

Self-organizing Deformable Modelを用いた メッシュモデル間の直接写像による三次元モーフィング

松井 瞬[†] 諸岡 健一^{††} 長橋 宏^{†††}

本論文では、自己組織化特徴マップの概念を用いた可変モデル (SDM:Self-organizing Deformable Model) によるメッシュモデルの三次元モーフィング法を提案する。SDM は、変形の目標とする曲面 (目標曲面) 上の頂点の分布を学習し、自己組織的に変形を繰り返す可変モデルである。SDM は、変形先の形状を限定しない可変モデルであり、様々なモデルを扱うことができる。本手法では、モーフィングのためのモデル間の対応決定に SDM を用いる。また、ユーザの指定により、モデルの構造的特徴を考慮した対応決定が可能である。本手法のモーフィングにおける有効性を、いくつかの実験を通じて検証した。

3-D Morphing by Direct Mapping between Mesh Models Using Self-organizing Deformable Model

SHUN MATSUI [†], KEN'ICHI MOROOKA ^{††} and HIROSHI NAGAHASHI ^{†††}

This paper presents a new method for 3-D morphing between mesh models using a Self-organizing Deformable Model(SDM). The SDM is a mesh model which deforms by learning vertex coordinates on target surface. Since the SDM doesn't limit target shapes, we can use various mesh models as SDMs. Therefore, we use SDM for determining correspondence between models. Also, SDM enables user to define the correspondence by model features. We demonstrated some examples for morphing.

1. ま え が き

コンピュータグラフィクスにおけるアニメーション作成技術の一つに、モーフィングがある。これは、時間経過に伴い、ある物体モデル (初期モデル) から別の物体モデル (最終モデル) への滑らかな形状変化を行う処理である。二次元画像のモーフィングに比べ、三次元の形状変化を直接扱う三次元モーフィングは、視点に応じて画像を生成することができ、視覚的効果も大きい。ため、映画、ゲーム、バーチャルリアリティなどで広く利用されている。

モーフィングの対象となる物体モデルの記述法は様々であり、これまでに各記述によるモデルに対するモーフィング法が提案されている⁵⁾。そのなかでも、三角形パッチの集合である三角メッシュモデル (以下、メッシュモデルと呼ぶ) による記述は、複雑な形状も比較的精度よく表現できるなどの利点があることから、物体モデルの記述法として広く用いられている。

メッシュモデルのモーフィングを実現するためには、対応点決定問題と補間問題を解く必要がある。対応点決定問題とは、メッシュを構成する頂点間の位相的要素、頂点位置などの幾何的要素の異なる二つのメッシュモデルに対して、頂点間の一対一の対応関係を構築することである。一方、補間問題とは、初期モデルから最終モデルへの変形途中の形状である中間モデルを作ることである。現在、メッシュモデルを対象とするモーフィング手法は多く提案されており¹⁾、主に前者の対応点決定問題を課題としている。本論文では、種数 0 のメッシュモデルを扱うモーフィングのための対応点決定問題について議論する。

種数 0 のメッシュモデルのモーフィングを行う手法の一つに、写像関数を用いてメッシュモデルを平面や

[†] 東京工業大学大学院 総合理工学研究所, 〒 226-8503 横浜市緑区長津田町 4259, E-mail:matsui@isl.titech.ac.jp

Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama, 226-8503

^{††} 九州大学 デジタルメディシン・イニシアティブ, 〒 812-8582 福岡市東区馬出 3-1-1, E-mail: morooka@digital.med.kyushu-u.ac.jp, Digital Medicine Initiative, Kyushu University, 3-1-1 Maidashi, Higashi-ku, Fukuoka, 812-8582

^{†††} 東京工業大学大学院 理工学研究所, E-mail: longb@isl.titech.ac.jp Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

球に埋め込み，合成メッシュを作ることでモデル間の対応を構築する手法^{2),3)}がある．メッシュの合成とは，写像面に埋め込んだメッシュモデルを重ね合わせることで，二つのメッシュモデルのデータ構造をあわせ持ち，各頂点が複数の座標値を持つ一つのメッシュモデルを生成することである．この場合，メッシュの合成により，メッシュのデータ量が増えてしまうという問題がある．また，写像関数による埋め込みでは，ユーザによる写像の制御が困難となる．

この方法としては，メッシュモデルを低解像度で表現し，モデル間の対応づけを行う方法⁶⁾がある．また，あるモデルから別のモデルへのパラメータ化を行い，それを用いてモデル間の対応づけを行う方法¹³⁾も提案されている．しかし，これらの方法では，ユーザが各モデルごとに低解像度のモデルを作成する必要がある．したがって，ユーザはこのモデル作成の経験を必要とする．

そこで，本論文では，自己組織化可変モデル (SDM: Self-organizing Deformable Model)¹⁰⁾ による新たなモーフィング手法を提案する．SDM はメッシュモデルであり，目標曲面上の頂点 (以下，制御点と呼ぶ) の分布を学習して自己組織的に変形を繰り返すことにより，目標曲面の形状を獲得する可変モデルである．まず，初期モデルおよび最終モデルを SDM として，共通の目標曲面へと写像する．次に，この写像により得られた結果を比較し，単純な対応づけを行う．そして，この対応づけにより得られた初期モデルを SDM，最終モデルを目標曲面として，再び自己組織的に変形を行う．以上の変形により得られるメッシュモデルは，頂点数，メッシュ数，位相的關係において，初期モデルと同じデータ構造を持ち，かつ最終モデルの形状を近似したメッシュモデルとなる．そのため，初期モデルと得られた近似モデルの同じインデックスを持つ頂点を対応づけ，その頂点座標を補間することにより，中間モデルを作成することができる．また，モーフィングの際には，二つのメッシュモデルが持つ特徴を考慮しつつ，ユーザが対応づけを制御できることが必要とされる．本手法では，SDM の写像において，特徴的な点に対する拘束を設けることにより，ユーザによる対応づけの制御を実現する．

2. Self-organizing Deformable Model

2.1 SDM と目標曲面の表記

SDM は，目標曲面上の制御点の分布を学習しながら変形を繰り返す可変モデルである．一方，目標曲面は，多数の制御点の集合により表現される曲面であり，

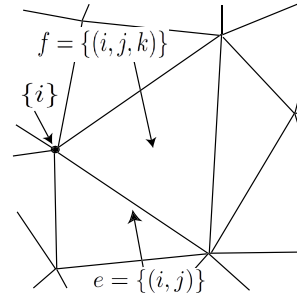


図1 メッシュの構成．

各制御点は位相近傍系により定義される法線ベクトルを持つ．本論文では，SDM と目標曲面は，ともに種数 0 のメッシュモデルである．文献⁷⁾ の表記を用いると，メッシュモデルは次のような二つの集合の集合体 \mathcal{M} で表される．

$$\mathcal{M} = (\mathcal{V}, \mathcal{K}) \quad (1)$$

\mathcal{V} は頂点座標の集合 $\mathcal{V} = \{v_i \mid i \in \mathcal{K}_v\}$ であり， \mathcal{K}_v は \mathcal{M} の位相情報を持つ複体 \mathcal{K} の部分集合である．複体 \mathcal{K} は，頂点 $\{i\} \in \mathcal{K}_v$ ，エッジ $e = \{(i, j)\} \in \mathcal{K}_e$ ，三角パッチ $f = \{(i, j, k)\} \in \mathcal{K}_f$ の三つの単体の部分集合 $\mathcal{K}_v, \mathcal{K}_e, \mathcal{K}_f$ から構成される．エッジ e は頂点 i, j を両端にもち，三角パッチ f は頂点 i, j, k の三点からなる．頂点の位相近傍の定義については，文献¹⁰⁾ と同様の定義を用いる．

2.2 SDM の変形

メッシュモデルである SDM の変形は，式 (1) における位相情報 \mathcal{K} を保持しつつ，目標曲面上の頂点の分布を学習し，SDM 上の頂点の位置情報 \mathcal{V} を変化させることである．変形前の SDM を \mathcal{M}^S ，変形後の SDM を \mathcal{M}^D とすると，これらの関係は位相保存写像 Φ によって

$$\Phi: \mathcal{M}^S = (\mathcal{V}^S, \mathcal{K}^S) \rightarrow \mathcal{M}^D = (\mathcal{V}^D, \mathcal{K}^S) \quad (2)$$

と表すことができる．一般に，この写像は非線形であり，一意ではない．SDM は，自己組織化特徴マップ⁴⁾ の枠組みで自己組織的に形状を変化させることにより，このような位相保存写像を実現する．

以下，目標曲面を \mathcal{M}^G ， \mathcal{M}^S から \mathcal{M}^G への SDM による写像を $\Phi_{S \rightarrow G}$ として，変形後の SDM \mathcal{M}^D を $\mathcal{M}^D = \Phi_{S \rightarrow G}(\mathcal{M}^S)$ (3) と表すこととする．この処理により得られるメッシュモデル \mathcal{M}^D は， \mathcal{M}^S と同じデータ構造を持ち，かつ，その形状は目標曲面 \mathcal{M}^G の近似形状となる．

次に，SDM による変形を行う際に，SDM \mathcal{M}^S と目標曲面 \mathcal{M}^G との距離 $D(\mathcal{M}^S, \mathcal{M}^G)$ を

$$D(\mathcal{M}^S, \mathcal{M}^G) = \frac{1}{3|\Gamma_i||\Omega_i|} \sum_{i \in \mathcal{M}^S} E(v_i) \quad (4)$$

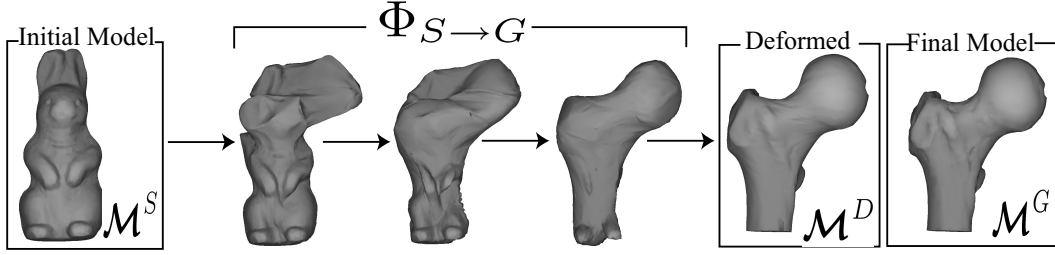


図 2 初期モデルから最終モデルへの直接写像 .

と定義する . ここで , Γ_i は , 頂点 i を含む SDM のパッチ $f_m \in \mathcal{K}_f$ の集合であり , Ω_i は頂点 i に対応する制御点 $p_u \in \Omega_i$ の集合である . また , $|\Gamma_i|$ および $|\Omega_i|$ は , 各集合に含まれる要素数である .

$E(v_i)$ は , SDM 上の各頂点 i について定義されるエネルギー関数であり ,

$$E(v_i) = \sum_{f_m \in \Gamma_i} \sum_{p_u \in \Omega_i} \{H(p_u, f_m)\}^2 \quad (5)$$

とする . v_i は SDM 上の頂点 i の座標である . また , 関数 $H(p_u, f_m)$ は , 制御点 p_u とパッチ f_m との距離を返す関数である . SDM は , メッシュモデルの位相情報を保持しつつ , 式 (4) に示す距離 $D(\mathcal{M}^S, \mathcal{M}^G)$ を最小とするように変形を行う .

SDM の変形アルゴリズムは , 次の通りである .

[Algorithm 1]

- (1) SDM \mathcal{M}^S の内部に目標曲面 \mathcal{M}^G を配置する .
- (2) 変形回数を表すパラメータ t を $t = 0$ に設定する .
- (3) \mathcal{M}^G 上から , 一つの制御点 $p^{(t)}$ をランダムに選ぶ .
- (4) $p^{(t)}$ との間の符号付距離 $SD(v_i, p^{(t)})$ が正で , かつ $SD(v_i, p^{(t)})$ を最小とする SDM の頂点を , 勝者頂点 i^* とする .

$$i^* = \arg \min_{i \in \mathcal{K}} SD(v_i, p^{(t)}) \quad (6)$$

ここで , $SD(v_i, p^{(t)})$ を

$$SD(v_i, p^{(t)}) = n^{(t)} \cdot (v_i - p^{(t)}) \quad (7)$$

と定義する . 符号付距離を用いたのは , 目標曲面の内部に SDM が侵入するのを避けるためである . また , $n^{(t)}$ は , 制御点 $p^{(t)}$ の法線ベクトルである .

- (5) 勝者頂点 i^* とその近傍頂点の頂点座標を , 次のように更新する .

$$v_i \leftarrow v_i + \epsilon(t) \lambda(i|i^*) \Delta v_i \quad (8)$$

ここで , $\epsilon(t)$ は学習率であり , v_i を $p^{(t)}$ へ近付ける程度を表すパラメータである . $\lambda(i|i^*)$ は近傍関数と呼ばれ , 勝者頂点 i^* との位相距離に

応じた近傍頂点 i の適応度を表す . 本論文では , $\epsilon(t)$, $\lambda(i|i^*)$ を次のように定義する .

$$\begin{aligned} \epsilon(t) &= \epsilon_s \left(\frac{\epsilon_f}{\epsilon_s}\right)^{\frac{t}{T}} \\ \lambda(i|i^*) &= \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{L(i, i^*)}{\sigma(t)}\right)^2\right\} \\ \sigma(t) &= \sigma_s \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_s}\right)^{\frac{t}{T}} \end{aligned} \quad (9)$$

$L(i, i^*)$ は , 勝者頂点 i^* と頂点 i との間の最短パスを表す位相距離である . ϵ_s (σ_s) , ϵ_f (σ_f) は , ϵ (σ) の初期値と最終値である . Δv_i は , SDM の変形のための各頂点の移動ベクトルであり ,

$$\Delta v_i = p^{(t)} - v_i \quad (10)$$

とする .

- (6) $t \leftarrow t + 1$ とする .

- (7) $t < T$ であれば , ステップ 3 に戻る . そうでなければ , ステップ 8 へ進む .

- (8) SDM と目標曲面との距離 $D(\mathcal{M}^S, \mathcal{M}^G)$ が

$$D(\mathcal{M}^S, \mathcal{M}^G) < \tau \quad (11)$$

を満たすならば , ステップ 9 に進む . そうでなければステップ 2 に戻る . τ は閾値である .

- (9) 各頂点 v_i について , 移動後の頂点位置の候補 \tilde{v}_i を , 次の式により選択する .

$$\tilde{v}_i = v_i + w(p_j - v_i); \quad p_j \in \Omega_i \quad (12)$$

ここで , Ω_i は , 頂点 i に対応する制御点の集合である . w は , 重みであり , v_i を p_j へ近付ける程度を表す .

- (10) 全候補のうち , 式 (5) に示すエネルギーが最小となる候補を , 次の頂点位置 v_i とする .

$$v_i \leftarrow v_i^* = \arg \min_{\tilde{v}_i} E(\tilde{v}_i) \quad (13)$$

- (11) \mathcal{M}^S と \mathcal{M}^G との距離 $D(\mathcal{M}^S, \mathcal{M}^G)$ が

$$D(\mathcal{M}^S, \mathcal{M}^G) < \xi \quad (14)$$

を満たすならば , 処理を終了する . そうでなければ , ステップ 9 に戻る . ξ は閾値である .

3. メッシュモデル間の対応決定法

3.1 SDM による対応点決定法

本手法では , SDM を用いて初期モデルを変形させる

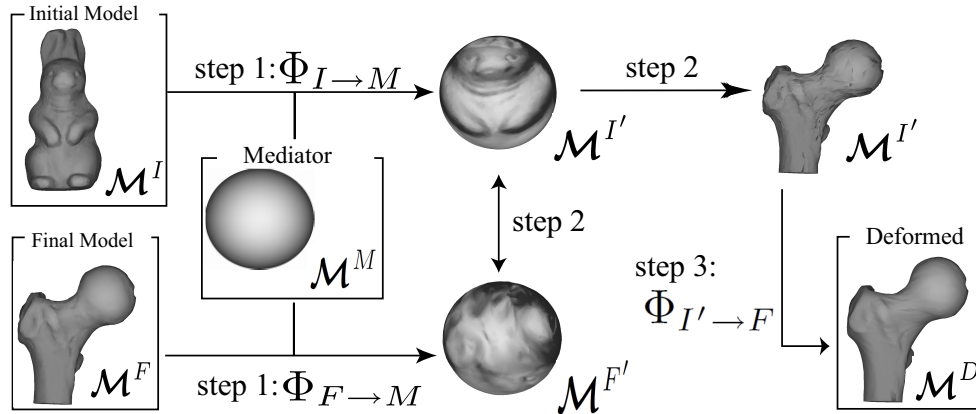


図 3 媒介モデルを用いたメッシュモデルの直接写像.

ことにより、初期モデルと同じデータ構造を持ち、かつ最終モデルの形状を近似したメッシュモデルを獲得する。したがって、図 2 に示すように、初期モデルを SDM、最終モデルを目標曲面として、Algorithm 1 に示す写像を行い、SDM から直接に目標曲面の近似形状を獲得する方法が考えられる。この場合、写像先を直感的に推測することができるため、後述するユーザによる変形の制御が容易に可能となる。

しかし、図 2 に示す初期モデル、最終モデルのような凹凸の少ないモデルであれば、上記の方法を用いることができるが、メッシュモデルの形状は、球や円柱のような単純なものから、人や動物など複雑なものまで、その形状は様々である。また、同じ種類のモデル、例えば人間のメッシュモデルを例にしても、腕や足の長さ、顔の大きさ、姿勢など、そのモデルの構造は大きく異なる。そのため、初期モデルから最終モデルへの SDM による写像を考えた場合、直接に最終モデルを目標曲面として写像を行うことは、その結果がモデルの形状に大きく依存し、メッシュモデルの形状が複雑なほど困難な写像となる。

そこで、上記の直接写像のように、初期モデルを直接に最終モデルへと写像するのではなく、一度それらのメッシュモデルを SDM とし、共通のメッシュモデル (以下、媒介モデルと呼ぶ) を目標曲面として SDM による写像を行い、その曲面上で単純な対応づけを行う。前述した初期モデルを最終モデルへと直接写像する方法に比べ、計算量を必要とするが、複雑な形状に対しても有効である。さらに、SDM は写像面を限定しない可変モデルであるため、媒介モデルとして様々な形状を扱うことができる。この操作と SDM の写像とを組み合わせることにより、初期モデルを最終モデルへと写像する。

3.2 SDM と媒介モデルを用いた対応決定法

図 3 に、前節で述べた SDM の変形と媒介モデルによる対応づけの流れを示す。

[Algorithm 2]

- (1) 初期モデル \mathcal{M}^I 、最終モデル \mathcal{M}^F を SDM とし、媒介モデル \mathcal{M}^M を目標曲面として、Algorithm 1 に示す SDM による写像 Φ を行う。

$$\begin{aligned} \mathcal{M}^{I'} &= \Phi_{I \rightarrow M}(\mathcal{M}^I) \\ \mathcal{M}^{F'} &= \Phi_{F \rightarrow M}(\mathcal{M}^F) \end{aligned} \quad (15)$$

これにより得られるメッシュモデル $\mathcal{M}^{I'}$ 、 $\mathcal{M}^{F'}$ は、 \mathcal{M}^I 、 \mathcal{M}^F と同じデータ構造を持ち、その形状はそれぞれが媒介モデル \mathcal{M}^M の形状を近似したモデルとなる。

- (2) メッシュモデル $\mathcal{M}^{I'}$ 上の各頂点 x_i について、
(i) 最もユークリッド距離の近い $\mathcal{M}^{F'}$ 上の頂点 y_j を選び、 j を i に対応する頂点インデックス l とする。

$$l = \arg \min_j d(x_i, y_j) \quad (16)$$

ここで、 $d(x_i, y_j)$ は、頂点 x_i, y_j の間のユークリッド距離である。

- (ii) 最終モデル \mathcal{M}^F 上の頂点 l の座標 z_l を $\mathcal{M}^{I'}$ の頂点 i の新たな頂点座標 x_i とする。

$$x_i \leftarrow z_l \quad (17)$$

- (3) ステップ 2 までで得られた $\mathcal{M}^{I'}$ を SDM、 \mathcal{M}^F を目標曲面として、 $\mathcal{M}^{I'}$ の SDM による写像

$$\mathcal{M}^D = \Phi_{I' \rightarrow F}(\mathcal{M}^{I'}) \quad (18)$$

を行い、最終モデルの近似メッシュモデル \mathcal{M}^D を得る。

ここで、ステップ 2 の処理においては、 $\mathcal{M}^{F'}$ の頂点と $\mathcal{M}^{I'}$ の頂点との間には、必ずしも一対一の対応が求まるわけではなく、多くの場合、一対多の対応となる。したがって、ステップ 2(ii) の処理を経て得られる

モデルは、複数の頂点が同じ座標値を持つこともありうる。これは、メッシュモデル上の複数の頂点が重なっており、頂点間の位相情報が保たれていない状態である。この状態で得られる対応関係を用いてモーフィングを行った場合、メッシュモデル上の複数のパッチ同士が交差し、モデルの一部が内部に入り込む自己交差を起こすこととなる。

そこで、ステップ2で得られる \mathcal{M}^I に対して、ステップ3でSDMの変形 $\Phi_{I \rightarrow F}$ を再び行うことにより、 \mathcal{M}^I 上の各頂点は、勝者頂点との位相距離に応じた移動を繰り返し、最終的にメッシュの折り重なりのないモデル \mathcal{M}^D を獲得する。以上の処理により、 \mathcal{M}^D は、 \mathcal{M}^I と同じデータ構造を持ち、かつ \mathcal{M}^F の形状を近似したメッシュモデルとなる。

3.3 構造的特徴を考慮した変形

物体メッシュモデルのモーフィングにおいて重要なことは、ユーザの指定による柔軟な対応づけが可能となることである。例えば、二つの顔のメッシュモデルのモーフィングを行うことを考える。この場合、目は目へ、鼻は鼻へと形状変化するというような構造的特徴を生かしたモーフィングを行いたいという要請がある。したがって、前節までに示したメッシュモデル間の対応決定の処理において、ユーザが対応づけの制御を行えることが望ましい。

そこで、SDMの枠組では、目標曲面上の特定の制御点 h_i に対して、SDM上の頂点 g_i を勝者頂点として固定することにより、対応づけの制御を実現する。すなわち、ユーザが N 個の頂点インデックス対の集合 \mathcal{X} を与える。

$$\mathcal{X} = \{(g_1, h_1), (g_2, h_2), \dots, (g_N, h_N)\} \quad (19)$$

ここで、頂点インデックス対 (g_i, h_i) は、対応するべきとしてユーザにより選ばれた頂点の組である。これは、目標曲面上の特定の制御点 h_i が選択された場合、SDM上の頂点 g_i を必ず勝者頂点とすることを意味する。したがって、式(6)における勝者頂点の決定を、次のように新たに定義する。

$$i^* = \begin{cases} g_i; & (\text{if } \mathbf{p}^{(t)} = \mathbf{p}_{h_i}) \\ \arg \min_{i \in \mathcal{K}} SD(\mathbf{v}_i, \mathbf{p}^t); & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (20)$$

このように、ユーザの指定した頂点对について拘束を加えることにより、SDM上の頂点の写像先を指定することができ、ユーザによる対応づけの制御が可能となる。

3.4 モーフィングにおける中間モデルの生成

前節までに示した方法を用いて、初期モデル \mathcal{M}^I を最終モデル \mathcal{M}^F へ写像することにより、 \mathcal{M}^F の近似

モデルであるメッシュモデル \mathcal{M}^D を得る。この \mathcal{M}^D と \mathcal{M}^I の同じインデックスの頂点同士を対応づけることにより、 \mathcal{M}^D と \mathcal{M}^I との頂点間の一対一の対応関係が構築される。したがって、中間モデルの頂点座標 $m_i^{(t)}$ は、次のように得られる。

$$m_i^{(t)} = (1 - f(t)) \mathbf{q}_i + f(t) \mathbf{r}_i \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (21)$$

ここで、 $\mathbf{q}_i, \mathbf{r}_i$ は、それぞれ $\mathcal{M}^I, \mathcal{M}^D$ 上の頂点 i の座標である。また、時間関数 $f(t)$ は任意の関数であり、 $0 \leq f(t) \leq 1$ の範囲で滑らかに変化する。

4. 実験

提案するモーフィング手法の有効性を検証するために、6種類のメッシュモデルを用いて計算機実験を行った。

4.1 実験環境

まず、図4に実験において使用したメッシュモデルを、表1にメッシュモデルの頂点数およびパッチ数を示す。また、それらのメッシュモデルに対し、表2に示す組合せのように初期モデル、最終モデル、媒介モデルを設定した。また、媒介モデルは、球、四足動物の形状を模擬したモデル、人間の形状を模擬したモデルの三つのメッシュモデルを用いた。Algorithm 1に示した各パラメータは、それぞれ $\epsilon_s = 0.5, \epsilon_f = 0.005, \sigma_s = 3.0, \sigma_f = 0.1$ と設定した。

表1 メッシュモデルの構成

	# vertex	# patch
Rabbit	6,706	13,408
Balljoint	3,429	6,854
Pig	14,058	28,112
Lion	8,154	18,304
Armadillo	17,299	34,584
Santa	7,580	15,156

表2 メッシュモデルの組み合わせ

	Ex.1	Ex.2	Ex.3
初期モデル	Rabbit	Pig	Armadillo
最終モデル	Balljoint	Lion	Santa
媒介モデル	Sphere	Animal	Cylinderman

4.2 メッシュモデル間の直接写像

図5に、本手法により、初期モデルを最終モデルへと写像した結果を示す。これらは、変形前の初期モデルの各頂点の持つ法線ベクトルを用いてシェーディングを行ったものであり、その形状は最終モデルの近似形状となっている。このように、SDMによる位相保存写像により、初期モデルは位相情報を保存しつつ、最終モデルへと写像される。

本実験では、Pig Lion, Armadillo Santaの写

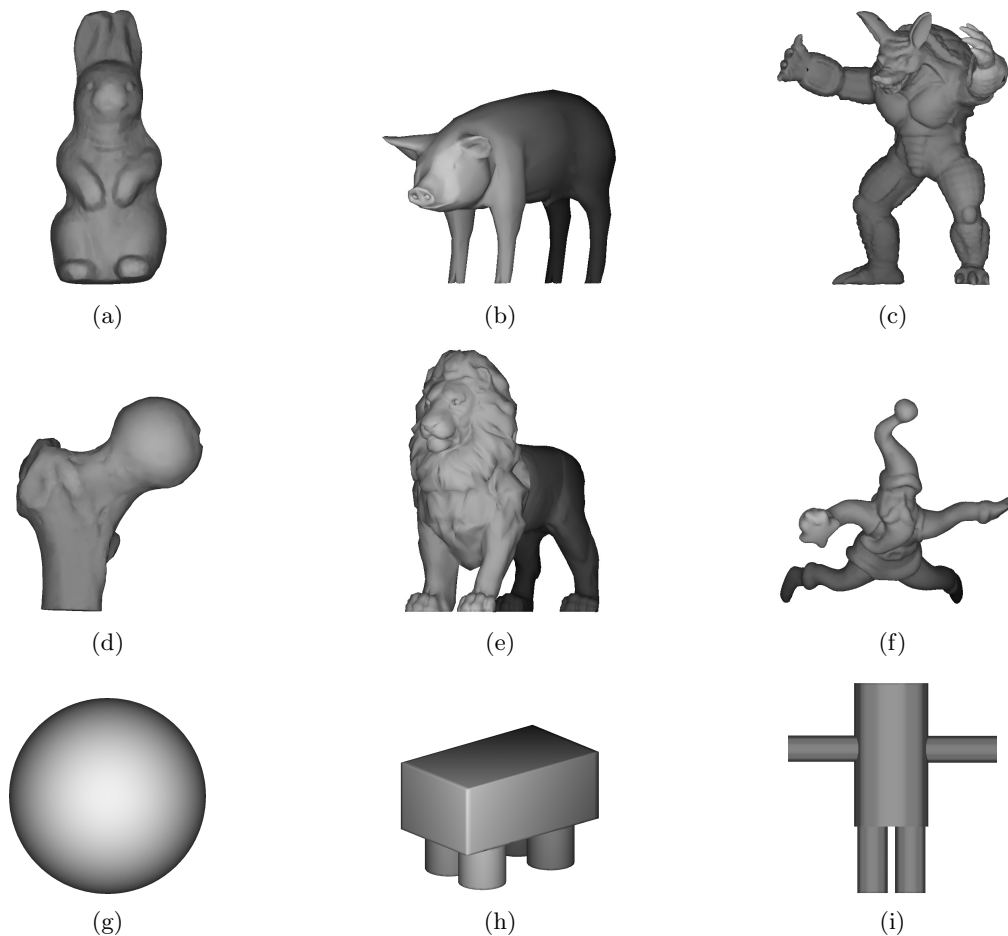


図 4 本手法を適用したメッシュモデル; 上段: 初期モデルとしたメッシュモデル (a) Rabbit, (b) Pig, (c) Armadillo; 中段: 最終モデルとしたメッシュモデル (d) Balljoint, (e) Lion, (f) Santa; 下段: 媒介モデルとしたメッシュモデル (g) Sphere, (h) Animal, (i) Cylinderman .

像において, 初期モデルおよび最終モデルと同様のスケルトン構造を持つと考えられるメッシュモデルを, 媒介モデルとして用いている. これにより, 単純に球などのプリミティブなメッシュモデルを媒介モデルとして用いるよりも, ユーザが分かりやすく, かつ制御しやすい対応づけが可能となる.

4.3 モーフィング

本論文では, 式 (21) に示す時間関数 $f(t)$ は

$$f(t) = t \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (22)$$

とし, 線形な補間によって中間モデルを生成した.

図 6 は, Pig から Lion への顔の部分のモーフィングを拡大したものである. この組み合わせでは, 式 (19) に示す頂点のインデックスとして, 目や鼻など 9 つの頂点の組を与え, 拘束として用いている. 初期モデルから最終モデルへの写像において, そのような構造的

特徴を生かした対応づけを行うことができるため, 目は目へ, 鼻は鼻へとといった自然なモーフィングを行うことができる.

図 7 に Rabbit から Balljoint へのモーフィングを示す. メッシュモデル Rabbit と Balljoint との間には, 特に意味的に対応すべき部分はないとして, 式 (19) に示す拘束は設定せずに写像を行っている. このように, ユーザの指定が特にならない場合でも, 位相情報を保存しつつモデル間の対応関係を構築できるため, 自己交差などの不具合を起こさずにモーフィングを行うことができる.

図 8,9 に Pig から Lion へのモーフィングおよび Armadillo から Santa へのモーフィングを示す. 上記のように, これらの対応づけにおいてはスケルトン構造の似た媒介モデルを用いている. そのため, 拘束を与

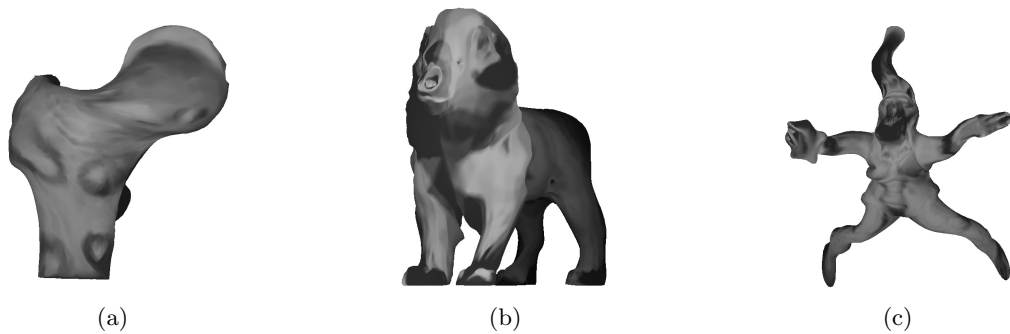


図 5 SDM による初期モデルから最終モデルへの写像結果; (a) Rabbit Pig, (b) Lion, (c) Armadillo Santa.

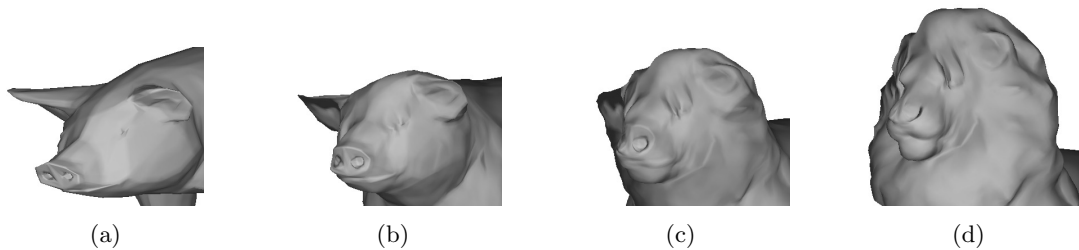


図 6 拘束により制御された部分のモーフィング; (a) $t = 0$, (b) $t = \frac{1}{3}$, (c) $t = \frac{2}{3}$, (d) $t = 1$.

えた頂点以外にも、手、足、胴体などの対応づけをおおまかに制御することができる。

5. 結 論

本論文では、SDM を用いてメッシュモデルを別のメッシュモデルへと直接写像し、モーフィングを行う新たな手法を提案した。まず、初期モデルと最終モデルをそれぞれ媒介モデルへと写像し、写像後の状態で単純な対応決定を行う。そして、初期モデルの頂点座標に、対応する最終モデルの頂点座標を代入し、そこから再び SDM による写像を行うことにより、メッシュモデル間の直接写像を実現する。

このように、対応づけにおいて、従来法のようにメッシュの合成や低解像度のモデル作成を行う必要がない。また、SDM と目標曲面の特定の頂点同士に拘束を与えることにより、物体の構造的な特徴を考慮したモーフィングが可能となる。さらに、本手法を用いて、一つのメッシュモデルのデータ構造で複数のメッシュモデルを記述することにより、メッシュデータを統一的に扱うことができる。そのため、複数のメッシュモデル間のモーフィングを行うマルチターゲットモーフィング⁸⁾が可能となる。

今後の課題としては、本手法をベースとした種数非

0 のメッシュモデルのモーフィング^{9),15)} の実現が挙げられる。また、今回は、特徴的な点のみに拘束を設けて写像を行っている。これを物体を構成する部分領域ごとにラベルづけを行い、各領域に含まれる頂点ごとに拘束を設けるように拡張し、よりモデルの特徴を正確に反映した対応づけ¹²⁾を行うことが必要であると考えられる。さらに、本手法で提案したメッシュモデル間の対応づけを用いることにより、ある物体モデルのアニメーションを他の物体モデルへと移植する変形移植^{11),14)} などへの SDM の応用を現在検討中である。

参 考 文 献

- 1) Alexa, M.: Recent Advances in Mesh Morphing, Technical report, Interactive Graphics Systems Group (2002).
- 2) 金井崇, 鈴木宏正, 木村文彦: 円盤と位相同型な任意の三角形メッシュ間の合成法, 情報処理学会論文誌, Vol.40, pp.4106-4116 (1999).
- 3) Kent, J, R., Carlson, W. and Parent, R.: Shape Transformation for Polyhedral Objects, *SIG-GRAPH '92 Proceedings*, pp.47-54 (1992).
- 4) Kohonen, T.(ed.): *Self-Organizing Maps*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York (1996).
- 5) Lazarus, F. and Verroust, A.: Three-dimensional metamorphosis : a survey, *The Visual Com-*

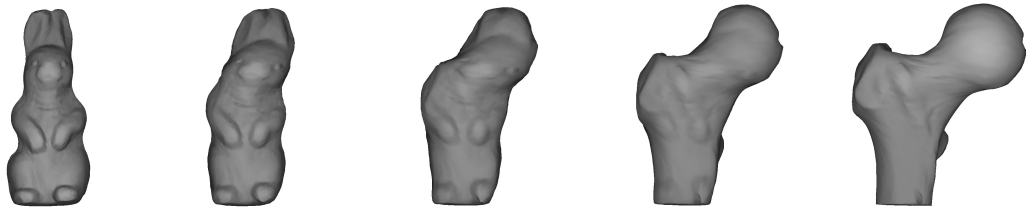


図 7 Rabbit から Balljoint へのモーフィング.

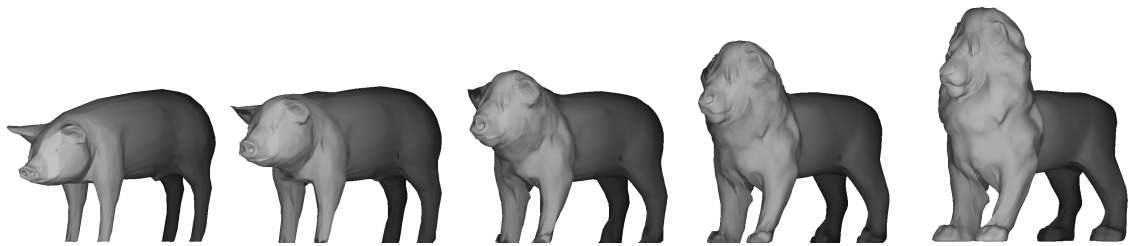


図 8 Pig から Lion へのモーフィング.

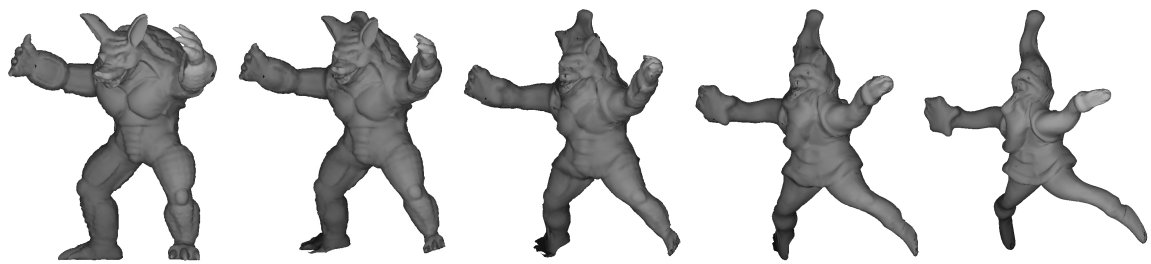


図 9 Armadillo から Santa へのモーフィング.

- puter, pp.373–389 (1998).
- 6) Lee, A., Dobkin, D., Sweldens, W. and Schröder, P.: Multiresolution Mesh Morphing, *SIGGRAPH '99*, pp.343–350 (1999).
 - 7) Lee, A., Sweldens, W., Schröder, P., Cowsar, L. and Dobkin, D.: MAPS: Multiresolution Adaptive Parameterization of Surfaces, *SIGGRAPH '98 Proceedings*, pp.95–104 (1998).
 - 8) Michikawa, T., Kanai, T., Fijita, M. and Chiyokura, H.: Multiresolution Interpolation Meshes, *In 9th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, IEEE*, pp.60–69 (2001).
 - 9) 諸岡健一, 長橋宏: 可変モデルを用いた異なる位相を持つ 3次元物体モデルのモーフィング, *映像情報メディア学会誌*, Vol.58, pp.713–720 (2004).
 - 10) 諸岡健一, 長橋宏: 任意曲面への 3次元物体メッシュモデルの写像法, *情報処理学会研究報告*, CVIM-150, pp.99–106 (2005).
 - 11) Noh, J. and Neumann, U.: Expression cloning, *SIGGRAPH '01 Proceedings*, pp.277–288 (2001).
 - 12) Schölkopf, B., Steinke, F. and Blanz, V.: Object Correspondence as a Machine Learning Problem, *Proceedings of 22th International Conference on Machine Learning* (2005).
 - 13) Schreiner, J., Asirvatham, A., Praun, E. and Hoppe, H.: Inter-Surface Mapping, *SIGGRAPH '04 Proceedings*, pp.870–874 (2004).
 - 14) Sumner, R. and Popovic, J.: Deformation Transfer for Triangle Meshes, *SIGGRAPH '04 Proceedings*, pp.399–405 (2004).
 - 15) Takahashi, S., Kokojima, Y. and Ohbuchi, R.: Explicit Control of Topological Transitions in Morphing Shapes of 3D Meshes, *Proc. Pacific Graphics 2001*, pp.70–79 (2001).