

## 競合学習法による物体メッシュ間のパラメータ化

松井 瞬<sup>†</sup> 諸岡 健一<sup>††</sup> 長橋 宏<sup>†††</sup>

東京工業大学 九州大学 東京工業大学

ある物体形状を表す三角メッシュモデルを曲面へと写像するパラメータ化は、メッシュモデリングにおける要素技術の一つであり、多くのCGアプリケーションに利用することができる。本稿では、このパラメータ化を物体メッシュ間で行う手法を提案する。提案法では、競合学習法の一つである自己組織化マップと形状復元法の一つである最小2乗メッシュをベースとして用いている。これにより、メッシュの構造的な特徴を考慮したパラメータ化を行うことができる。

### Competitive Learning Based Cross Parameterization between Triangular Meshes

SHUN MATSUI<sup>†</sup>, KEN'ICHI MOROOKA<sup>††</sup> and HIROSHI NAGAHASHI<sup>†††</sup>

Tokyo Institute of Technology Kyushu University Tokyo Institute of Technology

Parameterization which maps a triangular mesh to a certain domain is a key technique in mesh modeling and useful for various CG applications. In this paper, we propose a new method for mapping one mesh to another. Our method is based on a learning algorithm of *Self-organizing Map* and *Least-squares Mesh*. These techniques enable us to make a parameterization taking account of structural features of meshes.

#### 1. ま え が き

ある物体形状を表す三角メッシュモデル（以下、メッシュと呼ぶ）を曲面（以下、目標曲面と呼ぶ）へと写像するパラメータ化は、メッシュモデリングにおける要素技術の一つである。メッシュ上の頂点間のトポロジーを保存しつつ目標曲面へと写像することでメッシュ上の頂点と目標曲面上の点の座標値（パラメータ）との間に一対一の対応関係が構築される。これにより、メッシュに対して施す処理を目標曲面上のパラメータに対する処理に置き換えることができ、再メッシュ化<sup>3)</sup>などのアプリケーションに要する計算コストを大幅に削減するこ

とができる。また、メッシュ間の滑らかな形状補間を行うモーフィング<sup>1),8)</sup>では、パラメータ化によるメッシュ間の対応関係の構築が必要不可欠であり、その他にもテクスチャマッピング<sup>17)</sup>など、パラメータ化の応用例は数多い。

これまでのパラメータ化手法では、平面パラメータ化<sup>4),5)</sup>や球体パラメータ化<sup>7),15)</sup>に代表されるように、目標曲面としては、主に平面や球などのプリミティブが用いられてきた。これに対して、最近はそのようなプリミティブに限らず、メッシュを様々な曲面へと写像するための研究がなされている。本論文では、特にメッシュ間でパラメータ化を行う方法について検討する。提案法では、競合学習法<sup>6)</sup>の一つである自己組織化マップ (*Self-organizing Map*, SOM)<sup>9)</sup>の学習アルゴリズムおよび形状復元法の一つである最小2乗メッシュ (*Least-squares Mesh*, LSM)<sup>19)</sup>を用いており、ユーザにより与えられた特徴点対応を満たしつつパラメータ化を行うことができる。

#### 2. 関連研究

メッシュ間のパラメータ化に関する研究は、主にメッ

<sup>†</sup> 東京工業大学大学院 総合理工学研究科, 〒 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

<sup>††</sup> 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, Higashiku, Fukuoka, 812-8582

<sup>†††</sup> 東京工業大学大学院 理工学研究科, E-mail:longb@isl.titech.ac.jp Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

シユの頂点間の対応関係の構築を目的として行われている。具体的なアプローチとして、同じデータ構造を持つ低解像度メッシュをあらかじめ対象とするメッシュごとに作成し、それを規則的に細分割フィッティングしていくことにより、オリジナルのメッシュの形状を近似した近似メッシュ間で対応関係を構築する方法がある。例えば、Praun らは、対象とするメッシュの形状と同じスケルトン構造を持つベースメッシュを作成し、メッシュを細分割することで近似メッシュ間のパラメータ化を実現した<sup>16)</sup>。同様の手法としては、Michikawa らの手法<sup>13)</sup> や Lin らの手法<sup>12)</sup> がある。これらの方では、パラメータ化の対象とするメッシュの形状を近似した近似メッシュ間で一対一の対応関係が作られる。

もう一つの方法は、平面パラメータ化や球体パラメータ化と同様に、メッシュの各頂点をもう一方のメッシュ上に写像するアプローチである。例えば、Lee らはモーフイングを目的としたメッシュ間のパラメータ化の方法を提案した<sup>11)</sup>。この方法では、ユーザの作成した低解像度メッシュの対応関係を用いて、オリジナルのメッシュの頂点をもう一方のメッシュ上に配置する。しかし、この方法はユーザの作成する低解像度メッシュにその精度が大きく依存する。一方、Allen らは、複数の人体のメッシュの一つをベースメッシュとして、他のメッシュとのエネルギー最小化に基づきパラメータ化を行った<sup>2)</sup>。この方法は、メッシュ間のエネルギーを距離誤差、滑らかさ誤差、特徴点誤差の三つの誤差関数の線形形で定義し、これを最小化することによってパラメータを求めている。ここでは、対象を人体のメッシュに限定しており、単純なエネルギー関数最小化に基づくパラメータ化であるため、すべてのメッシュが同じ姿勢であったり、類似した形状であることが必要となる。

より最近の研究としては、Kraevoy らの方法が挙げられる<sup>10)</sup>。この方法では、特徴点对応を元に自動作成されるベースメッシュを用いて、メッシュがいくつかの部分領域に分けられ、その対応を元にパラメータ化を行っている。この方法は複数のメッシュの幾何を同じデータ構造で記述することを目的としたパラメータ化には不向きである。一方、Schreiner らはベースメッシュのような共通の幾何形状を必要とせずに、特徴点のみの対応からメッシュ間でパラメータ化を行う手法を提案した。しかし、この方法は最適化処理の計算が複雑で、かつ対象が二つのメッシュ間だけに限られる<sup>18)</sup>。

本稿では、ユーザが与えた特徴点对応に基づき、メッシュ間でパラメータ化を行う手法を提案する。具体的には、二つのメッシュのうち、一方のメッシュを目標曲面とし、もう一方のメッシュの各頂点を目標曲面上に当て

はめる。ベースとして、競合学習法の一つである自己組織化マップおよび形状復元法の一つである最小 2 乗メッシュを用いる。ユーザは特徴点对応のみを与えればよく、メッシュの形状に適したベースメッシュを作成する必要はない。

### 3. LSM によるパラメータ初期値の計算

以下では、パラメータ化を行うメッシュを  $M^S$ 、目標曲面とするメッシュを  $M^T$  と表す。まず、前提として、ユーザにより  $M^S$  と  $M^T$  の間に対応する  $m$  個の特徴点ペア  $(s_i, t_i)$  の集合

$$\mathcal{F} = \{(s_1, t_1), (s_2, t_2), \dots, (s_m, t_m)\} \quad (1)$$

が与えられているとする。この特徴点对応をもとに、提案法では、Sorkine らが提案した最小 2 乗メッシュ<sup>19)</sup> をベースとして、 $M^S$  の各頂点のパラメータ初期値を計算する。LSM はメッシュの持つ複数の特徴点座標とメッシュのトポロジーから、ラプラシアン表現を最小 2 乗の意味で満たすメッシュを生成する手法である。ある頂点  $v_i$  に関するラプラシアン  $\mathcal{L}(v_i)$  は次式で表される。

$$\mathcal{L}(v_i) = v_i - \frac{1}{d_i} \sum_{j \in N_i} v_j \quad (2)$$

ここで、 $d_i$  は頂点  $i$  に接続するエッジ数 (価数) であり、 $N_i$  は頂点  $i$  の直接位相近傍にある頂点の集合である。すべての頂点  $i$  について、 $\mathcal{L}(v_i) = 0$  が成り立つと仮定すると、これは次式のような線形システムで表すことができる。

$$Lx = 0, \quad Ly = 0, \quad Lz = 0 \quad (3)$$

$x, y, z$  は各頂点の  $x, y, z$  座標が並ぶ  $n \times 1$  の列ベクトルであり、 $L$  は

$$L_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ -\frac{1}{d_i} & j \in N_i \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4)$$

を要素として持つ  $n \times n$  の行列である。

次に、式 (1) に基づき、新たな線形システムを定義する。 $M^S$  の特徴点  $s_i$  に対応する目標曲面  $M^T$  上の特徴点  $t_i$  の座標を  $(x_{t_i}, y_{t_i}, z_{t_i})$  とし、これを用いて、 $(n+m) \times n$  の行列  $A$  および  $(n+m) \times 1$  の列ベクトル  $b$  を

$$A = \begin{pmatrix} L \\ F \end{pmatrix}, \quad F_{ij} = \begin{cases} 1 & j = t_i, (s_i, t_i) \in \mathcal{F} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$b_k = \begin{cases} 0 & k \leq n \\ x_{t_{k-n}} & n < k \leq n+m \end{cases} \quad (6)$$

と定義する。この行列  $A$  およびベクトル  $b$  を用いて

$$Ax = b \quad (7)$$

という線形システムを考える。このシステムを解くた

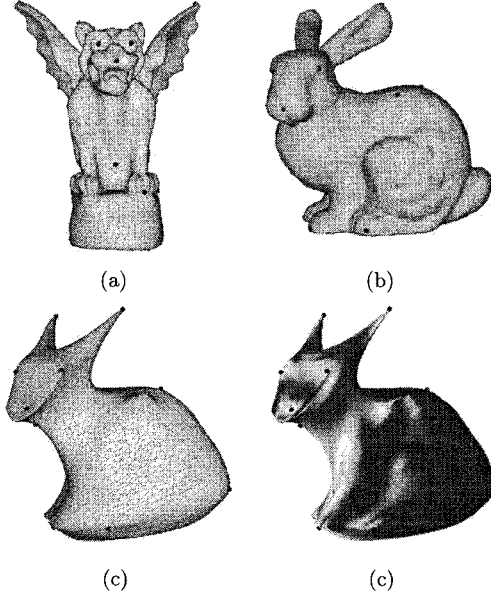


図1 LSMによる初期パラメータの計算。  $M^S$  と  $M^T$  には、目や鼻など対応する特徴点を17点与えた。(a)  $M^S$ , (b)  $M^T$ , (c) 初期パラメータ化結果, (d) (c) への  $M^S$  の法線マップ。

めに

$$\|Ax - b\|^2 = \|Lx\|^2 + \sum_{(s_i, t_i) \in \mathcal{F}} |x_{s_i} - x_{t_i}|^2 \quad (8)$$

を最小化する  $x$  を求める。この解は

$$x = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (9)$$

として、解析的に一意に求めることができる。また、他の列ベクトル  $y, z$  についても同様の計算で求めることができる。以上の処理により、 $M^S$  は  $M^T$  との特徴点対応に基づき、特徴点  $s_i$  に関しては対応する特徴点  $t_i$  に近い位置に、それ以外の点に関しては  $\mathcal{L}(v_i) = 0$  を最小2乗の意味で満たすこととなる。これにより、姿勢が大きく違ったり、対応する部位のスケールが異なるメッシュ間であっても、SOMを用いたパラメータ化の前に準最適な位置にメッシュの頂点を配置することができる。図1にLSMによる初期パラメータの計算例を示す。LSMによるパラメータ初期値の計算の目的は、目標曲面に対する準最適なパラメータを求めることであり、提案法では、この初期値から、さらにSOMの枠組を用いてパラメータを最適化する。

#### 4. 自己組織化可変モデルによるパラメータ最適化

##### 4.1 概要およびアルゴリズム

提案法では、LSMによる初期パラメータの計算後、

さらにSOMの枠組を用いてパラメータを最適化する。ここでは、SOMの概念を用いた形状変形モデルである自己組織化可変モデル (Self-organizing Deformable Model, SDM) を用いる<sup>14)</sup>。SDMとは、自己組織化マップと外部エネルギー最小化の枠組でメッシュの形状を変形させ、目標曲面へとメッシュを当てはめる可変モデルである。自己組織化マップにおけるネットワークの持つ参照ベクトルと入力信号の関係を、3次元空間中のSDMとするメッシュ頂点座標と目標曲面上の頂点(以下、制御点と呼ぶ)の座標の関係に置き換え、制御点の座標値を学習することによりその形状を目標曲面へと当てはめていく。LSMを用いて初期パラメータが与えられた  $M^S$  をSDM,  $M^T$  を目標曲面として、次のようなアルゴリズムでパラメータを最適化する。

- (1) 繰り返し回数を表すパラメータ  $t$  を  $t = 0$  に設定する。
- (2) ランダムに制御点  $c \in M^T$  を一つ選択する。
- (3)  $c$  に対する勝者頂点  $w \in M^S$  を一つ選択する。
- (4) 勝者頂点  $w$  およびその位相近傍頂点  $w'$  の座標値を次式で更新する。

$$v_w \leftarrow v_w + \epsilon(t) (p_c - v_w) \quad (10)$$

$$v_{w'} \leftarrow v_{w'} + \epsilon(t) \lambda(h, t) (p_c - v_{w'}) \quad (11)$$

- (5) ステップ2~4を  $\tau$  回繰り返す。
- (6)  $t < T$  であれば、 $t \leftarrow t + 1$  としてステップ2に戻る。そうでなければステップ7へ進む。
- (7) SDMと目標曲面の間の外部エネルギーを最小化する。

##### 4.2 勝者頂点および制御点の選択と特徴点

SDMのアルゴリズムでは、ランダムに選択された制御点に近い頂点を勝者頂点とする。すなわち、

$$w = \arg \min_{i \in M^S} \|v_i - p_c\|^2 \quad (12)$$

という基準で勝者頂点  $w$  を決める。これにより、ランダムに選択された制御点に近い頂点の座標が順次更新されていき、対応する制御点の位置に近付くことになる。一方、モーフィングなどのアプリケーションでは、特徴部位の対応づけが重要であり、例えば顔のモーフィングでは、目は目へ、鼻は鼻へと変化するように制御できることが望ましい。したがって、パラメータ化の段階で対応する部位が対応する部位へと写像される必要がある。SDMのアルゴリズムでは、制御点の選択確率および制御点に対する勝者頂点を制御することによりこれを実現する。式(1)で定義した特徴点対応をもとに、式(12)を

$$w = \begin{cases} s_i & c = t_i \\ \arg \min_{i \in M^S} \|v_i - p_c\|^2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

とする。これにより、目標曲面から特徴点である制御点

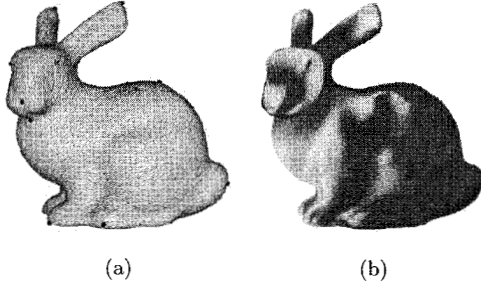


図2 SDMによるパラメータ最適化。(a)パラメータ化結果、(b) (a)への $M^S$ の法線マップ。

$t_i$ が選ばれた場合には、必ずそれに対応するSDMの特徴点 $s_i$ が $t_i$ へと近付いていくことになる。また、SDMは制御点の選択確率を変化させることにより、目標曲面上の特定の部分にSDMの点を密にしたり、疎にするような制御も可能である。今回の実験では、特徴点である制御点は他の制御点よりもより多く選択されるように設定した。

### 4.3 頂点座標の更新

式(10)、(11)に示すように、SDMの変形においては、勝者頂点だけでなく、その位相近傍にある頂点の座標値も更新される。式中の関数 $\epsilon(t)$ は学習率であり、頂点を制御点へと近付く程度を表し、 $t$ の増加に伴い減少する単調減少関数である。本論文では、

$$\epsilon(t) = \epsilon_s \left( \frac{\epsilon_f}{\epsilon_s} \right)^{\frac{t}{T}} \quad (14)$$

と定義する。また、 $\lambda(h, t)$ は近傍関数と呼ばれ、頂点 $i$ と勝者 $w$ の位相距離 $h(w', w)$ に応じた座標値 $v_i$ の適応度を表す。本論文では、これを次のように定義した。

$$\lambda(h, t) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{h(w', w)}{\sigma(t)} \right)^2 \right\} \quad (15)$$

$$\sigma(t) = \sigma_s \left( \frac{\sigma_f}{\sigma_s} \right)^{\frac{t}{T}} \quad (16)$$

しかし、 $h(w', w)$ には頂点間の位相距離のみの情報が含まれ、ユークリッド距離は考慮されていない。そこで、本稿では、 $h(w', w)$ を次のように定義しなおす。

$$h(w', w, c) = \frac{\sqrt{\|p_c - v_w\|^2}}{\sqrt{\|p_c - v_{w'}\|^2}} \quad (17)$$

これにより、近傍頂点 $w'$ は更新前の勝者頂点 $w$ との距離の比に応じた座標更新を行い、元々の頂点の距離関係と位相関係の両方をできるだけ保ちつつ更新を行うことができる。図2にSDMによるパラメータ化結果を示す。

## 5. 物体メッシュ間のパラメータ化

提案手法の有効性を検証するために、いくつかの物体

メッシュを用いて実験を行った。今回の実験では、C言語を用いて計算機(CPU:2.8[GHz], メモリ1[GB])上で実装した。式(14)、(16)の定数はそれぞれ $\epsilon_s = 0.5$ ,  $\epsilon_f = 0.05$ ,  $\sigma_s = 2.0$ ,  $\sigma_f = 0.1$ ,  $T = 5$ と設定し、 $\tau$ は目標曲面とするメッシュの頂点数とした。また、座標更新の対象は勝者頂点の第3近傍にある頂点までとした。

まずはじめに、図1(a)のメッシュを図1(b)のメッシュへと写像するパラメータ化を行った。図中の点は各メッシュに与えた特徴点を表す。図1(c)はLSMを用いて計算された初期パラメータであり、図1(d)は図1(a)のメッシュの法線をマッピングしたものである。これらの結果から、特徴点に関しては対応する特徴点に近い位置に配置され、その他の頂点に関しては、ラプラシアン表現を最小2乗の意味で満たす、すなわちメッシュが滑らかになるように各頂点が配置されていることがわかる。しかし、この状態でのパラメータは、準最適なパラメータにすぎず、この段階でのメッシュの形状は目標曲面とは大きく異なる。

そこで、このときのパラメータを初期値として、SDMによるメッシュの形状変形を用いて、さらにパラメータを目標曲面へと近付ける。図2(a)がSDMによるパラメータ最適化の結果であり、図2(b)は図1(a)のメッシュの法線を図2(b)の結果にマッピングしたものである。図1(b)と図2(a)から、単純にメッシュを目標曲面へと当てはめるだけでなく、最終的に対応する特徴点位置にパラメータ化されていることがわかる。このように、式(13)で定義した拘束を設けることによって、対応する特徴点同士が近づいていくように頂点座標の更新を制御することができる。

このような特徴点対応の制御が可能なパラメータ化をメッシュ間で行うことによって、様々なアプリケーションへの応用が考えられる。例えば、二つのメッシュの頂点間の対応づけをパラメータ化をもとに行うことで、頂点に付随する座標、法線、曲率、テクスチャなどの特性をメッシュ間でマッピングすることが可能である。図3に提案法を用いたパラメータ化によるテクスチャマッピングの例を示す。ここでは、各頂点がテクスチャ情報を持つ図3(a)のメッシュに図3(b)のメッシュをパラメータ化することで、頂点間の対応づけを行った。提案法は、特徴点対応を考慮したパラメータ化であるため、頭部のテクスチャは頭部へと、足部のテクスチャは足部へとマッピングすることができる。さらにメッシュの形状や姿勢が大きく異なる場合も対象としているため、人と動物のようなメッシュ間でもパラメータ化を行うことができる。

また、パラメータ化の結果は $M^S$ と同じデータ構造

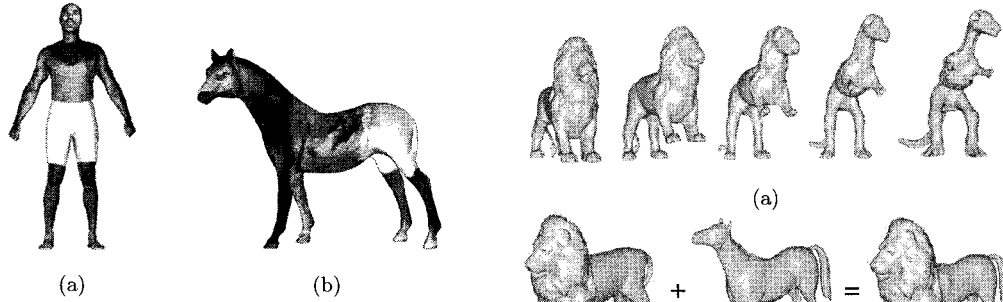


図3 パラメータ化を用いたテクスチャマッピング。(a) テクスチャ情報を持つメッシュ、(b) 他のメッシュへのテクスチャマッピング。

を持ち、かつその形状は  $M^T$  の近似形状となっている。したがって、パラメータ化前後の同じインデックスを持つ頂点同士を対応づけることにより、メッシュ間の形状補間を行うことができる。図4にその一例を示す。図4(a)はパラメータ化を用いたモーフィングであり、特徴点対応を考慮したパラメータ化を行っているため、意味的に対応する部位が滑らかに変形するモーフィングが可能となる。また、メッシュ間でパラメータ化を行うことで、図4(b)のようにメッシュの一部を他のメッシュの形状に置き換えるようなブレンディングも可能である。さらに、提案法はあるメッシュを基準として、複数のメッシュへとパラメータ化することができるため、図4(c)のようにいくつかのメッシュの形状を同じデータ構造で表現し、ブレンドするようなモーフィングも可能である。

メッシュ間のパラメータ化は頂点間だけでなく、メッシュを構成する三角パッチ間の対応をつけることも可能である。これにより、提案法によるパラメータ化の結果を、あるメッシュの動作データを他のメッシュへと移植する Deformation Transfer<sup>20)</sup> に応用することも可能である。図5にその一例を示す。図5(a)のメッシュと図5(b)のメッシュの間の動作データはメッシュを構成する三角パッチのアフィン変換の集合で表される。ここで、図5(c)のメッシュを図5(a)のメッシュへとパラメータ化し、パッチを対応づけることにより、図5(d)に示すような類似した動きを持つ新たなメッシュを生成することができる。

以上のように、特徴的対応を考慮したパラメータ化をメッシュ間で行うことで、さまざまアプリケーションへの応用が可能である。

## 6. 結論と今後の課題

本稿では、メッシュ間でパラメータ化を行うための新たな手法を提案した。提案法は、SOMの学習概念を

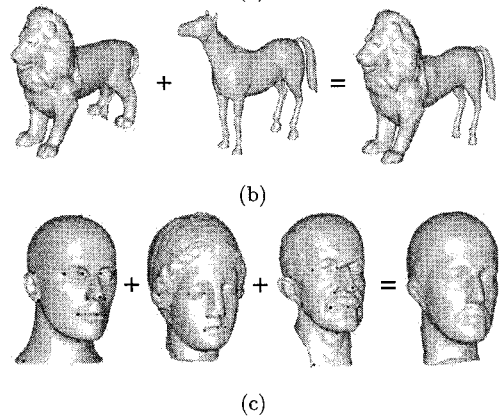


図4 パラメータ化を用いた形状補間。(a) 二つのメッシュ間のモーフィング、(b) 形状のブレンディング、(c) 複数のメッシュ間でのパラメータ化を用いたモーフィング。

ベースとした可変モデルである SDM およびラプラシアン表現に基づく形状復元法である LSM を用いており、これらにより単にメッシュ間でパラメータ化を行うだけでなく、特徴点対応に基づきパラメータ化を制御することが可能である。また、入力として必要なデータは、メッシュと特徴点情報のみであり、対象とするメッシュごとにその形状に適したベースメッシュを作成する必要はない。さらに、提案法は3つ以上のメッシュ間でパラメータ化を行うこともでき、これにより複数のメッシュの形状を一つのメッシュのデータ構造で記述することも可能である。

今後の課題として、まず一つに、パラメータ化の精度と特徴点の関係の解析が考えられる。提案法は特徴点情報が入力として必要であるため、メッシュ間でロバストにパラメータ化を行うためには、特徴点の与え方にも注意する必要がある。また、他の課題としては、それぞれのアプリケーションに適したパラメータ化の最適化法の提案がある。例えば、テクスチャマッピングにおいては、パラメータ化の際にテクスチャの歪みなどを評価する必要があり、これらの問題についても今後検討していきたい。

## 謝 辞

今回の実験で使用したメッシュデータは、スタンフォー

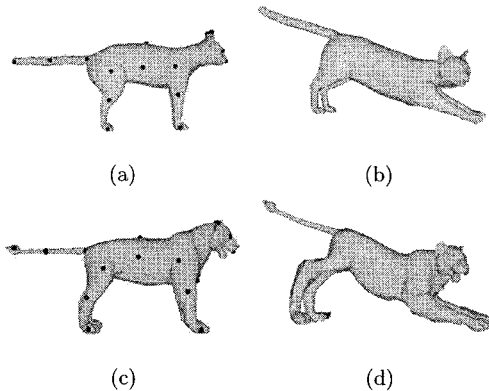


図5 Deformation Transfer.

ド大, ワシントン大, マサチューセッツ工科大, Cyberware 社の提供によるものである。ここに謝意を表する。

### 参考文献

- 1) Alexa, M.: Merging polyhedral shapes with scattered features, *SMI '99: Proceedings of the International Conference on Shape Modeling and Applications*, IEEE Computer Society, pp.202-210 (1999).
- 2) Allen, B., Curless, B. and Popovic, Z.: The space of human body shapes: reconstruction and parameterization from range scans, *ACM Trans. Graph.*, Vol.22, No.3, pp.587-594 (2003).
- 3) Alliez, P., Meyer, M. and Desbrun, M.: Interactive geometry remeshing, *SIGGRAPH '02: Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, New York, NY, USA, ACM Press, pp.347-354 (2002).
- 4) Desbrun, M., Meyer, M. and Alliez, P.: Intrinsic parameterizations of surface meshes, *Eurographics conference proceedings*, Vol.21, No.2, pp.209-218 (2002).
- 5) Floater, M.S.: Parametrization and smooth approximation of surface triangulations, *Comput. Aided Geom. Des.*, Vol. 14, No. 3, pp. 231-250 (1997).
- 6) Fritzke, B.: Some Competitive Learning Methods, Technical report, Ruhr-Universität Bochum (1997).
- 7) Gu, X., Wang, Y., Chan, T.F., Thompson, P.M. and Yau, S.-T.: Genus zero surface conformal mapping and its application to brain surface mapping., *IEEE Trans. Med. Imaging*, Vol.23, No.8, pp.949-958 (2004).
- 8) Kanai, T., Suzuki, H. and Kimura, F.: Meta-

morphosis of arbitrary triangular meshes, *IEEE Comput. Graph. Appl.*, Vol.20, No.2, pp.62-75 (2000).

- 9) Kohonen, T.(ed.): *Self-Organizing Maps*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York (1996).
- 10) Kraevoy, V. and Sheffer, A.: Cross parameterization and compatible remeshing of 3D models, *ACM Trans. Graph.*, Vol.23, No.3, pp.861-869 (2004).
- 11) Lee, A. W.F., Dobkin, D., Sweldens, W. and Schröder, P.: Multiresolution mesh morphing, *SIGGRAPH '99: Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp.343-350 (1999).
- 12) Lin, J.L., Chuang, J.H., Lin, C.C. and Chen, C.C.: Consistent parametrization by quinary subdivision for remeshing and mesh metamorphosis, *GRAPHITE '03: Proceedings of the 1st international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia*, ACM Press, pp.151-158 (2003).
- 13) Michikawa, T., Kanai, T., Fujita, M. and Chiyokura, H.: Multiresolution interpolation meshes, *PG '01: Proceedings of the 9th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, IEEE Computer Society, pp.60-69 (2001).
- 14) 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, Vol.150, pp.99-106 (2005).
- 15) Praun, E. and Hoppe, H.: Spherical parametrization and remeshing, *ACM Trans. Graph.*, Vol.22, No.3, pp.340-349 (2003).
- 16) Praun, E., Sweldens, W. and Schröder, P.: Consistent mesh parameterizations, *SIGGRAPH '01: Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press, pp.179-184 (2001).
- 17) Sander, P. V., Snyder, J., Gortler, S. J. and Hoppe, H.: Texture mapping progressive meshes, *SIGGRAPH '01 Proceedings*, pp.409-416 (2001).
- 18) Schreiner, J., Asirvatham, A., Praun, E. and Hoppe, H.: Inter-surface mapping, *ACM Trans. Graph.*, Vol.23, No.3, pp.870-877 (2004).
- 19) Sorkine, O. and Cohen-Or, D.: Least-squares meshes, *Proceedings of Shape Modeling International*, IEEE Computer Society Press, pp.191-199 (2004).
- 20) Sumner, R. W. and Popović, J.: Deformation transfer for triangle meshes, *ACM Trans. Graph.*, Vol.23, No.3, pp.399-405 (2004).