

織維学会誌 第54巻6号

平成10年6月10日発行 別刷

社団法人 織維学会

(1998年1月5日受付・1998年4月1日受理)

様々な体型の3次元人体計測データに基づいた メタボール人体のモデリング手法

福山大学工学部 松田 亮治・西田 友是

Modeling Method of Metaball Human Body based on Range Data of Various Body Sizes

Ryouji Matsuda, and Tomoyuki Nishita

Faculty of Engineering, Fukuyama University, Fukuyama, Hiroshima, 729-0251 Japan

Abstract : We propose a modeling method of a human body for dress simulation using computer graphics. The body is modeled by primitives called metaballs which are useful for representing smooth surfaces. The method proposed here has two phases: In the first phase, we generate a human body model by adjusting the input of the metaballs by hand based on measured data obtained by the range data. In the second phase, the standard human model is deformed to other size bodies based on the range data. That is, once a standard human model is generated, various body types can be easily obtained. In the previous work, approximation precision was not enough sufficient. Our method can generate a human body with a small degree of error by using the following procedures: 1) metaballs are roughly set on the cross sections obtained by data sliced from the range data; these cross sections are selected so that they include special features such as nipple and waist point, 2) the metaballs on each slice are optimized by using the Steep Decent Method, 3) After combining these metaballs on slices, total metaballs are optimized using the Steep Decent Method again. In order to demonstrate the effectiveness of the proposed method, we show two examples of metaball human bodies based on the range data; a standard body model and a fat body model are deformed from it.

(Received 5 January, 1998 ; Accepted 1 April, 1998)

1. 緒 言

人体に着装された状態で美的でかつ快適な衣服を創造するには、平面である型紙のみを取り扱う従来のアパレルCADでは限界が生じている。そのため、型紙と衣服の3次元形状をインタラクティブに取り扱える3次元アパレルCADの開発が待ち望まれている。その中心技術の1つで、計算機を用いて衣服の3次元着形状を予測し、コンピュータグラフィックス(以下CGと省略する)で表現する着シミュレーションを実用化するには、着装者の体型に基づいた人体モデルが必要である。

3次元の人体形状をCGでモデリングする方法には、多数の多角形の小片を用いて表面を定義する方法や、3次

元空間上の点電荷による等電位面のように滑らかな曲面を構成できるメタボールと呼ばれるもの、体積を持ち、内部構造も表現できるボクセルなどがあるが、衣服の着形状を予測するための人体モデルは、以下の条件を満たすものでなければならない。第1に、滑らかな形状を持つこと、第2に、衣服モデルと人体モデルの接触を計算する際に、人体モデルの内部に衣服モデルが侵入しているか否かを容易に判定でき、侵入している場合、衣服モデルを人体モデル表面に戻す方向を与えることができること、第3に、データ量が少なく、接触の計算に要する時間を減少させることができることである。

筆者らは、これらの条件を満たすメタボールというプリミティブを用い基本的な人体モデルを生成[1]し、人

体の姿勢変化に対応した衣服の着装形状の予測[2]を行ってきた。しかし、実用化するには、着装者の体型を計測した3次元人体計測データ(レンジファインダなどの形状計測装置から得られた人体表面上の計測点の3次元座標データ)などを用い、人体モデルを生成することが不可欠であるが、対象物の3次元計測データからメタボールを生成した研究は少ない。浅井ら[3]は、任意の形状をメタボールにより記述する手法を提案しているが、対象が2次元のシルエット画像に留まっている。村木[4]は、1つのメタボールを細胞分裂させ、対象物の立体形状内部を順次埋めてゆく手法を提案しているが、計算時間がかかる上に、近似精度を上げるには、メタボールを増加しなければならないので、この手法を今回の人体モデルの生成に適用しようとする、衣服モデルと人体モデルとの接触の計算に時間がかかる。また、Bittar[5]らは、対象物の形状をボクセルデータに変換し、ボクセルの骨格を表すmedial axisという点群の各々の中心にメタボールを初期配置し、物体形状との誤差が最小になるようメタボールに最適化を施すが、点群の各々の中心にメタボールを配置するので、この手法もメタボール数が多くなり、前述した接触の計算に用いるには計算時間がかかる。筆者らも、ポリゴンデータからインタラクティブにメタボールへ変換する手法[6]を用いて人体モデルを生成しているが、余り人手を介さずにさまざまな人体モデルを生成できた方が良く、前述した接触の計算に用いるには、メタボールの数が少し多い。

そこで、より少数のメタボールで精度の高いモデルを得るため、人体の特徴点を含む横断面を利用した3次元人体モデルの生成を試みた。特徴点である乳頭点やウエスト点などを含む横断面上の計測点(3次元人体計測データのもの)の内側にメタボールを配置する。その輪郭点(横断面の輪郭を構成する多数の計測点を代表する点)に、提案する手法でフィッティングさせ、それらの横断面上のメタボールを上下に重ね合わせることで基本的なモデルを生成した。次に、基本的なモデルを変形し異なる体型のモデルを生成する場合には、提案したフィッティング手法のみでは、問題が生じたが、変形手法を提案し解決を試みた。最後に適用例として、基本的な人体モデルを変形し全体的に太った体型のモデルを生成することで、提案法の有効性を示した。

2. 3次元人体モデル生成の概略手順

人の体型は、人体特有の特徴点を用いて表現されることが多い。そこで、これらの特徴点を利用して3次元人体モデルの生成を試みる。今回、衣服を着装させる接触面積が最も大きく、他の身体部分より横断面形状が著し

く変化するため、モデリングするのが難しい体幹部を生成の対象とした。以下にその概略手順を示す。

1) 図1で示すように特徴点[7]である頸椎点、肩峰点、乳頭点、ウエスト点、腸棘点、臀部突出点を含む各横断面上にある3次元人体計測データの計測点の内側にメタボールを人手を用いてラフに配置する。

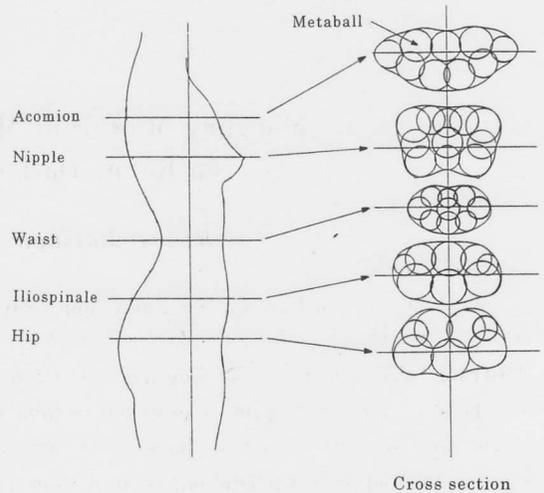


Fig. 1 Cross sections including metaballs and special features such as nipple, waist point, etc.

2) 各特徴点を含む横断面と横断面との間の人体計測データから、その間隔に応じて、3~5cmの範囲で等間隔に横断面を抽出し、その横断面の輪郭点の内側を埋めるように、メタボールをラフに配置する。

3) すべての横断面において、メタボールを輪郭点にフィッティングさせる。

4) 全断面上のメタボールを上下に重ね合わせる(図2参照)。重ね合わせると、隣り合う上下のメタボール間で融合が起き、メタボールの融合形状が変化してしまう。そこで、メタボールを配置した全断面の輪郭点だけではフィッティングの精度が不十分なので、メタボールを配置していない断面(メタボールを配置した断面と断面との間に位置する)の輪郭点を抽出し、フィッティングさせる点として加える。次に、すべてのメタボールをそれらの点にフィッティングさせ、3次元人体モデルを得る。

なお、人体モデルの座標系は、地上面をxy平面、それと垂直な方向をz方向と定義する。

3章では、4章以下の提案法の理解を助けるため、人体モデルに用いるメタボールの原理を述べる。

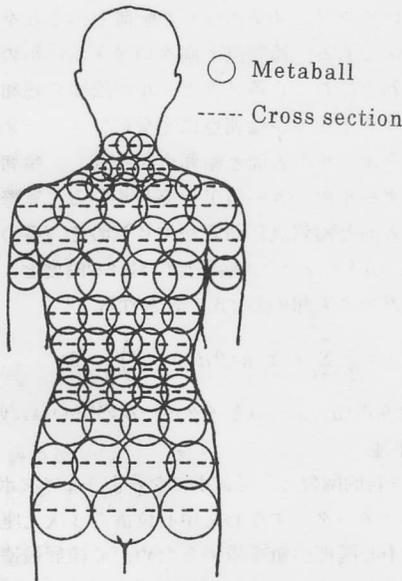


Fig. 2 Combination of metaballs on cross sections.

3. 人体モデルに用いるメタボールの原理

人体モデルに用いるメタボールとは、CGの基本形状の1種である。通常の球と異なる点は、ボールの中心から外側に球状に広がる濃度分布を持つことである。図3に示すように、メタボールどうしが近づくると融合する。これは、メタボールが濃度分布を持つため、ボールどうしが近づくると、互いの濃度が加算される。加算された濃度

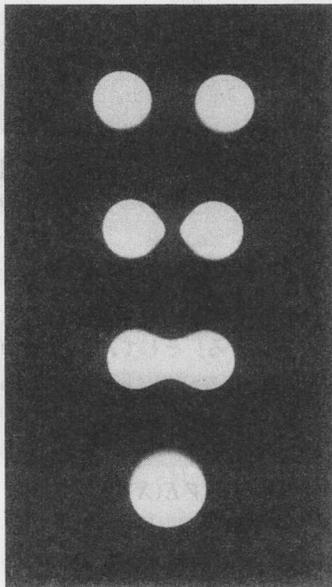


Fig. 3 Fusion of metaballs.

が、あるしきい値になった部分が融合した形状として見える。代表的なものに、BlinnのBloppy model[8]や中心からの距離に応じて区間別に異なる濃度分布関数を持つ西村ら[9,10]によって提案されたもの、濃度分布関数に6次式を用いたもの[11]などがあるが、ここでは、過去行った研究[1,2]で援用してきた西村らの方法を用いて説明する。

いま、3次元空間上にn個のメタボールが存在するとする。i番目のメタボールの中心 (x_i, y_i, z_i) における濃度を w_i とし、有効半径(濃度が0になる点とメタボール中心との距離)を r_i 、任意の点 (x, y, z) とi番目のメタボール中心との距離を d_i 、濃度分布を持つための分布関数を $f(d_i)$ とする。このとき、任意の点 (x, y, z) における濃度 $W(x, y, z)$ は融合するメタボールの濃度加算として次式で表される。

$$W(x, y, z) = \sum_{i=1}^n w_i f(d_i) \tag{1}$$

分布関数 $f(d_i)$ は、中心からの距離による区間別の関数[12]として次式によって表される。

$$f(d_i) = \begin{cases} 1 - 3 \left(\frac{d_i}{r_i} \right)^2 & (0 \leq d_i < r_i/3) \\ \frac{3}{2} \left(1 - \frac{d_i}{r_i} \right)^2 & (r_i/3 \leq d_i < r_i) \\ 0 & (r_i \leq d_i) \end{cases} \tag{2}$$

図4に、このメタボールの分布関数を示す。

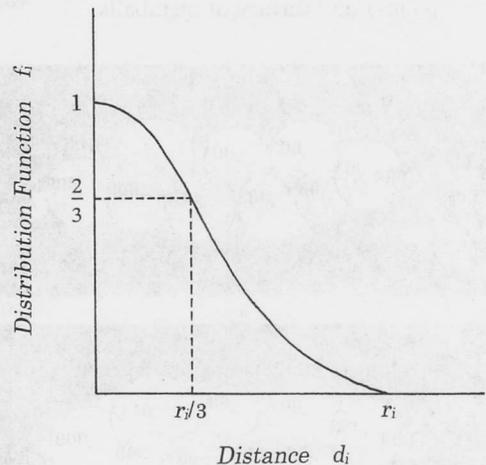


Fig. 4 Distribution function of metaball.

式1の濃度 $W(x, y, z)$ がしきい値 T になる等濃度面がメタボール表面として定義される。メタボールが1つの場合はメタボール表面が球になるが、その半径をしきい値半径 r_t と定義する。

4. 3次元人体計測データへの最急降下法を用いた メタボールのフィッティング手法

人体の横断面を構成する輪郭点とメタボールとの関係を図5に示す。図中では、メタボールのしきい値半径を太線の円で示し、有効半径を細線の円で表現している。図6以降の図中で個々のメタボールの形状を表す場合、しきい値半径を用いることにする。図に示すように、幾つかのメタボールが融合した場合、メタボールの表面は等濃度面で定義される。この面と輪郭点 j が一致するように、個々のメタボールの中心位置 (x, y, z) 、有効半径 r 、中心濃度 w を最適値に自動調整する。

図6(a)は、輪郭点の近辺に横断面を埋めるように、人

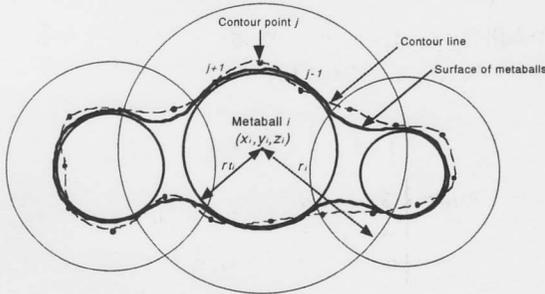
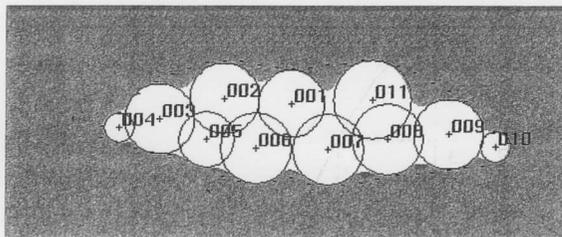
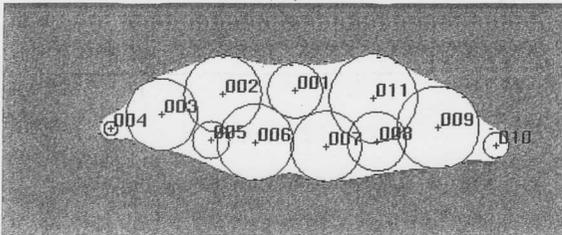


Fig. 5 Relation between contour points (sampling points) and surface of metaballs.



(a)



(b)

Fig. 6 Sampling points and metaballs on cross section including acromion: (a) initial shape of metaballs, (b) approximated metaballs to sampling points

手を用いてラフにメタボールを配置し、これを初期形状とした例である。輪郭点と個々のメタボールの距離を元に、輪郭点における各メタボールの濃度の総和をとる。本来、メタボールが輪郭点に完全にフィッティングすれば、メタボールの表面と輪郭点が一致し、輪郭点の濃度がメタボールのしきい値 T と等しくなる。実際にはメタボール表面と輪郭点に誤差が生じるので、 j 番の輪郭点を (a_j, b_j, c_j) とすると、各輪郭点における濃度としきい値 T との誤差の2乗和 E は次式で表される。

$$E = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n w_i f(d_{ij}) - T \right)^2 \quad (3)$$

d_{ij} : 輪郭点 (a_j, b_j, c_j) とメタボールの中心 (x_i, y_i, z_i) との距離

この E を目的関数として最小になるようなメタボールの5個のパラメータ、すなわち中心位置の3次元座標、有効半径、中心濃度の値を求め、非線形最適化の手法[13]を適用する。非線形最適化の手法ではニュートン法や準ニュートン法が知られているが、人体モデルを生成するために、メタボールのパラメータを最適化するには、筆者らが今回行った実験では約150個のメタボールに、前述した5個のパラメータを掛けた膨大な数の未知数の逆行列を反復計算の度に計算する必要がある。そこで、アルゴリズムのシンプルな最急降下法を適用し、メタボールのパラメータの最適解を求める。初期形状のメタボールのパラメータ $X^{(0)}$ は次式で表される。

$$X^{(0)} = (x_1, y_1, z_1, r_1, w_1, \dots, x_n, y_n, z_n, r_n, w_n)^t \quad (4)$$

なお、式4の t は、転置記号である。

最急降下法では、目的関数である E の勾配すなわち ∇E を求める。 ∇E を次式に表す。

$$\nabla E = \left(\frac{\partial E}{\partial x_1}, \frac{\partial E}{\partial y_1}, \frac{\partial E}{\partial z_1}, \frac{\partial E}{\partial r_1}, \frac{\partial E}{\partial w_1}, \dots, \frac{\partial E}{\partial x_n}, \frac{\partial E}{\partial y_n}, \frac{\partial E}{\partial z_n}, \frac{\partial E}{\partial r_n}, \frac{\partial E}{\partial w_n} \right)^t \quad (5)$$

異なる濃度分布関数を持ついずれのメタボール[8-11]でも最急降下法を適用できるが、式2の分布関数を用いる場合に、 ∇E の個々のパラメータの偏微分係数を求める式を付録に記述する。

次に、初期形状のメタボールのパラメータ値 $X^{(0)}$ と求めた $\nabla E(X^{(0)})$ を次式に挿入し、メタボールの新たな各パラメータ値 $X^{(1)}$ を算出する。そして、 $\nabla E(X^{(1)})$ を求め、メタボールの次の新たな各パラメータ値を求める処理を、 E が十分に小さくなるまで繰り返し、各パラメータ値の最適解を得る。

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - \alpha \cdot \nabla E(X^{(k)}) \quad (6)$$

α : ステップ幅

k : 反復計算の回数

$X^{(k)}$: メタボールの各パラメータ値

$X^{(k+1)}$: メタボールの新たな各パラメータ値

なお、式3のEを最小にするような上記のステップ幅 α を、黄金分割探索[14]と呼ばれる直線探索で求める。

この手法を、肩峰点を含む横断面上の輪郭点とメタボールに適用した結果を図6の(a)と(b)に示す。図6(a)は、輪郭点の近辺に横断面を埋めるように11個のメタボールをラフに配置し、初期形状としたものである。図中の点は輪郭点を、円は個々のメタボールの形状を、番号はメタボールの識別番号を、各々示している。また、白色の部分、メタボールの横断面上での融合形状を表わしている。図6(a)で示されるメタボールの初期形状にフィッティングを施した結果を図6(b)に示す。輪郭点にメタボールの表面が全体的に一致している。

5. 最急降下法によるフィッティング手法の問題点と解決法

5.1 メタボール表面より横断面が大きいまたは小さい場合のフィッティング

提案したフィッティング手法は、各輪郭点での濃度としいき値との誤差の2乗和Eを目的関数として利用している。ところが、図7(a)で示すように、人手で配置したメタボール表面より横断面が全体的に大きい(輪郭点の濃度

値が0になる状態まで、輪郭点のすべてまたは大部分が、メタボール表面より外側の離れたところに位置する)場合、すなわち該当する輪郭点上に分布関数が存在しない場合、式3の誤差の2乗和Eが一定値になり、最急降下法が適用できず、フィッティングが不可能となる(図7(b)参照)。そこで、最急降下法を使えるように濃度が0より大きくなる、すなわち分布関数が存在するようにするには、新たにメタボールを設けるか、メタボールの有効半径を大きくするか、その輪郭点付近に、メタボールの中心を移動させるしかない。今回の人体横断面の場合には、その有用でかつ簡便な方法としてすべてのメタボールの中心と有効半径を同率拡大し、元になるメタボール表面の相似形をつくり、分布関数を存在させるようにした。その後、4章で述べた最急降下法を用いたフィッティング処理を施す。図7(a)の例に、相似形を作成する処理を施した結果を図8(a)に示す。その後フィッティングさせた結果を図8(b)に示す。図より、フィッティングが可能になったことが分かる。

今度は逆に、図9(a)に示すように、配置したメタボールの各中心位置よりも、フィッティングしようとする横断面の輪郭点部分が部分的にでも内側に位置するような横断

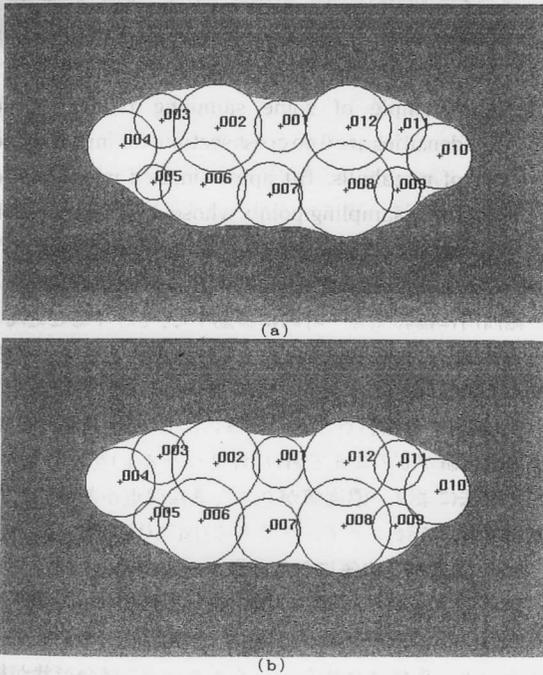


Fig. 7 Example of contour line which is larger than surface of metaballs: (a) initial shape of metaballs, (b) approximation of metaballs when densities of sampling points are 0.

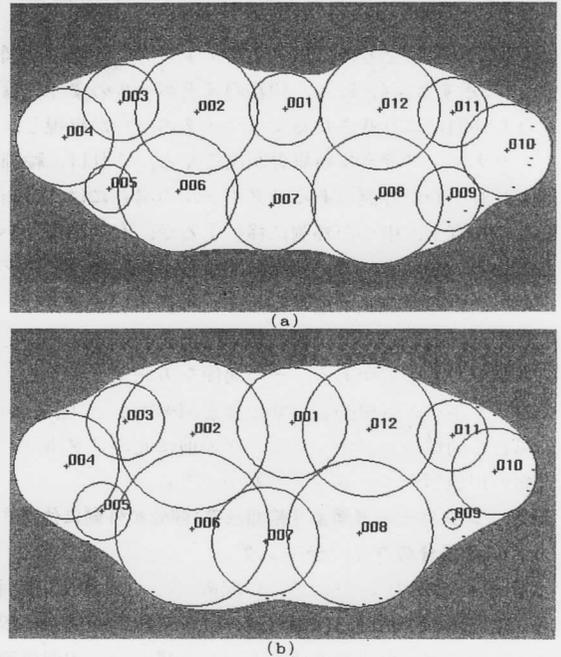


Fig. 8 Magnification of metaballs: (a) result that metaballs shown in Fig.7 are magnified, (b) approximated metaballs to sampling points after metaballs were magnified.

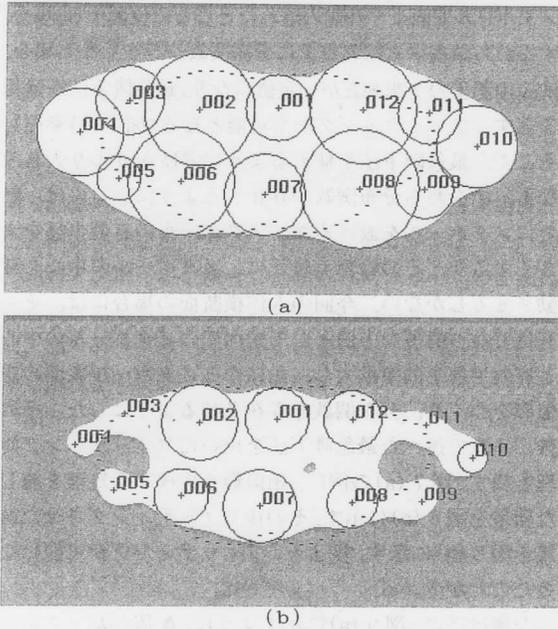


Fig. 9 Example of contour line which is narrower than surface of metaballs: (a) initial shape of metaballs, (b) approximation of metaballs to sampling points on small cross section.

面が小さい場合を考える。フィッティングした結果を図9(b)に示すと、4, 5, 9, 10番のメタボールのように輪郭点の外側に取り残されるようなメタボールが出現し、フィッティングできない場合が出てくる。これは、輪郭線よりも中心が外側にあるメタボールの場合には、分布関数の性質上、中心が外側に移動するか、有効半径が小さくなることによって、内側にある特定の輪郭点にメタボールの表面がフィットしてしまう場合があるからで、これを避けるために、予め輪郭線内にメタボールの中心を入れておく必要がある。その簡便な方法として、すべてのメタボールの中心と有効半径を同率縮小し、図7(a)の場合と同様に、フィッティングの前に元のメタボール表面の相似形をつくることで解決できる。

5.2 メタボール表面より輪郭点の1部分が外側に位置する場合のフィッティング

図10(a)の例のように、ラフに配置したメタボール表面より輪郭点の1部分(この場合パスト部分)が外側に位置し、その輪郭点だけ濃度値が0になる場合は、相似処理だけでは対応できない。このような場合には、次のようなプロセスを行う。

1) 該当する輪郭点に有効半径の範囲が最も近いメタボールを選択し、そのボールの中心に向かって、有効半径

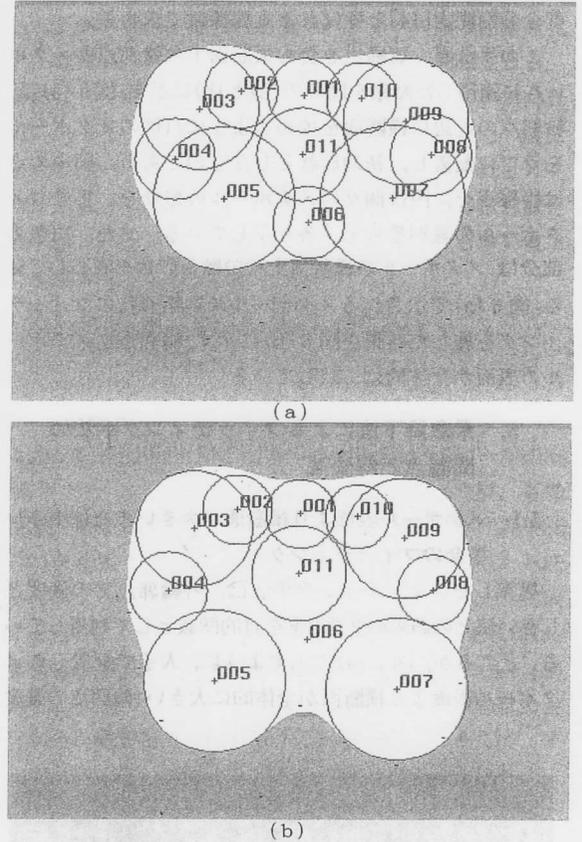


Fig.10 Example of some sampling points whose densities are 0 on cross section: (a) initial shape of metaballs, (b) approximated metaballs to some sampling points whose densities are 0 on cross section.

の範囲内に輪郭点を一時的に移動する。そうすることで、その移動した輪郭点の濃度が0以上の値をとるようになり、その輪郭点にメタボールがフィッティングできる。

2) 該当する輪郭点を元の位置に戻し、その位置で輪郭点の濃度値が0のままであれば、プロセス1)を繰り返す。この手法により、濃度値が0になる輪郭点が部分的に存在しても、フィッティングできる(図10(b)参照)。

5.3 濃度が負の値になるメタボールの発生

フィッティングの過程において、メタボールの濃度が負の値になることがある。特に、各横断面上のメタボールを上下に重ね合わせると、メタボールの融合形状が相互に変化するので、フィッティングの過程で発生し易くなる。図11に示す例もその過程で発生したものである。図に示す1~12番のメタボールで構成された横断面(肩峰点と乳頭点の中間に位置する横断面)とその直下にある横

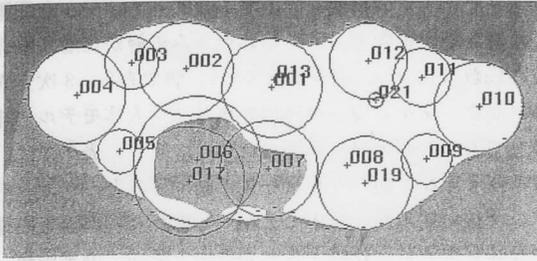


Fig.11 A few metaballs whose densities are negative.

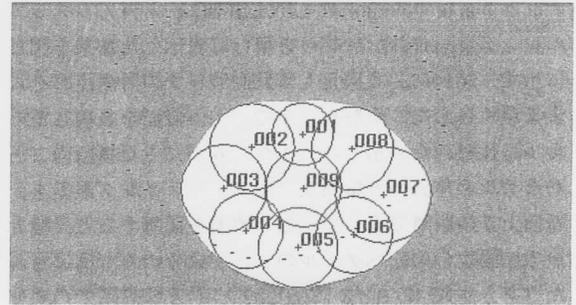
断面との融合によって、濃度が負の値になるメタボールが発生した。濃度が負の値になるメタボールは周囲のメタボールを凹ませる性質があり、図11の6, 7番のメタボールのように体表面に穴として現れると問題になる。この問題を解決するため、4章の式6でメタボールの新たな各パラメータ値 $X^{(k+1)}$ が求まった時に、その新たなパラメータ値の内、中心濃度が負の値をとろうとした場合に限って、0に値を置き換える。

6. 基本的人体モデルの変形による異なった体型モデルの生成法

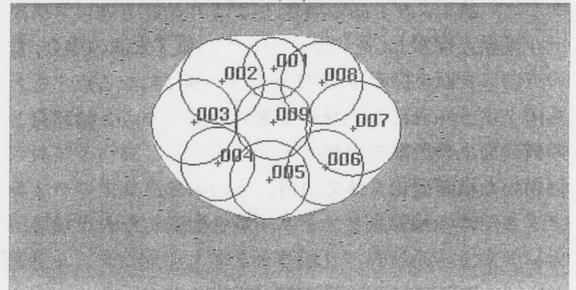
基本的人体モデルを変形して異なる体型のモデルを生成する手法には、4章で提案したフィッティング手法と5章で提案したフィッティング手法の問題点の解決法を基本的に適用できるが、異なった体型の輪郭点に、基本的人体モデルのメタボールをフィッティングしようとすると、次に述べるような問題が起きる。図12(a)にウエスト点を含む横断面の例を示すが、基本的人体モデルの横断面に対して異なる体型の横断面の輪郭点がずれる問題が発生する。3次元人体計測データにおいては、計測時に被験者が計測装置上で立つ位置を合わせても、体型すなわち、猫背、反り身、左右のずれなど個人々々で横断面の位置は全く異なるし、個人においても、各断面での重心の位置は異なっている。

そこで、異なる体型の各横断面の輪郭点の重心を幾何学的に求め、同様に基本的人体モデルの輪郭点の重心を求める。基本的人体モデルの横断面を構成するすべてのメタボールを、その横断面の重心から、異なる体型の重心まで平行移動する。図12(a)で示されるメタボールを平行移動し、重心を合わせた結果を図12(b)に、その後フィッティングを施した結果を図12(c)に示す。

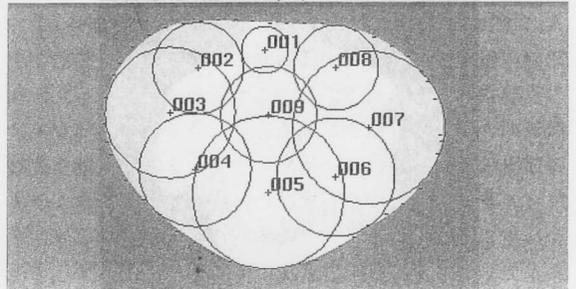
人体モデルを異なる体型へ変形する場合は、相似処理を施す前に、必ず重心のずれの補正を行う。



(a)



(b)



(c)

Fig.12 Example of Gap between cross sections of two different body sizes: (a) initial shape of metaballs, (b) correction of gap between cross sections of two different sizes, (c) approximation of metaballs to sampling points of different size.

7. 基本的人体モデルと異なる体型の人体モデルの生成結果

7.1 人体計測値を用いた人体モデルの生成結果と考察

2章で述べた3次元人体モデル生成の概略手順に従い、4章で提案したフィッティング手法と5章のフィッティング手法の問題点の解決法を用いて、体幹部の基本的人体モデルを生成した。人体モデルの基になる3次元人体計測データは、(財)人間生活工学研究センター製[15]で、1824FA1というコードで分類された人(成人女子、身長152cm、体重40kg)のものを用いた。その3次元人体計測データにフィッティングされた各メタボールを、IMAGICA

デジックス製のPersonal LINKS[16]というCGシステムのレンダラー(描画ソフト)を用いて表示した結果を図13に示す。図14に、3次元人体計測データの計測点をそのまま頂点とした3角形パッチで、人体表面を表現したモデルを比較のため示した。また、表1に主な横断面ごとのモデルの体表面と輪郭点とのフィッティング誤差を、断面上での距離で表わす。この誤差を説明すると、輪郭点での濃度の勾配ベクトルのx, y成分のみで構成されたベクトル $(\partial W/\partial x, \partial W/\partial y, 0)$ を用い、輪郭点での濃度がしきい値 T よりも高い場合、ベクトルの正方向にメタボール表面を探索し、逆に濃度がしきい値 T 未満の場合、負の方向に表面を探索し、濃度がしきい値 T になる点すなわちメタボール表面との交点を求める。その点と輪郭点との横断面上の距離を算出する。

用いた横断面は全体で31層、その中で、フィッティングするための輪郭点とメタボールを配置したのは16層、

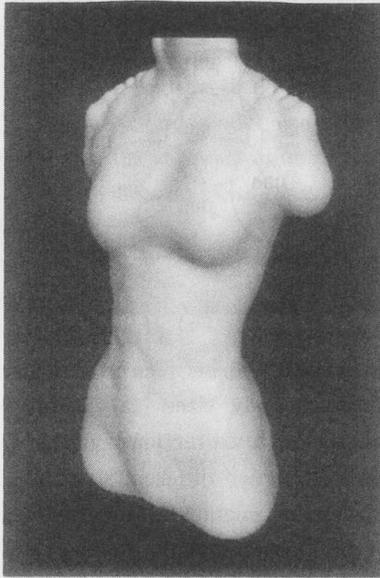


Fig.13 Standard 3D human body model of trunk.

フィッティングの精度を向上するためメタボールを配置した層と層の中間に設けた輪郭点のみの層が15層、輪郭点の総数は1374点、メタボールは147個である。3次元人体計測データを表現した図14のポリゴン人体モデルと比較しても著しい差異が認められない。また、表1では、フィッティング前のメタボールの初期形状と、フィッティング後の基本的な人体モデルの輪郭点との誤差を距離で比較している。比較するために主な断面での平均値、標準偏差、最大値を示しているが、平均値を例にすると、フィッティング前の初期形状の平均値が最も大きい断面で、4.55mmであるのに対してフィッティング後の基本的な人体モデルでは1.57mmに減少している。ミリ単位の誤差で実用上(着装シミュレーションに用いることを目的とする)問題のない精度の基本的な人体モデルが得られたと考える。147個という比較的少数のメタボールで、誤差の

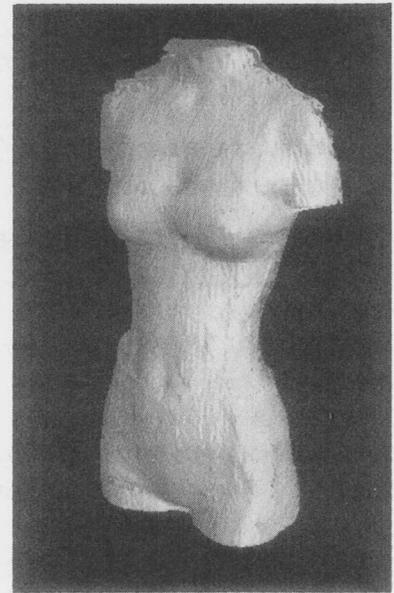


Fig.14 Human body model composed of triangular patches.

Table 1 Error represented by distance between surface of body model and sampling points on every major cross section.

	Error (distance) before approximation			Error (distance) after approximation		
	Mean (mm)	S.D.	Max (mm)	Mean (mm)	S.D.	Max (mm)
Cervicale	2.66	2.2	7.07	1.57	1.13	5.24
Acomion	4.55	4.03	16.2	1.28	0.94	4.5
Nipple	2.87	2.2	10.5	0.98	0.88	4.66
Waist	2.53	2.11	8.91	0.56	0.41	1.7
Iliospinale	4.15	3.68	14.8	1.54	0.88	3.65
hip	3.24	3.34	14.9	0.79	0.61	2.49

少ない人体モデルを得られたのは、単にフィッティングの計算負荷を軽減できるだけでなく、今後着装シミュレーションで衣服の着装形状を得るために、人体モデルと衣服との間で接触の計算を行う際、計算時間を減らすことができる。

7.2 異なった体型データへの基本的な人体モデルの変形結果と考察

4章で述べたフィッティング手法と5章で提案したフィッティング手法の問題点の解決法、それに加え6章で提案した異なる体型間での横断面のずれの補正法を変形法として用い、図13に示す基本的な人体モデルを変形し、全体的に太った体型のモデルを生成した。変形された人体モデルを前述したレンダラーを用い表示した結果を図

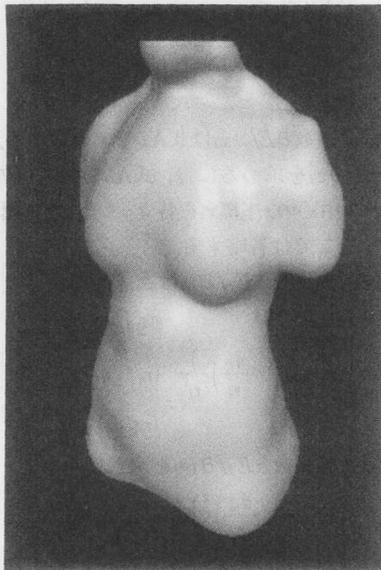


Fig.15 Fat body model deformed from standard human body model.

Table 2 Error represented by distance between surface of fat body model and sampling points on every major cross section.

	Error (distance) after deformation		
	Mean (mm)	S.D.	Max (mm)
Cervicale	1.88	1.38	5.94
Acomion	2.03	2.04	8.27
Nipple	2.97	2.9	9.21
Waist	0.71	0.52	1.9
Iliospinale	1.28	1.07	4.04
hip	1.93	1.4	6.33

15に示す。異なった体型のモデルを生成する基になる3次元人体計測データは、基本人体モデルと同様に、(財)人間生活工学研究センター製で、1824FB3というコードで分類された人(成人女子、身長159cm、体重57kg)のものを用了。輪郭点の総数は1862点、メタボールは147個である。また、表2に、主だった断面ごとのモデルの体表面と輪郭点との誤差を距離で表わす。平均値が最も大きい断面で、2.97mmであった。基本人体モデルと同様に、ミリ単位の誤差で実用上問題のない精度の、異なる体型の人体モデルが得られたと考える。

8. 結 言

着装シミュレーションに用いることを目的とし、個人の体型を計測した3次元人体計測データに基づいた人体モデルの生成を試みた。今回、衣服を着装させる接触面積が最も大きく、他の身体部分より横断面形状が著しく変化し、モデリングするのが難しい体幹部を生成の対象とした。以下にその成果を示す。

1) 人体の特徴点を含む横断面上の輪郭点の内側に、人手でラフにメタボールを配置し、最急降下法を用い輪郭点にフィッティングさせた。この手法のみでは輪郭点にフィッティングしない場合が生じたが、輪郭点との近似誤差を最小にするようなメタボールの初期形状の相似形をつくる処理などを事前に施すことで、フィッティングを可能にした。全横断面上のメタボールを上下に重ね合わせ、すべてのメタボールを輪郭点に再びフィッティングさせることで、基本的な人体モデルを生成できた。

2) ラフにメタボールを配置し、初期形状としたのものにもかかわらず、誤差の少ない人体モデルが得られた。また、少数のメタボールでフィッティングが可能になった。

3) 異なる体型の横断面が基本的なモデルの横断面とずれる問題が生じたが、重心のずれを補正する手法をフィッティングの前に施すことで、合わせようとする体型が様々であっても対応できるようになった。その適用例として基本的な人体モデルから、全体的に太った体型のモデルを生成して、提案法の有効性を示した。

今後の課題として、人体モデルを生成するアルゴリズムの改良と高速化を図る。また、腹部が大きいなどの局所の変形法を開発してゆく。

謝 辞

本研究を行うにあたり、奈良女子大学の今岡春樹博士には、多くの助言を賜りました。また、広島大学工学部修士課程の津田晃孝氏には、資料の提供やデータ作成時に援助を頂きました。この場をかりて両氏に深く感謝の意を表する次第であります。

文 献

1. R. Matsuda and H. Imaoka, *Sen'i Gakkaishi*, **50**, 221 (1994).
2. R. Matsuda and H. Imaoka, *Sen'i Gakkaishi*, **51**, 225 (1995).
3. M. Asai, T. Kimoto and Y. Yasuda, 1991 *Gazou Fugouka Symposium*, p. 71 (1991).
4. S. Muraki, *Proc. of SIGGRAPH'91*, Computer Graphics, **25**, 227 (1991).
5. E. Bittar, N. Tsingos, M. Gascuel, *Proc. of EUROGRAPHICS'95*, **14**, 457 (1995).
6. R. Matsuda and T. Nishita, *Gazou Denshi Gakkaishi*, **26**, 314 (1997).
7. N. Makabe, "Hifuku no tameno Ningen Inshi", Nihon Shuppan Service, p. 158 (1991).
8. J. F. Blinn, *ACM Trans. on GRAPHICS*, **2**, 235 (1980).
9. H. Nishimura, M. Hirai, T. Kawai, T. Kawada, I. Shirakawa, and K. Omura, *Denshi Tsushin Gakkai Ronbunshi*, **J68-D**, 718 (1985).
10. M. Hirai, H. Nishimura, T. Kawada, I. Shirakawa, and K. Omura, *Terebijyon Gakkai Gijyutsu Houkoku*, p. 21 (1983).
11. T. Nishita, E. Nakamae, *Proc. of EUROGRAPHICS'94*, **13**, 271 (1994).
12. H. Nakanishi, *PIXEL*, **84**, 95 (1989).
13. T. Ibaragi and M. Fukushima, "Saitekika no Shuhou", Kyouritsu Shuppan, p. 105 (1993).
14. T. Ibaragi and M. Fukushima, "Saitekika no Shuhou", Kyouritsu Shuppan, p. 108 (1993).
15. Y. Hayashi, "Jintai Keisoku Database Kouchiku ni kansuru Jigyuu Houkokusho", Research Institute of Human Engineering for Quality Life, p. 27 (1995).
16. S. Yamashita, H. Yoshimura, M. Nishida, H. Deguchi, H. Nishimura, T. Kawada, I. Shirakawa, and K. Omura, *Graphics to CAD*, **10-3**, 1 (1983).

付 録 ; 2 次の分布関数を持つメタボールの ∇E 式 2 の場合の ∇E について以下に論じる. 式 3 で表わされる各輪郭点における濃度と, しきい値 T との誤差の 2 乗和 E の中で, m 個の輪郭点中の j 番目の輪郭点における誤差 e_j を次式に示す.

$$e_j = \sum_{i=1}^n w_i f(d_{ij}) - T \quad (\text{A1})$$

次に, その誤差の 2 乗を E_j とすると, 例えば, i 番目のメタボールの中心の x 座標の偏微分係数 $\partial E / \partial x_i$ は次式で表わされる.

$$\frac{\partial E}{\partial x_i} = \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial E_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{A2})$$

ここで, $\partial E_j / \partial x_i$ は次式で表わされる.

$$\frac{\partial E_j}{\partial x_i} = \begin{cases} 6w_i e_j (a_j - x_i) / r_i^2 & (0 \leq d_{ij} < r_i/3) \\ 3w_i e_j (a_j - x_i) \left(\frac{1}{r_i d_{ij}} - \frac{1}{r_i^2} \right) & (r_i/3 \leq d_{ij} < r_i) \\ 0 & (r_i \leq d_{ij}) \end{cases} \quad (\text{A3})$$

目的の偏微分係数 $\partial E / \partial x_i$ は式 A2 で求められる. なお, $\partial E / \partial y_i$, $\partial E / \partial z_i$ を求めるには, 式 A3 の輪郭点の x 座標 a_j とメタボール中心の x 座標 x_i を各々 y または z 座標に変えれば良いのでここでは省略する.

また, 偏微分係数 $\partial E_j / \partial r_i$ は次式となる.

$$\frac{\partial E_j}{\partial r_i} = \begin{cases} 6w_i e_j d_{ij}^2 / r_i^3 & (0 \leq d_{ij} < r_i/3) \\ 3w_i e_j d_{ij} \left(1 - \frac{d_{ij}}{r_i} \right) \frac{1}{r_i^2} & (r_i/3 \leq d_{ij} < r_i) \\ 0 & (r_i \leq d_{ij}) \end{cases} \quad (\text{A4})$$

同様に, 偏微分係数 $\partial E_j / \partial w_i$ を次式に示す.

$$\frac{\partial E_j}{\partial w_i} = \begin{cases} e_j \left\{ 1 - 3 \left(\frac{d_{ij}}{r_i} \right)^2 \right\} & (0 \leq d_{ij} < r_i/3) \\ \frac{3}{2} e_j \left(1 - \frac{d_{ij}}{r_i} \right)^2 & (r_i/3 \leq d_{ij} < r_i) \\ 0 & (r_i \leq d_{ij}) \end{cases} \quad (\text{A5})$$

この $\partial E_j / \partial w_i$ のすべての輪郭点における総和を求め, 目的の中心濃度の偏微分係数 $\partial E / \partial w_i$ を得ることができる.