論　文

シルエット画像に基づいて個人体形を反映する3次元形状モデルの変形法 — 仮想試着室の実現にむけて

今尾　公二[†]　　亀田　能成[††]　　美濃　導彦[††]　　池田　克夫[†]

A Deformation Method of Body Shape Models Based on Silhouette Images of Persons For Virtual Fitting Rooms

Koji IMAO[†], Yoshinari KAMEDA[††], Michihiko MINOH[††], and Katsuo IKEDA[†]

あらまし
個人の体形を表現する個人体形モデルを，予め用意した原形モデルとその個人のシルエット画像にから変形によって作成する手法を考案した．個人体形モデルは，ユーザが仮想空間で試着を行える仮想試着システムにおいて使用することを想定している．現在，このような目的のための個人体形モデルは，大掛かりな3次元計測装置を用いるか，多数の体形モデルを用意して一番近い形状のものを使用する．本手法では，変形により個人体形モデルを生成するため，精度や，予め必要とする体形モデル数が少ないという点で優れている．原形モデルからの普遍的な形状特徴を維持しつつシルエット画像からの個人体形の形状情報を反映するため，シルエット画像と変形結果との間に輪郭一致制約を，原形モデルと変形結果の間に局所相似制約を与えて変形する．局所相似制約とは，人体の各部分の局所的な形状は，個人間で相似形であるという仮定を適用するものである．本手法を，実在の女性の3次元計測データから得たシルエット画像と原形モデルに適用し，各個人の体形差と比較して小さい誤差で結果が得られることを確認した．

キーワード　体形モデル，3次元変形，シルエット画像，局所相似制約，仮想試着室

1. はじめに

個人の体形を表現する個人体形モデルを，予め用意した原形モデルとその個人のシルエット画像にから変形によって作成する手法について述べる．

布シミュレーション技術の発達に伴って，コンピュータグラフィックスによる衣服を着た人体アニメーションの表現が可能となってきており[1]~[4]，これらの技術を利用した仮想試着室システムが構築されている．ユーザの体形を表現するデータと衣服のデータから，布シミュレーション技術により衣服を着た状態の画像を生成できる仮想試着室システムでは，ユーザが現実に衣服を着替えることなしに，様々な視点やシーンの中で自分がその衣服を着た画像を見ることができる．また，ユーザの体形データ，衣服のデータさえあれば画像を生成することができることから，オンラインでの使用にも有望である．

このような仮想試着室システムの要素の一つとして，個人体形の3次元形状を表現するための3次元モデル，個人体形モデルが必要である．特に物理学に基づく布シミュレーションを行うためには，個人体形モデルは個人体形の3次元形状を正確に表現していなければならない．そこで，あらかじめ用意した原形モデルを個人体形データに応じて変形することで，個人体形モデルを得る手法を提案する．個人体形データとしては，ユーザの正面と側面からのシルエット画像を用いる．原形モデルは，実際の人体を3次元測定したデータから作成した個人体形モデルを代表として用意する．

現在，正確な個人体形モデルを作るためには，大がかりで高価な3次元計測装置を使用する必要がある．また，人体のような複雑な形状にを測定した形状データは，ノイズの影響を強く受けるため，見栄えを重視

[†] 京都大学大学院情報学研究科，京都市
Graduate School of Informatics, Kyoto University, Kyoto, 606-8501 Japan
[††] 京都大学総合情報メディアセンター，京都市
Center for Information and Multimedia Studies, Kyoto University, Kyoto, 606-8501 Japan

する仮想試着室システムにおいては，整形などに手数がかかる．さらに，測定したデータ量が大きいことも問題である．

様々な体形に対応するために多数の体形モデルを用意し，ユーザの体形に近いものを選びだす方法も考えられる．しかし，個人体形はバリエーションが多く，それらに対して十分な精度を持った体形モデルをすべて用意するのは，データ量の点で困難である．

これらの方法に比較して，本論文で提案する変形による手法では，カメラ等で撮影した画像と，限られた数の原形モデルを用いるだけで個人体形モデルを作成できる．変形により，個人体形のバリエーションを吸収するため，仮想試着室システムに使用するのに十分な精度を持たせることができる．ただし，より高い精度の個人体形モデル作成のためには，体形を分類し，それぞれに対して原形モデルを用意する必要がある．その場合でも，変形で対応できる範囲を考えることで，原形モデルの数を減らすことができる．

個人体形モデルを作るための変形法としては，原形モデルに含まれる普遍的な人体の形状特徴を維持しつつ，シルエット画像から得られる個人体形の形状特徴を反映させる必要がある．一方で，各個人間で人体各部の構造は共通であるため，体形全体の違いは，各部の形状の違いよりも，各部の大きさや長さ，幅の違いが重要である．ここでは，原形モデルと各個人の体形との間に部分毎に局所的な相似の関係を仮定して変形する手法を提案する．

2. 変形による個人体形モデルの生成

本研究では，人体形状を表現する 3 次元モデルとして，辺で接続された多角形の集合で物体の表面を近似するパッチモデルを用いる．特に，変形によって，ねじれ等の矛盾が生じにくいように，すべての多角形は分割して三角形の集合にしたものを用いる．パッチモデルは，他の関数を用いた表現形式 [5] ~ [7] と比較して，人体のような複雑な形状でもある程度の近似誤差で簡単に表現することができる．また，変形の程度が小さい場合には，パッチモデルを構成する頂点の座標を移動させるだけで容易に変形でき，その結果は見た目が重要な応用においても，十分実用的である．

人体モデルの変形手法としては，FFD を用いたり [9]，超 2 次関数表現や一般化円筒の性質を利用するもの [5], [10] が提案されている．本手法では予め原形モデルを用意し，2 枚のシルエット画像から得られる輪郭一致制約と，原形モデルと変形結果モデルの間に仮定する局所相似制約に基づいて原形モデルを変形する変形法を提案する．この手法は次のような点で優れている．まず，シルエット画像に適合するように変形する際に制限が少ない．その上で，標準モデルの形状をできるだけ維持しつつ変形することができる．特に人体においては，各部分の形状はほぼ同じで，それらの大きさ，長さの比率が個人間の体形の違いになっていることが多く, そういった形状の違いを変形で実現するのに適している．また，このような性質により，人体の形状として不自然な変形結果が出力される可能性が少なくなる．

同様に画像における人体の輪郭から，人体の各部の 3 次元形状を得る研究の一つとして [13] が挙げられる．この研究では，予め人体形状に関する知識を与えず，3 次元形状を得ているが，人体がある一定の動作をする多くの枚数の画像の系列を用いる必要があることや，画像から得られない部分は補間によっている欠点がある．それに対して本手法では，人体の構造は一般的に個人間で共通であることから，予め与えた人体の 3 次元形状をもとに，少ない枚数の画像でより精度の高い結果を得ることを目指している．

図 1 に，各モデルとシルエット画像の関係を本手法の全体図で示す． まず，本手法では，普遍的な人体の形状特徴を持つ原形モデルと，個人体形の形状情報を含む，対象人体を撮影したシルエット画像とを用いる．変形には，2 段階から構成される変形手法を用いる．第 1 段階として，輪郭の対応による変形を行い，第 2 段階として，輪郭一致制約と局所相似制約に基づく整形を行う．

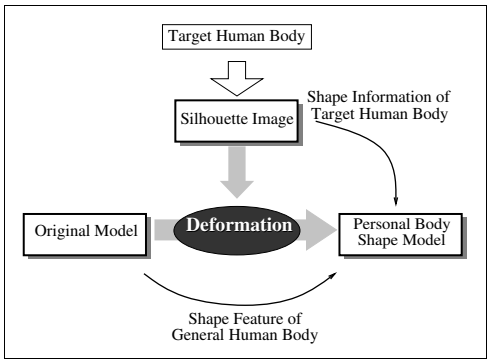

図 1 本手法の全体図
Fig. 1 Diagram of our method

以後，この個人体形モデルを生成するためにシルエット画像を撮影する人体を「対象人体」とし，第 1 段階の結果を「中間モデル」，生成された個人体形モデルを「結果モデル」と表記する．

ただし，対象の人体のうち，手先，足先については，毛髪の影響や構造の細かさから変形の対象外とし，これらは省いた形を用いた．これらの部分は，原形モデル，シルエット画像に満足の行く形状情報を含ませるのは難しい．本研究で対象とする仮想試着システムにおける着せ付けではそれらの部分は影響を及ぼさない．さらに，最終結果としては，別の手段で取得したこれらの部分を合成する方がより望ましい結果が得られると考えている．また，シルエット画像の撮影の際には，手袋，靴下を着用することで，簡単な画像処理でこれらの部分を除くことができる．

2.1 局所相似性

人体において姿勢を固定した場合，個人体形を形作るもととなる人体内部の組織の構造は，各個人間でほぼ同じと見なせる．その場合，各個人の人体の一部分に注目し，その形状を比較した場合，その部分どうしは大きさ，長さが違っても，その形は似ている．つまり，各個人の体形の違いは，このような，人体の部分毎の相対的な大きさの違いだと考えることもできる．このような人体の部分間の相似性を局所相似性とする．

2.2 原形モデル

原形モデルは一般的な人体の形状特徴を持っている必要がある．そこで，原形モデルは，実在の人体を計測し，その実測データをもとに構成する．個人の体形には，一般的な人体の形状特徴が含まれていると考えられる．原形モデルもパッチモデルで表現する．

2.3 シルエット画像

変形には，画像中の被写体の存在する部分かそうでないかを 2 値で表した画像であるシルエット画像に含まれる個人体形の形状特徴を利用する．シルエット画像は，背景が既知の場合，カメラなどで撮影した画像から簡便に得ることができる．

シルエット画像は 2 値画像であるので，人体各部に重なりが生じる場合，重なった部分の輪郭情報を得ることができない．本研究では，人体の姿勢，シルエット画像の撮影方向を固定することにより，重なりの問題に対処する．姿勢としては正立で腕を下ろした状態とし，撮影方向としては，正面と，側面を考える．ただし，正面からのシルエット画像で脇や股の輪郭が十分現れる姿勢を選択する必要がある．また，人体に左右対称性を仮定して，側面からのシルエット画像では，腕の輪郭が現れないようにし，両脚，乳房，肩胛骨，大胸筋等，左右で膨らんでいる部分の輪郭も完全に一致しているものとする．

正確に個人体形の形状情報をシルエット画像から得るためには，できるだけ多く方向からシルエット画像を撮影する方が望ましい．しかし，重なりの問題もあり，単純にシルエット画像の撮影方向を増やすことはできない．

2.4 変形手法

変形法は，輪郭の対応にもとづく変形と，局所相似制約に基づく整形の 2 段階からなる．

第 1 段階の輪郭の対応に基づく変形では，輪郭上の特徴点を，原形モデル，シルエット画像間で対応づけ，それを制御点として Free Form Deformation を用いて変形する．

第 2 段階の局所相似制約に基づく整形では，第 1 段階の結果を初期値として，原形モデルと結果モデルの間の局所相似制約と，輪郭一致制約とをエネルギー関数で表現し，このエネルギー関数を最小化するように収束計算し整形する．輪郭一致制約とは，結果モデルの輪郭がシルエット画像と一致するという制約である．

第 1 段階では，輪郭の対応に基づいて変形するため，第 2 段階の収束計算における輪郭一致制約を表現するエネルギー関数の値が小さくなり，第 2 段階の収束計算を高速化できる．また，原形モデルとシルエット画像の輪郭を正確にたどって対応づけるため，複数の輪郭が近接している部分でも，輪郭の対応づけを誤ることが少ない．第 2 段階では，輪郭を正確にたどるような対応づけは，エネルギー関数で表現するのは困難であるが，第 1 段階で輪郭が対応づけられているので，簡単なエネルギー関数で輪郭の対応を表現するだけでよい．

一方，第 1 段階では，輪郭上の特徴点のみに注目して変形するため，輪郭上の特徴点の抽出や輪郭対応の誤差が変形結果に影響を及ぼす．第 2 段階の整形では，輪郭全体の対応と局所相似性に基づいて整形するため，それらの誤差の影響を防ぎ，原形モデルの形状特徴を継承できる．また，輪郭に現れない部分の形状は，第 1 段階では補間によって決定されるが，第 2 段階では原形モデルの形状特徴によって整形される．

3. 輪郭の対応に基づく変形

ここでは，次の段階の収束計算による整形のための初期値となるべき形状に，原形モデルを大まかに変形する．変形のためのパラメータは，できる限り人手に頼らず自動で得られるもののみを使用することが望ましい．そこで，シルエット画像，原形モデルそれぞれの輪郭における特徴点を対応づけし，双方の輪郭が一致するように原形モデルを変形する方法を採用した．また，本手法では，正面，側面の 2 枚のシルエット画像を用い, それぞれの輪郭の対応づけに対して，各々独立して変形し中間モデルを得る．

3.1 輪郭の抽出

原形モデルとシルエット画像の輪郭による対応づけのため，双方から輪郭を抽出する必要がある．原形モデルの輪郭とは，シルエット画像を撮影した同じ状況 (カメラパラメータ) で，原形モデルをシルエット画面に投影した際に，投影像の輪郭上に投影される原形モデルの部分のことである．原形モデルにパッチモデルを使用しているため，原形モデルの輪郭は輪郭上に投影されるパッチモデルの頂点の系列で表せる．これらの頂点を輪郭上頂点と表記する．

3.2 正面の輪郭の対応づけ

まず，原形モデルと，正面正立のシルエット画像からそれぞれ抽出した輪郭同士の対応づけを考える．ここでの対応づけとは，頭部の輪郭，腕の輪郭のように，人体の同じ部分の輪郭の位置を，双方の輪郭の系列上で求めることである．ここでの対応を誤ると脚を腕に変形するような望ましくない変形になる．そこで，原形モデルとシルエット画像から安定して抽出できる輪郭特徴点を対応づけ，その他の輪郭特徴点間の輪郭の部分は，輪郭特徴点間の輪郭に沿って測った長さを等分する点同士を対応づける．

正面正立のシルエット画像の輪郭上で，形状的に容易に抽出できる輪郭特徴点として，頭頂 (実験では首中央)，手先，脚先，脇，股間の，全身で 8 点用いる (図 2)．これらの点は，輪郭上では輪郭が突出，または曲率が大きい点である．ここでは，輪郭特徴点をその両側の輪郭が近接している部分の先端とした．よって，輪郭特徴点を抽出するために，次の関数の値を輪郭各部で計算し，極小となる点を求める．

$$E(t) = \int_0^w |\boldsymbol{p}_{t+s} - \boldsymbol{p}_{t-s}|^2 ds$$

$\boldsymbol{p}_i$ は，輪郭上の点の位置，w はウインドウの大きさを決める定数である．

実際に，人体の輪郭で計算した結果を，図 3 に示す．はっきりとした極小点が見られる部分が，輪郭特徴点にあたる点で 8 点ある．それら極小点は，人体上での上下関係，左右の位置関係を考慮することにより，どの輪郭特徴点であるかを判断できる． 実際に

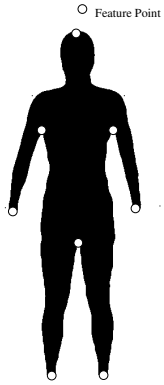

図 2 輪郭特徴点
Fig. 2 Feature points

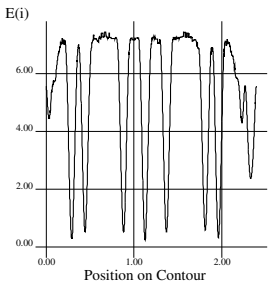

図 3 輪郭特徴点を示す $E(i)$
Fig. 3 Function E indicating feature points

男性の原形モデルと，別の男性のシルエット画像の輪郭の対応をとった例を図 4 に示す．太線で示されているのが，原形モデルとシルエット画像の輪郭を，その間をつないでいる細線が，各々の輪郭上の点同士の対応を示す．

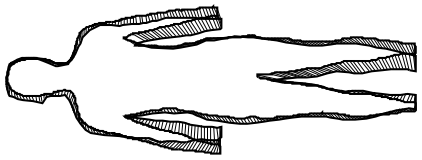

図 4 輪郭の対応
Fig. 4 Correspondence of contours

3.3 正面の輪郭対応づけに基づく変形

輪郭の対応づけをもとに，原形モデルの輪郭の投影像がシルエット画像の輪郭に一致するように，原形モデルを変形する．ここでは，輪郭の対応づけを制御点として利用し，Free From Deformation [8] により変形する．これは，変形したい 3 次元モデルを含む空間全体を，制御点における変形量の指定によって歪ませることにより変形する方法である．

本手法では，変形量として，シルエット画面上において対応する，原形モデルの輪郭上の点の投影像の位置から，対応するシルエット画像の輪郭上の点の位置までのベクトルを用いる．つまり，シルエット画面に平行な方向に原形モデルの頂点を移動させる．制御点は原形モデルの輪郭上にあるため，自由な位置に制御点を設定できる，次のような補間関数を用いる Free From Deformation を用いた．$f(\boldsymbol{x})$ はシルエット画像上の位置 $\boldsymbol{x}$ における変形量，$\boldsymbol{y}_i$ は制御点 $\boldsymbol{x}_i$ での変形量, R は制御点の影響半径，μ は距離による影響の大きさを表す定数, $d_i(\boldsymbol{x})$ は，$\boldsymbol{x}_i$ から $\boldsymbol{x}$ までの距離，n は制御点の個数を表す．

$$f(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} \displaystyle\sum_{i=1}^{n} \frac{\sigma_i(\boldsymbol{x})}{\sum_{j=1}^{n}\sigma_j(\boldsymbol{x})}\boldsymbol{y}_i & \boldsymbol{x} \neq \boldsymbol{x}_i \\ \boldsymbol{y}_i & \boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}_i \end{cases}$$

$$\sigma_i(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} \left(\frac{R-d_i(\boldsymbol{x})}{Rd_i(\boldsymbol{x})}\right)^{\mu}, & d_i(\boldsymbol{x}) < R \\ 0 \quad , & d_i(\boldsymbol{x}) \geqq R \end{cases}$$

この補間関数では，制御点からの距離が大きくなるほど小さくなる重み関数を，各制御点での変形量にそれぞれかけて足し合わせて，ある点での変形量を求める．ただし，ある一定の距離 R を越えるとその制御点に関する重み関数の値は 0 になる．実験では，人体の各部品の大きさを考慮して 20cm に設定した．

3.4 側面からのシルエット画像に基づく変形

正立した人体の側面からのシルエット画像は，水平方向に高々一つの部分しかない．そこで，シルエット画像の水平方向の幅と，原形モデルのシルエット画面に投影した像の幅が一致するように原形モデルを変形させる．垂直方向へは変形によって移動しないものとする．具体的にはまず，側面からの輪郭上頂点を含む水平面での原形モデルの断面を考える．シルエット画面上における断面に対応する線分の長さと位置が，シルエット画像と一致するように拡大率，水平移動パラメータを求める．これにより，輪郭上頂点はシルエット画像の輪郭上へ移動することになる．その他の頂点は，垂直方向に一番近い輪郭上頂点を上下に一つづつ選び，それらの垂直方向の位置の差に応じて，拡大率，水平移動パラメータを線形補間した値によって水平に移動させる．

4. 局所幾何相似制約に基づく整形

輪郭の対応づけによって変形してできた中間モデルを，次に，局所相似制約に基づいて整形する．整形では，結果モデルに対する，原形モデルとの間の局所相似制約と，シルエット画像との輪郭一致制約に基づく．これらの制約はそれぞれエネルギー関数で表現し，これらの関数の和を最小化させる．

4.1 エネルギー関数による制約の表現

原形モデルと結果モデルと間の局所相似制約，シルエット画像と結果モデルの輪郭一致制約は次のようなエネルギー関数で表現する．本手法では，すべての人体形状を表現する 3 次元モデルとして，三角形の集合で構成されるパッチモデルを用いている．そこで，この隣接パッチ間の関係やそれぞれの形状を元に局所相似制約を表現する．輪郭一致制約は，パッチモデルの輪郭上頂点とシルエット画像の輪郭の関係で表現する．

局所相似制約　基本的には幾何的な相似性に基づく．幾何的相似性とは，拡大，縮小，回転，平行移動の操作，または，それらの組合わせの操作を行ったパッチモデルと，もとのパッチモデルとの間にある幾何的な関係を示す．本変形法では，幾何的相似性を満たし，単純な定式化で表現でき，局所的な変形に対する制約となるものとして以下の三つを用いた．それぞれの制約とそれに対するエネルギー関数を挙げる．n は原形モデルの総パッチ数を表す．

(1) 隣接パッチ間の面積比の保存

$$E_s = \sum_{i}^{n}\sum_{j}^{3}\left(\frac{S_i}{S_i^0} - \frac{S_{h_i^j}}{S^0_{h_i^j}}\right)^2$$

h_i^j　パッチ i に隣接する 3 パッチ $(j = 0, 1, 2)$
S_i　整形後のパッチ i の面積
S_i^0　原形モデルのパッチ i の面積

(2) 隣接パッチ間の交わる角度の保存

$$E_a = \sum_{i}^{n}\sum_{j}^{3}\left(A_{i,h_i^j} - A^0_{i,h_i^j}\right)^2$$

A_{i,h_i^j}　整形後の隣接 2 パッチ間の角度
A^0_{i,h_i^j}　原形モデルの隣接 2 パッチ間の角度
$(-\pi < A_{i,h_i^j}, A^0_{i,h_i^k} < \pi)$

(3) 各パッチの 3 辺の長さの比の保存

$$E_v = \sum_{i}^{n}\sum_{k}^{3}\left(\frac{L_{e_i^k}}{L_{e_i^l}} - \frac{L^0_{e_i^k}}{L^0_{e_i^l}}\right)^2$$

e_i^k　パッチ i の3辺 $(k = 0, 1, 2)$
l　$(k+1) \bmod 3$
$L_{e_i^k}$　整形後のパッチ i の辺 e_i^k の長さ
$L^0_{e_i^k}$　原形モデルにおけるパッチ i の辺 e_i^k の長さ

輪郭一致制約　本変形手法の第一段階で，正確にシルエット画像，原形モデルの輪郭をたどり，それぞれを対応づけているので，ここでは，単純に中間モデルの輪郭上頂点の投影像と，シルエット画像の輪郭との距離の近さを輪郭上頂点の一致度とする．

$$E_c = \sum_d^m |P_d - C_d|^2 + \sum_e^{m'} |P'_e - C'_e|^2$$

m は正面からのシルエット画像に対する輪郭上頂点の数，P_d は，輪郭上頂点 d の正面からのシルエット画面への投影像となる点，C_d は正面からのシルエット画像の輪郭上で，点 P_d に最も近い点を表す．m', P'_e, C'_e はそれぞれ同様に側面からのシルエット画像に対するものである．

4.2　エネルギー関数の最小化

上記の個々の制約に対するエネルギー関数の重み付きの総和 E を最小化することによって整形を行う．

$$E = w_s E_s + w_a E_a + w_v E_v + w_c E_c$$

ここでは，最急降下法の原理を用いて，E を減少させる．最急降下法では，ある時点における E の勾配を求め，その勾配に -1 をかけた方向の極小点まで移動することを，E の減少量が小さくなるまで繰り返す．ただし，輪郭の一致制約の重みパラメータ w_c は，最小化の初期段階では小さく，次第に大きくする．初期は，輪郭上頂点がある程度自由に動けるよう小さくするが，隣接する輪郭に誤って移動しない程度の大きさは必要である．最終的に輪郭上頂点が輪郭に十分近く位置するように大きくする．その他の重みパラメータはデータ毎に初期状態の E_s, E_a, E_v の分散値が均一になるように，それぞれの分散値の逆数に設定する．本論文の実験では，w_c について，初期は，他のエネルギー関数の値の和と同じになるように設定し，収束する度に2倍に大きくすることを１０回繰り返した．

このエネルギー関数 E は，原形モデルの頂点数 $\times$ 3 の変数をもつ，非線型な関数である．そのため，最小値を求めることは事実上不可能である．本手法では，原形モデルと整形後の結果モデルの形状の差が小さいことを前提とする．また，輪郭の対応づけによる変形で，結果モデルにさらに近い形状まで変形しているため，エネルギー関数の初期値は最小に近く，一般的な最小化方法でも十分最小値に近い解が得られると考えられる．

5.　実験結果

実在の人体を測定した3次元実測データをもとに構成した原形モデルとシルエット画像に，本手法を適用し，結果モデルと3次元実測データとの形状の違いを調査した，実際の仮想試着室等の応用では，カメラなどで人体を撮影した画像からシルエット画像を構成する．この実験では，特に本手法による変形によって得た結果の誤差を，その他の要因をできるだけ排除して評価するために，3次元実測データをもとにしたシルエット画像を用いた．

このようなシルエット画像を用いる場合と比較して，カメラなどで得たシルエット画像を用いる場合は，カメラパラメータに関して注意が必要である．本実験では，シルエット画像の生成には正射影を仮定したが，一般的には透視射影になる．その場合，原形モデルとシルエット画像の輪郭を対応づけるために，原形モデルをシルエット画像の画面上に投影するが，その際に同じカメラパラメータで投影しなければならない．

5.1　人体モデル

ここでは，社団法人 人間生活工学センターから提供されている3次元人体画像データを用いた．女性 (20 ~ 29 歳)，中背の典型から，やせ形，中肉，太り型 の三つを使用し，それぞれに対して人体モデル A, B, C を作成した．それぞれ，2704 頂点，5405 パッチで構成した．図 7 が作成した人体モデルの例である．ただし，このデータでは，頭部は不正確な形状しか表現されていないため，首から上の部分は実験の対象外とした．そこで，頭頂部分の輪郭特徴点の代りに首中央を用いる．この場合も，3.2 節で説明した手法で同様に輪郭特徴点として抽出できた．

5.2　実験方法

シルエット画像と原形モデル　まず，対象とする人体を選び，その人体モデルからシルエット画像を作成する．図 6 に例を示す．正面からのシルエット画像は，輪郭上頂点の系列で代用し，側面からのシルエット画像は原形モデルの投影像を用いた．原形モデルは，シルエット画像の対象以外の人体モデルを使用する．これらのシルエット画像と原形モデルに本変形手法を

適用し，個人体形モデルである，結果モデルを生成した．各シルエット画像は，自分自身以外の二つの原形モデルの変形に用いる．よって，シルエット画像と原形モデルの組合わせは 6 通りとなる．

誤差の評価　結果モデルと 3 次元実測データとの形状差の評価である誤差として次のものを用いた．結果モデルの各頂点について，その頂点から最も近い 3 次元実測データで表現される表面上の点を探し，頂点とその点との距離をその頂点における誤差とする (図 5)．結果モデル全体としては，全頂点の誤差の平均値で評価する． 変形結果の例を図 8，測定した誤差を表 1

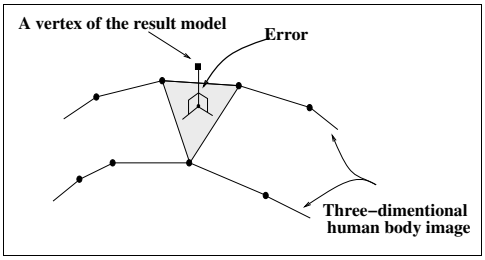

図 5　誤差の測定
Fig. 5　Measurement of error.

に示す．ただし，両腕の部分は，側面のシルエット画像上での重なりのため形状情報が得られない．また，使用した 3 次元人体画像では，腕の位置がデータによって異なっていたため，両腕の部分は評価に含めなかった．作成した人体モデルと元となった 3 次元実測データとの誤差は 0.5mm 程度で極めて小さいので，参考のために，人体モデルと別の人体の 3 次元実測データを，上で述べた誤差の測定方法で比較することで各個人間の体形差を評価した．表 2 に結果を示す．これらの結果から，各個人間の体形差が平均で 13 から 17 mm あるのに比較して，シルエット画像を 2 枚使用して変形した結果モデルの誤差は，それぞれ 3.8 から 5.3 mm と小さい値となっている．

BWH での比較　次に，結果を衣服のための採寸で重要な胸腰尻の周囲長で評価した．ただし，胸と尻は側面から見てそれぞれ前後に最も出ている位置，腰は正面から見て最もくびれている位置で測定した (表 3)．それぞれの体形差に比較して小さい誤差で結果が得られている．ただし，胸の部分について誤差が大きく，また，変形量が大きい場合にも誤差が増える傾向にある．原形モデルとの体形差が小さくなるように，複数の原形モデルを用意するか，なんらかの別の制約を変形に加える必要がある．

仮想試着室システムへの利用　最後に，仮想試着室システムでの有効性を確かめるために，本手法で生成した結果モデルに，布の物理シミュレーションにより服を着せ付けた．シルエット画像として図 9 を用いた結果を図 10 に示す．ただし，シルエット画像，原形モデルは，実際の人体から取得したデータに手を加えて作成したものであり，頭部，手先，足先も含めている．結果では，シルエットの体形を反映した着装結果が得られている．これらの結果から，仮想試着室システムにおいて，本手法で生成した個人体形モデルが有効であることがわかる．

表 1　結果モデルの誤差
Table 1　Errors of result models.

Original Model	Silhouette Image	Average of Error (mm)
A	B	4.786
C	B	4.786
B	A	3.828
C	A	4.368
A	C	5.078
B	C	5.325

表 2　個人間の体形差
Table 2　Differences between persons.

Body Shape Image Data	Original Model	Average of Difference (mm)
A	B	17.063
A	C	14.408
B	C	13.990

表 3　各部の周囲長の比較 (cm)
Table 3　Comparison of BWH's circumferences(cm)

	Original Model		
	A	B	C
Bust	74.3	79.5	93.0
Waist	58.9	67.2	71.4
Hip	85.2	89.4	94.7

Model →	Result Model					
Silhouette	B→A	C→A	A→B	C→B	A→C	B→C
Bust	77.6	76.3	80.8	79.9	84.8	89.3
Waist	59.2	62.4	66.2	66.7	69.7	72.8
Hip	84.5	85.9	90.1	90.9	93.1	93.9

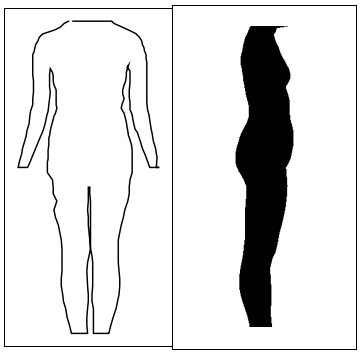

図 6　シルエット画像 B
Fig. 6　Silhouette image of B.

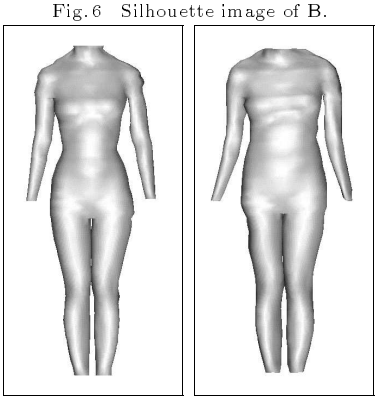

図 7　原形モデル A　図 8　結果モデル (A→B)
Fig. 7　Original model A.　Fig. 8　Result Model(A→B).

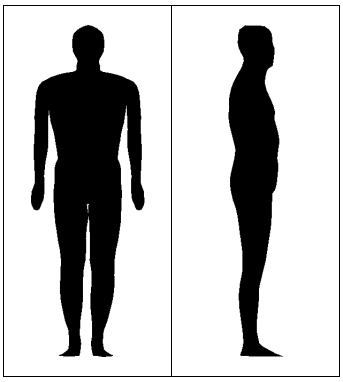

図 9　シルエット画像
Fig. 9　Silhouette image.

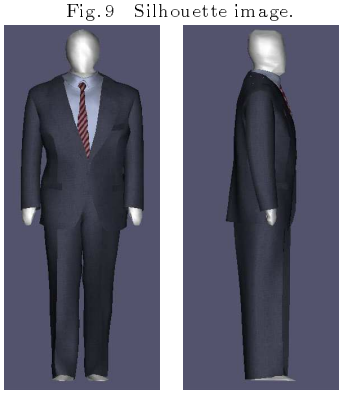

図 10　着装結果
Fig. 10　Result clothed.

6. おわりに

シルエット画像と原形モデルから個人体形モデルを生成するための変形法について提案した．変形法は，輪郭の対応による変形と，輪郭一致制約と局所相似制約に基づく整形から構成した．前者では，輪郭特徴点を抽出して対応づけ，それにより変形し，後者では，制約をエネルギー関数で表現し，それを最小化することで整形する．実験には，3 人の実在の女性を計測した 3 次元人体画像データとそれらから作成した原形モデルを使用し，ある人体から他の二つへ変形した結果を評価することにより，3 人の体形差に比べて小さい誤差で個人体形モデルを生成でき，その個人体形モデルが仮想試着室システムに有効であることを確認した．今後の課題としては，想定する対象の体形の範囲に対して，原形モデルの数と変形後の誤差との関係を調査する必要がある．また，統計的なデータを整形の際のエネルギー関数に反映させることによって，胸の変形など局所相似制約だけでは表現できない個人間の体形変化の性質も盛り込むことが考えられる．これにより，必要となる原形モデルの数を減らすことができる．また，シルエット画像の代わりに，より簡単に測定できる胸腰尻 (BWH) のいわゆるスリーサイズや肩幅，手の長さ等の各種の採寸データを用いることで個人体形モデルを得る方法についても研究を行っている．

謝辞　本研究に関して，多大な助言，データを提供して頂きました，東洋紡績株式会社けいはんな研究室 坂口嘉之博士，及び御幸毛織株式会社の関係各位に深謝いたします．

文　献

[1] 坂口嘉之, 美濃導彦, 池田克夫, “仮想服飾環境 PARTY — 動的変形可能な布のための数値計算法 —,” 信学論 (D–II), Vol. J77–D–II–5, pp. 912–921 (1994).
[2] 坂口嘉之, 美濃導彦, 池田克夫, “仮想服飾環境 PARTY —

人体と型紙のための幾何学的制約充足型格子形成法 —," 信学論 (D-II), Vol. J77–D–II–11, pp. 2210–2219 (1994).
[3] 坂口嘉之, 美濃導彦, 池田克夫, "仮想服飾環境 PARTY — 衣服形状計算における, 衣服と人体との衝突計算方法 —," 信学論 (D-II), Vol. J78–D–II–3, pp. 483–491 (1995).
[4] 美濃導彦, 池田克夫,"物理的制約を考慮した仮想服飾環境の構築," O plus E, Vol. 184, pp. 139–152 (1994).
[5] D. Terzopoulos, A. Witkin and M. Kass, " Constraints on deformable models: Recovering 3d shape and nonrigid motion," Artificial Intelligence, Vol. 36, pp. 91–123, 1988.
[6] 堀越力, 末永康仁, 中根一成, "超 2 次関数膨張法と球面調和関数による 3 次元形状の記述," 信学論 (D-II), Vol. J78-D-II, No. 1, pp. 50–60, January 1995.
[7] 佐藤嘉伸, 大谷淳, 石井健一郎, "3 次元形状の軸表現: Smoothed local generalized cones," 信学論 (D-II), Vol. J76-D-II, No. 8, pp. 1612–1623, June 1993.
[8] H.M'uller D. Ruprecht, "Shape and non-rigid motion estimation through physics-based synthesis," IEEE Transactions on Pattern Recognition and Machine Intelligence, Vol. 15, No. 6, pp. 580–91, 1993.
[9] 持丸正明, 福井幸男, 河内まき子, "体形変換のための局所的形態操作手法," 第 10 回 HumanInterface シンポジウム予稿集, pp. 173–176, October 1994.
[10] D. Metaxas and D. Terzopoulos, "Deformable curve and surface finite-elements for free-form shape design," Computer Graphics, Vol. 25, No. 4, pp. 257–268, July 1991.
[11] J.Y. Zheng, "Acquiring 3-d models from sequences of contour," IEEE Transactions on Pattern Recognition and Machine Intelligence, Vol. 16, No. 2, pp. 163–178, February 1994.
[12] G. Celniker and D. Gossard, "Free Form Deformation with Scattered Data Interpolation Methods," Geometric Modeling, pp. 267–281, Springer-Verlag Wien NewYork, 1993.
[13] I.A. Kakadiaris and D. Metaxas, "Three-Dimensional Human Body Model Acquisition from Multiple Views," International Journal of Conputer Vision, 30(3), pp. 191-219, 1998.

(平成 x 年 xx 月 xx 日受付)

今尾　公二　(学生員)

平 6 京大・工・情報卒．平 8 同大大学院修士課程了．現在，同博士課程に在学中．動画像処理，コンピュータグラフィックスに関する研究に従事．

亀田　能成

平 3 京大・工・情報卒．平 8 同大大学院博士後期課程了．現在，京都大学総合情報メディアセンター助手．画像処理，人体を対象とするモデルベースドビジョン，分散協調視覚，及びマルチメディアの研究に従事．情報処理学会会員．

美濃　導彦　(正員)

昭 53 京大・工・情報卒．昭 58 同大大学院博士課程了．同年工学部助手，昭 62 ~ 63 マサチュセッツ州立大学客員研究員，平 1 京大工学部附属高度情報開発実験施設助教授，平 7 同教授，平 9 京大総合情報メディアセンター教授．画像処理，人工知能，知的コミュニケーション関係の研究に従事．工博，IEEE，ACM，画像電子学会，電子情報通信学会，ロボット学会各会員．

池田　克夫　(正員)

昭 35 京大・工・電子卒．昭 40 同大大学院博士課程単位取得退学．同年 京都大学助手．昭 46 京都大学助教授．昭 52 筑波大学教授．昭 63 京都大学教授．この間，昭 46 年 9 月 ~ 昭 47 年 3 月米国ユタ大客員研究員．同年 3 月 ~ 8 月 MIT 客員研究員，昭 59 年 10 月 ~ 11 月 ETH 客員研究員．高度の情報処理システムの構成に興味を持ち，コンピュータネットワーク，分散処理システム，マン・マシンインタフェース，画像理解の分野で研究を行っている．著書に，コンピュータユーティリティの構造 (昭晃堂)，オペレーティングシステム論 (本学会)，データ通信 (昭晃堂) などがある．工博．情報処理学会，人工知能学会，IEEE，ACM 各会員．