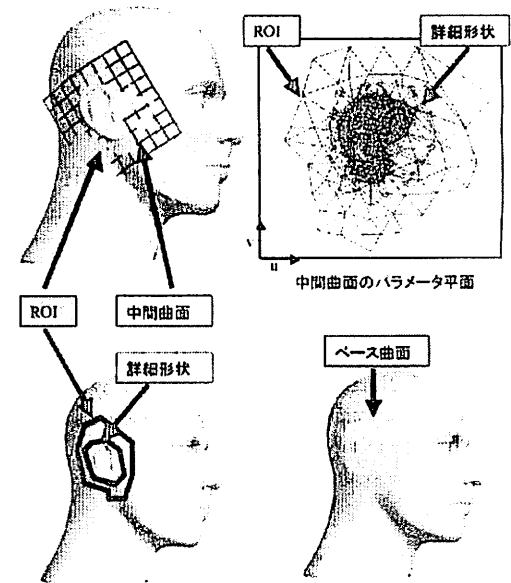


図1. 関心領域(ROI)の2階層表現と中間曲面

メッシュ形状のカット&ペースト編集におけるベース曲面は、カット後の形状であるため当然ながら離散的なメッシュ形状として表現されるが、このベース曲面を連続的な表現であるパラメトリック曲面として表現できれば、編集において都合がよい場合がある。一つの大きな利点は、ペースト操作時にパラメータ平面上で詳細形状の移動や回転およびスケールリング、さらにパラメータ平面上での連続的な形状変形が可能となることである。本研究では、ベース曲面の形状を表現したパラメトリック曲面を中間曲面と呼ぶ(図1参照)。中間曲面が存在する範囲においては、曲面上の詳細形状をドラッグ操作で移動することが可能であり、関心領域を移動しながら中間曲面をリアルタイムに追隨させることができれば、より広範な領域でのドラッグ操作が原理的に可能となる。このようなメッシュ形状のドラッグ操作はSuzukiら[13]によって提案されているが、中間曲

面を用いることで元形状への影響を最小限に抑えて同様の操作が可能となる。

詳細形状の頂点座標 $\{d_i\}$ は、ベース曲面上の座標 b とベース曲面からのベクトル Δ を用いて次式で表される。

$$d_i = b(u_i, v_i) + \Delta(u_i, v_i) \quad (1)$$

ただし、 (u_i, v_i) は d_i に対して割り当てられたパラメータ座標である。上式を中間曲面 S を用いて表すと次式となる。

$$d_i = S(u_i, v_i) + \xi_i u_i + \eta_i v_i + \zeta_i n_i \quad (2)$$

ただし、 $u_i = \frac{S_u(u_i, v_i)}{|S_u(u_i, v_i)|}$ 、 $v_i = \frac{S_v(u_i, v_i)}{|S_v(u_i, v_i)|}$ で、 S_u と S_v はそれぞれ u 方向と v 方向の接平面ベクトル、 n_i は単位法線ベクトルで $n_i = u_i \times v_i$ が成り立つ。 Δ は中間曲面上の局所座標系表現 (ξ, η, ζ) に変換されている。まとめると、詳細形状はパラメータ群 $\Omega_i = (u_i, v_i, \xi_i, \eta_i, \zeta_i)$ として表現され、ベース曲面の形状に追従して変形が可能となる。

以上の考え方を一般化すると、詳細形状の頂点座標 d_i は、中間曲面 S によって定義される変換を表す関数 F_S と、それに対する入力である詳細形状のパラメータ表現 Ω_i によって次式で表現できる。

$$d_i = F_S(\Omega_i) \quad (3)$$

中間曲面の表現と、それによって定義される変換、および詳細形状のパラメータ表現の方法はいくつか考えられるが、本論文では B スプライン曲面とボリウムを用いる方法 [6][7] を採用した。採用した方法では、中間曲面生成とパラメータ化において、関心領域から詳細形状を除いた領域をベース曲面領域とし、その領域に含まれる頂点群 $\{b_i\}$ に対して曲面の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 [14]。

$S(u, v)$ のフィッティングは次式で与えられる。ただし、次式でエネルギー関数 $E(S)$ は、曲面と頂点座標の距離の二乗和と曲率の積分値の線型結合として与えられる。

$$S(u, v) : E(S) \rightarrow \min \quad (4)$$

また、再パラメータ化では、頂点 b_i 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}_i, \hat{v}_i) 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。

$$\begin{bmatrix} S_u & S_v \end{bmatrix}^T \cdot \{S(\hat{u}_i, \hat{v}_i) - b_i\} = 0 \quad (5)$$

式 (5) 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。

このようにして得られた曲面はベース曲面として形状をよく近似してかつ滑らかさを有しており、さらにベース曲面の面積比分布や角度を可能な限り保持するようなパラメータ化となる傾向がある。これは、Levy[9] がメッシュ形状のパラメータ化と補間に関して提案していることに類似する。

一方、中間曲面 S に応じて変形するボリウム V も、フィッティングと再パラメータ化によって求められる。ボリウムのフィッティングは次式で与えられる。ただし、次式でエネルギー関数 $E(V)$ は、ボリウムと頂点座標の距離の二乗和と曲面からの類推で得られる曲率の積分値の線型結合として与える。

$$V(u, v, w) : E(V) \rightarrow \min \quad \text{subject to} \quad V(u, v, 0) = S(u, v) \quad (6)$$

また、再パラメータ化は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} V_u & V_v & V_w \end{bmatrix}^T \cdot \{V(\hat{u}_i, \hat{v}_i, \hat{w}_i) - d_i\} = 0 \quad (7)$$

結局、詳細形状の頂点座標 d_i は中間曲面に追従して変形するボリウム V とそのパラメータ座標 (u_i, v_i, w_i) を用いて次式で表される。

$$d_i = V(u_i, v_i, w_i) \quad (8)$$

つまり、ここでは $F_S = V$ であり、 $\Omega_i = (u_i, v_i, w_i)$ である。

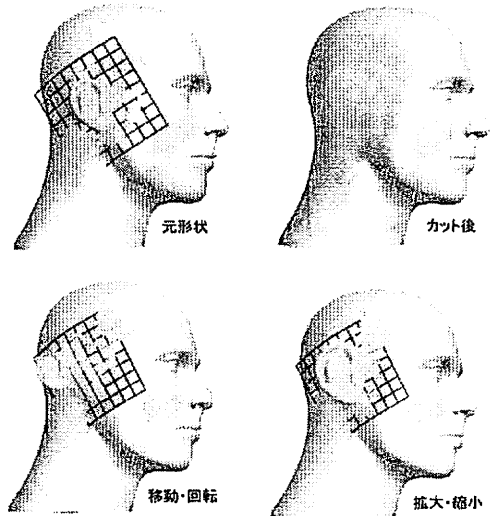


図 2. 中間曲面を用いたカット&ペースト編集例

以上で述べた方法により、一般的な平面型の中間曲面を用いた編集例を図 2 に示す。図 2 では、カッ

ト操作によって中間曲面の形状をベース曲面としてメッシュ形状を置き換えた例と、中間曲面のパラメータ平面上で詳細形状のパラメータ座標値を平行移動や回転をすることによる編集例や、拡大と縮小が可能であることを示している。カット操作やペースト操作では上記の頂点座標の変換に加えて、メッシュ形状の接続情報を再構築する必要がある。中間曲面を用いた方法では、パラメータ平面上での三角形分割が実行でき、それによって得られたパラメータ座標に対する曲面上の座標値と局所座標系が容易に得られるという利点がある。

4 円筒型中間曲面の導入

曲面形状のカット&ペースト編集では、これまでほぼすべての手法に関して、ベース曲面は平面的なものを対象としていた。さらに、詳細形状に関して平面的なものを対象とした手法が多く、その制限がない場合でも詳細形状の境界が平面的なベース曲面に埋め込み可能なものを対象としていた。一方、ラプラス演算子に基づく変形手法の適用例としてのカット&ペースト編集の例 [15][11] を見ると、図3に示すように、平面的なベース曲面に対して自然な埋め込みが難しい詳細形状を扱う例が示されている。カット&ペースト編集は形状の再利用を目的とした技術であり、Funkhouserら [5] が提案するように既存の形状を検索して部品を再利用するという編集をする場合でも、同様の編集例が示されており、上記のような編集が多いと思われる。

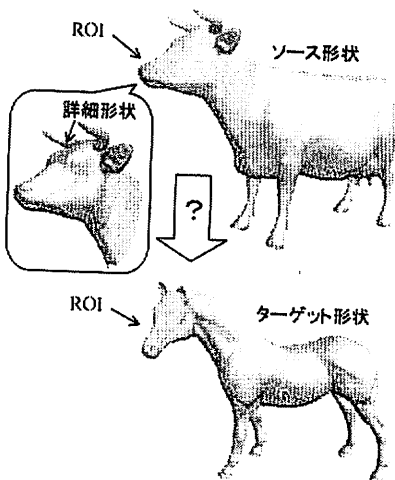


図3. 平面的な中間曲面による編集で問題となる例

このような場合にも曲面形状のカット&ペースト編集と同様の手法を適用して編集を実現するために、円筒型中間曲面を導入する。円筒型の形状を貼

り付けることで形状編集する手法はMannら [10] が提案しているが、彼らの手法は2つの平面型ベース曲面を円筒型の形状で接続することを目的としており、本論文で提案する円筒型のベース曲面を導入したカット&ペースト編集手法は例がないと認識している。

本研究で扱う曲面形状のカット&ペースト編集とは異なるアプローチで同様の編集を実現する方法はあるが、本研究で提案する手法の一つの優位性は、平面型の中間曲面の編集例で示したようにパラメータ平面上での編集が可能である点である。例えば、円周方向に詳細形状を回転させることや、母線方向に詳細形状の配置を移動させることが可能となる。

4.1 円筒型中間曲面を用いた詳細形状表現

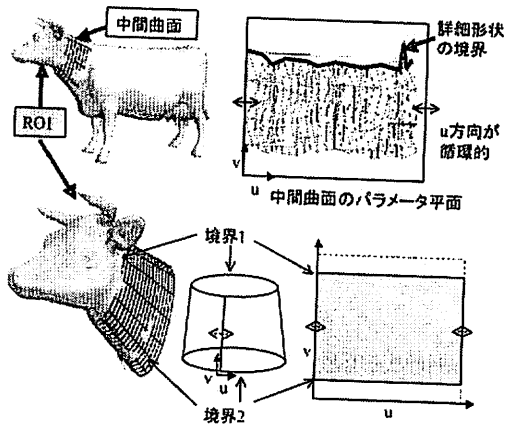


図4. 円筒型中間曲面を用いたパラメータ化

図4に示すように、円筒型の中間曲面はパラメータ平面上の u 方向を円周方向として循環的に、 v 方向を母線方向として扱うこととする。フィッティングで求める曲面 $S(u, v)$ は次式で与えられる。ただし、エネルギー関数 $E(S)$ は、式(4)と同様である。

$$S(u, v): E(S) \rightarrow \min \text{ subject to} \\ S(u_{min}, v) = S(u_{max}, v) \quad (9) \\ S_u(u_{min}, v) = S_u(u_{max}, v)$$

再パラメータ化は式(5)によるが、さらに、円筒型の中間曲面では、 u 方向のパラメータ座標を循環的に扱う必要があるため、ニュートン法の1ステップごとに次式の補正を行う。

$$\hat{u}' = \begin{cases} \hat{u} - u_{min} + u_{max} & (\text{if } u < u_{min}) \\ \hat{u} - u_{max} + u_{min} & (\text{if } u > u_{max}) \end{cases} \quad (10)$$

中間曲面の生成とパラメータ化によって、ベース曲面は当然ながら、詳細形状のパラメータ化と抽出

が可能となる。詳細形状の頂点座標 $\{d_i\}$ は、中間曲面に応じて変形するボリューム V のパラメータ座標値 (u, v, w) を用いて $\Omega_i = (u_i, v_i, w_i)$ と表現される。加えて、詳細形状とベース曲面の境界に位置する頂点 $\{d_j^b\}$ は、中間曲面のパラメータ座標 (s, t) も追加され、 $\Omega_j^b = (u_j, v_j, w_j, s_j, t_j)$ と表現される。このとき、ボリューム V は次式で与えられる。

$$V(u, v, w): E(V) \rightarrow \min \quad \text{subject to} \quad (11)$$

$$V(u_j, v_j, w_j) = S(s_j, t_j)$$

本研究で採用した手法は、ボリュームの生成とパラメータ化は初期形状からのフィッティングと再パラメータ化によって実現するが、本論文で説明する範囲では与えられた詳細形状を囲む直方体を直接用いている。

4.2 円筒型中間曲面を用いたペースト操作

ペースト操作をする場合には、詳細形状を含むボリュームの配置と、詳細形状の境界部分とベース曲面の再パラメータ化が必要となる。図5に示すように、ペースト操作では詳細形状との境界が2本配置されるため、ターゲット形状のベース曲面領域と詳細形状の3次元な距離関係に基づいてパラメータ座標を編集し、ペースト操作を行う。

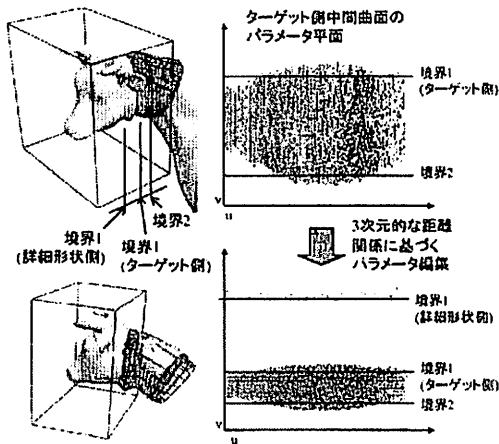


図5. ペースト操作時のパラメータ座標編集

最後に、中間曲面のパラメータ平面上でベース曲面と詳細形状の境界部分をつなぐメッシュ形状を作成してペースト操作が完了する。中間曲面のパラメータ座標は u 方向を循環的に扱う必要があるため、図6に示すように、三角形分割をする際に u 方向の境界部分に仮想頂点を作成し、それらの接続を制約としてパラメータ平面で三角形分割を実行する。その後、対応する仮想頂点でメッシュ形状の接続を再構築して完全な接続を実現する。

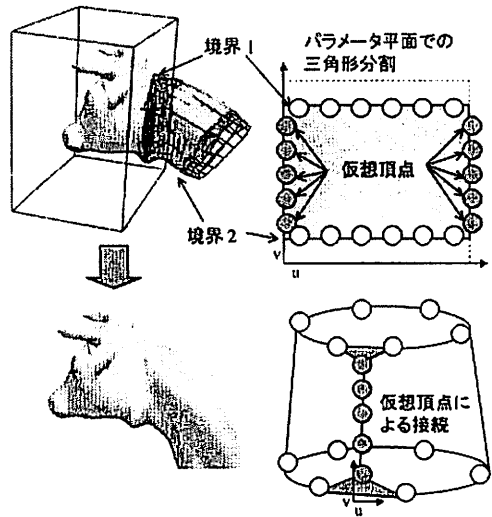


図6. ペースト操作時の三角形分割

5 結果と考察

図7に円筒型中間曲面を用いたペースト操作の結果例を示す。提案手法では、従来の平面的な中間曲面では実現が難しかった編集が無理なく実現できていることがわかる。

手法の制限としては、ベース曲面を近似するパラメトリック曲面をフィッティングで求めているため、近似精度が曲面の自由度に依存し、与えられた形状を厳密に通過できない場合が生じる。

6 まとめ

本論文では、メッシュ形状の関心領域を対象としたパラメータ化とカット&ペースト編集に中間曲面という概念を導入して、詳細形状の変形制御と配置制御を効率的に行う手法を提案した。また、円筒型の中間曲面を導入することにより、従来のカット&ペースト手法では難しかった種類の編集も可能とし、編集のバリエーションを増やせることを示した。

今後は、より高品質な形状編集を実現するための中間曲面についての研究と、中間曲面のバリエーションについての研究、およびパラメータ空間内での詳細形状の編集のバリエーションについての研究を行う予定である。

参考文献

- [1] Biermann, H., Martin, I., Bernardini, F., Zorin, D., "Cut-and-paste editing of multiresolution surfaces", *ACM Trans. Graph.*, 21(3), pp.312-321, 2002.
- [2] Botsch, M., Kobbelt, L., "An intuitive framework for real-time freeform modeling", *ACM Trans. Graph.*, 23(3), pp.630-634, 2004.

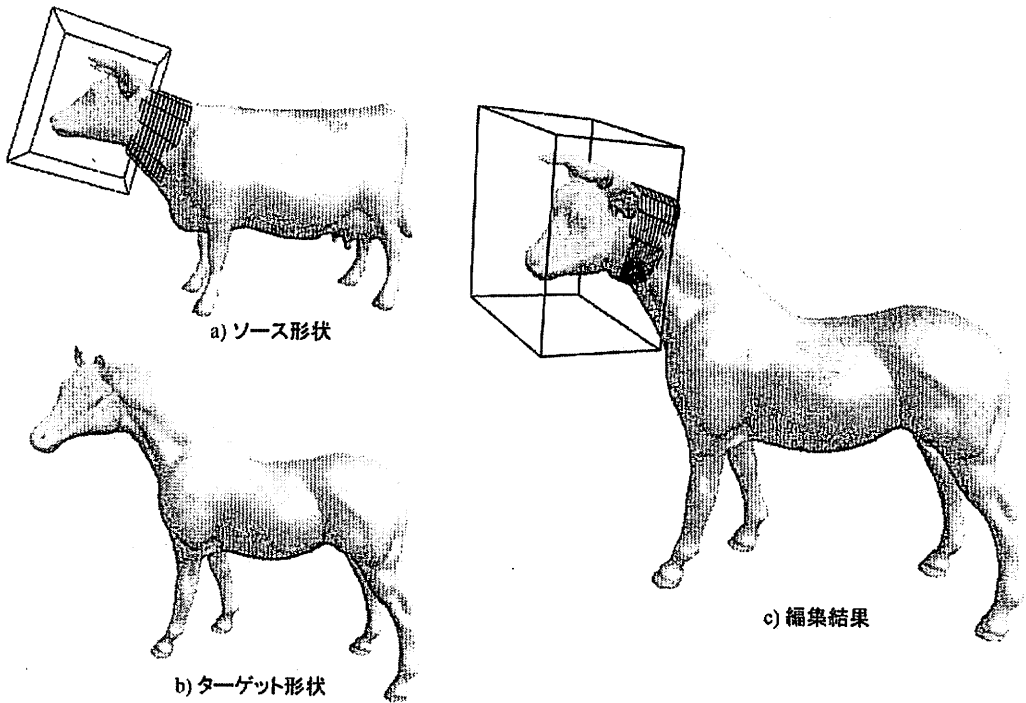


図 7. 円筒型中間曲面を用いたペースト操作例

- [3] Floater, M.-S., Hormann, K., "Surface parameterization: A tutorial and survey", In *Advances on Multiresolution in Geometric Modeling*, Springer-Verlag, 2004.
- [4] Fu, H., Tai, C.-L., Zhang, H., "Topology-free cut-and-paste editing over meshes", *Proc. of the Geometric Modeling and Processing 2004*, pp.173-182, 2004.
- [5] Funkhouser, T., Kazhdan, M., Shilane, P., Kiefer, W., Tal, A., Rusinkiewicz, S., Dobkin, D., "Modeling by example", *ACM Trans. Graph.*, 23(3), pp.652-663, 2004.
- [6] Furukawa, Y., Masuda, H., Miura, K., Yamato, H., "Cut-and-paste editing based on constrained B-spline volume fitting", *Proc. of Computer Graphics International 2003*, pp.222-225, 2003.
- [7] 古川慈之, 増田宏, 大和裕幸, "パラメトリックボリウ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", *情報処理学会論文誌*, 46(3), pp.870-878, 2005.
- [8] 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.
- [9] Levy, B., "Dual domain extrapolation", *ACM Trans. Graph.*, 22(3), pp.364-369, 2003.
- [10] Mann, S., Yeung, T., "Cylindrical surface pasting", *Geometric Modeling '99*, pp.233-248, 1999.
- [11] Sorkine, O., Lipman, Y., Cohen-Or, D., Alexa, M., Rossil, C., Seidel, H.-P., "Laplacian surface editing", *Proc. of the Symposium on Geometry Processing 2004*, pp.175-184, 2004.
- [12] Sorkine, O., "Laplacian mesh processing", *Proc. of EUROGRAPHICS 2005*, pp.53-70, 2005.
- [13] Suzuki, H., Sakurai, Y., Kanai, T., Kimura, F., "Interactive mesh dragging with an adaptive remeshing technique", *The Visual Computer*, 16, pp.159-176, 2000.
- [14] Weiss, V., Andor, L., Renner, G., Varady, T., "Advanced surface fitting techniques", *Computer Aided Geometric Design*, 19, pp.19-42, 2002.
- [15] Yu, Y., Zhou, K., Xu, D., Shi, X., Bao, H., Guo, B., Shum, H.-Y., "Mesh editing with Poisson-based gradient field manipulation", *ACM Trans. Graph.*, 23(3), pp.644-651, 2004.