Inner Structure Estimation of Human Body Model for Simulation of Interaction with Clothing

INUI Shigeru^{a,*}, NISHIMURO Yuji^{a,b}, HORIBA Yosuke^a, MASUDA Tomoe^c

^a Faculty of Textile Science & Technology, Shinshu University, 3-15-1 Tokida, Ueda, Nagano 386-8567, Japan

^b Kotohira Industries Ltd., 1320 Shigeno, Thomi, Nagano 389-0512, Japan (Presently)

^c Faculty of Education, Mie University, 1577 Kurimamachiyamachi, Tsu, Mie 514-8507, Japan

Received 17 February 2009; accepted for publication 25 June 2009

Abstract

A human body model for clothing simulation should reflect inner mechanical characteristics, because shape of clothing is defined by mechanical interactions between clothing and human body. A technique that estimates unknown inner structure of human body is proposed, as it is not easy to measure inner structure of each person. Isomorphic mesh that we proposed was utilized to have one-to-one correspondence between points on different human body surfaces. Mesh structure of isomorphic mesh is identical for any human body surface, and any point on a human body surface can be corresponded to a point on another human body surface. Unknown inner structure of a human body was estimated by deforming mass-spring model of human body according to correspondence of surface shapes. From the results, possibility of the estimation was suggested. Improvement of accuracy of the estimation is expected by setting of proper parameters of the mass-spring model with results of measurement of inner structures of human bodies.

Key Words: Human body model, Inner structure, Estimation, Simulation

衣服との相互作用シミュレーションのための 人体モデルの内部構造推定

乾 滋^{a,*}, 西室雄二^{a,b}, 堀場洋輔^a, 増田智恵^c

^a 信州大学繊維学部, ^b コトヒラ工業株式会社 (現在), ^c 三重大学教育学部

1. はじめに

近年, 消費者の好みの多様化により大量生産大量消費時代が終局を迎え, 個人の要求に合わせた製品生産が必要とされ, そのため個人の特性に対応した製品設計が求められている。しかし, 衣服については個人の特性に合わせた製品を設計製造することは非常にコストがかかるため, ある程度サイズ分類された製品の中から自分に合った寸法のものを選ぶことが一般的であり, それが必ずしも自分の体型にフィットするものではないということが現状である。

一方, 製品を設計する過程でシミュレーションを用いることは多くの試作品を作成したり手直しをしたりする手間を省

くことができ効果的である。機械に関しては早くから力学的なシミュレーションが行われ, 製品設計に用いられてきた。衣服に関するシミュレーションについても研究が行われ [1-4], 現在では製品化されているものも見られる [5,6]。これらのシミュレーションは人間がスーツやスカートなどの衣服を着用したときの形状を予測するものである。

衣服のシミュレーションには仮想的な人体モデルが用いられている。上記のシミュレーションで用いられている人体モデルは通常, 剛体か単純な仮定に基づいた弾性体である。しかし下着などの場合は, 人体モデルと衣服との力学的な相互作用によって着装時の形状が決定される。そのための人体モデルは上述のような力学的に一樣な特性を持つものではな

* 連絡先: 信州大学繊維学部感性工学科 386-8567 長野県上田市常田 3-15-1
E-mail: inui@shinshu-u.ac.jp, Tel: +81-268-51-5525, Fax: +81-268-51-5511

く、内部構造を反映した力学的特性に分布を有するものであることが必要となってくる [7,8].

このように衣服について、現在の既成製品のような一般的な量産品ではなく個人に適応した製品設計を可能にするためのシミュレーションを行うためには、対象となる個人の人体がどのような構造であるかまで把握する必要があると考えられる。しかし、対象となる各個人の内部構造を計測し把握することは容易なことではない。現在では人体内部構造はMRIなどの装置を用いることにより計測することは可能ではあるが、製品設計のための個人のデータを収集するためにこれらの装置を利用することは現実的ではない。

一方、人体表面の形状の計測については人類学など基礎的な研究から被服構成学などの応用的な研究で広く利用されている。Rudolf Martin により人体計測法であるマルチン法が開発され、国際的に共通の計測法として整備され、広く活用されてきた。現在では三次元計測機により各個人の人体表面形状を計測し、三次元形状データを得ることができる [9,10].

以上のように個々人の人体内部構造を計測することは現実的ではないが、人体表面形状は比較的容易に計測できる。そのため、表面形状のような比較的容易に取得できる情報に基づいて内部構造の推定を行うことが考えられる。関連する研究として Free Form Deformation 法（以下 FFD 法）による人体形状の分析が行われている [11]. FFD 法とは、3次元物体の表面に制御格子点を設定し、これらの制御格子点を用いてスプライン曲面により物体の形状を表現する。これらの制御格子点を移動することによって、物体形状をなめらかに変形する方法である。ある人体形状を計測した場合、解剖学的に決定した特徴的な点を制御格子点とする。他の人体形状についての制御格子点を決定すると、2つの人体形状の制御格子点の対応関係に基づいて、前者の人体形状を変形することにより後者の人体形状の推定値が得られる。

本研究では個人対応の製品設計のための人体モデルを目指し、内部構造を有する三次元数値人体モデルデータを基にして、表面形状の対応関係を用いて個人の人体に近い内部構造を予測・再現することを目的としている。

2. 内部構造の推定手法

ここでは、内部構造が既知である数値人体モデルを基本として、このモデルを変形することによって個々人の内部構造の推定を行う手法の提案を行う。人体表面上に特徴点を定義し、これらの特徴点に基づいて形状が異なっても位相構造が一定であるメッシュ構造によって表面形状を表現する。これを内部構造が既知である数値人体モデルについて作成しておく。さらに、内部構造を推定したい人体表面形状についても位相構造が一定であるメッシュ構造を作成する。これら2つのメッシュ構造の対応関係から、内部構造が既知である数値人体モデルの内部構造を変形させることで、人体内部構造の推定値が得られる。このような手順を Fig. 1 に示す。

Fig. 1 Flow chart of the processes.

3. 人体データ

本研究では上述のように、人体の内部構造の情報を有するデータとして、人体内部を小領域の集合で表現したボクセルデータと、多数の断面で表現した断面画像データとの異なる2種類の人体データを利用した。

3.1 ボクセルデータ

ボクセルデータとして独立行政法人・情報通信研究機構より提供された三次元数値人体モデルデータを用いた [12,13]. ボクセルデータとは人体を細かな立方体ブロックに分割し、それぞれのブロックに筋肉や脂肪といった組織名を示す番号を付与したものである。利用したデータのボクセルは、一辺が2ミリの立方体である。座標系はX軸を右左、Y軸を前後、Z軸を上下にとり、ボクセルの各辺は座標軸に平行になるようにとられている。

3.2 人体断面画像データ

人体の断面画像データとして Visible Human Dataset (VHD) と呼ばれるものを用いた [14]. VHD は米国国立衛生研究所 (NIH) の一機関である全米医学ライブラリ The U.S. National Library of Medicine (NLM) が作成した人体の解剖構造データベースである。男性の遺体から得られたデータで、MRI 画像データ・CT 画像データ・人体のカラー断面画像データの3種類がある。MRI 画像データ・CT 画像データは腕部の情報が不十分なためここではカラー断面画像データを用いる。カラー断面画像データは、上下方向 1mm ピッチで人体断面を撮影したもので、1,870 枚の画像からなる。画像のサイズ

は縦 1,024 ピクセル, 横 675 ピクセルで, 1つのピクセルは一辺が 1.2mm の領域を占める。

4. 人体の表面形状抽出について

三次元数値人体モデルデータのボクセルデータと, VHD の断面画像データとの両データより人体の表面形状を求める。三次元数値人体モデルデータのボクセルデータから表面のボクセルを取り出し, それらの外部に面している面から表面形状を抽出する。また, VHD の断面画像群データの輪郭線を取り出し, それらをつなぎ合わせることで表面形状を再構成する。

4.1 ボクセルデータからの表面形状の抽出

三次元数値人体モデルのボクセルデータから表面形状を抽出する。ボクセルデータにはすべての内部構造が含まれているが, まずボクセルデータ中から外部に面している表面部分のボクセルだけを取り出す。取り出されたこれらのボクセルの面から内部の面を取り除き外部に面している面のみを残す。取り出された面は四角形のパッチの集まりとして表されているが, これらの四角形のパッチを半分に分割し表面全体を三角形パッチとする。このように作成された表面形状の例を Fig. 2 に示す。

Fig. 2 A curved surface of a human body reconstructed from a voxel data.

Fig. 3 A border line extracted from the cross section image.

4.2 断面画像データからの表面形状の抽出

VHD の断面画像群の各画像より輪郭線をそれぞれ抽出する。断面画像に対して 2 値化を行い, エッジ検出処理を用いて Fig. 3 のような輪郭線を抽出する。隣接する 2 枚の断面画像の輪郭線上に節点を設定し, 2つの輪郭線上の節点を接続して三角形パッチを生成するプログラムを作成し, これを用いて Fig. 4 のように隣接する断面画像間に次々に三角形パッチを生成した。この処理によって Fig. 5 のように三角形パッチで表現された表面形状データが得られた。これらのデータを体の部位毎にまとめ表面形状のモデルとする。

5. 人体表面の対応付け

5.1 定構造メッシュ

本研究では異なる人体表面の対応付けを行うためのメッシュを作成し, このメッシュを「定構造メッシュ」と呼んでいる。定構造メッシュとは, 位相構造が等しいメッシュを異なる人体形状に適用したメッシュである。そのために, あらかじめメッシュの位相構造を設計し, その設計図に基づいてメッシュ節点を決定するルールを作成する。人体表面形状の計測データは膨大な量の点の座標値で表現されているが, これに対して作成したルールを適用し, その結果得られた節点を用いてメッシュを構成することで定構造メッシュが得られ

Fig. 4 Reconstruction of polygons of human surface from the cross section images.

Fig. 5 A curved surface of a human body reconstructed from cross section images.

る。先行研究において衣服設計のための定構造メッシュの作成についての研究が行われた [15]。

一般的に定構造メッシュを用いる利点として以下のことが挙げられる。あらかじめメッシュの位相構造を設計するため、メッシュに極端な大きさや形状を持つ三角形を含むことが起こりにくい。位相構造が同一であるため、異なるボディデータでもメッシュ頂点間の位置関係、頂点が表す体表面上の部分は同一となる。個人の体型差は頂点の空間座標の差に集約されるため、他のボディとの比較や統計処理も可能である。

定構造メッシュを作成するための基準の点として特徴点を定義する。特徴点は、関節や骨端などの手で触れて確認できる場所や厚径の半分といったように解剖学的あるいは衣服設計の観点から特定できる点とする。本研究では特徴点をできるだけ視認できる場所とし、人体表面形状のデータの形状から視認によって抽出した。

上で得られた特徴点を基準として定構造メッシュを設計する。特徴点は全て定構造メッシュの節点として用いられるが、それ以外の全ての定構造メッシュの節点は、特徴点を基準として手続きに従って生成される。これらの節点によってメッシュの三角形が構成される。腹部など形状の変化が比較的小さい部分のメッシュは大きめに、前胸部など面の曲率変化が大きい部分のメッシュは細かくなっている。

特徴点以外の節点は手続きに従って生成される。そのために幾何学的に面を決定する命令、線を決定する命令、点を決定する命令を定義する。これらの命令は、基準となる節点と人体表面形状を表す計測された人体表面の点の座標値に適用されることで面、線、節点を生成する。設計図に基づいてこれらの命令を組み合わせることで、メッシュ節点決定ルールを作成する。

抽出した表面形状データの外形より特徴点の視認による抽出を行い、メッシュ節点決定ルールを適用することで定構造メッシュを作成する。Fig. 6.1 は人体のボクセルデータより得られた表面形状について、Fig. 6.2 は人体の断面画像データより得られた表面形状について定構造メッシュを作成したものである。それぞれの定構造メッシュを作成することにより、メッシュ節点における両表面形状データ間の対応がなされた。

5.2 表面形状の対応

本研究では内部構造の推定を行うために、異なる2つの人体表面形状の同じ箇所を示す点を対応させることが必要となる。定構造メッシュを作成することにより、異なる2つの人体表面形状において定構造メッシュの節点は対応づけられているが、それ以外の点については対応付けが行われていない。そのため、定構造メッシュの節点以外の点については、定構造メッシュの三角形要素を用いて面積座標によって対応点を決定する。これにより、定構造メッシュで表現された人体表面形状のあらゆる点の対応付けが可能となる。体表面形状を対応する手順を以下に示す。

- ・数値人体モデルデータから表面のメッシュだけを抽出する。

Fig. 6.1 Isomorphic mesh of human waist obtained from the voxel data.

Fig. 6.2 Isomorphic mesh of human waist obtained from cross section images.

- ・数値人体モデルデータの表面形状から特徴点を抽出する。
- ・以上より数値人体モデルデータの定構造メッシュを作成する。
- ・人体の断面画像データより輪郭線を取り出す。
- ・輪郭線より表面形状をメッシュ化し作成する。
- ・断面画像データの表面形状メッシュから特徴点を抽出する。
- ・以上より断面画像データの定構造メッシュを作成する。
- ・以上より得られた2つの定構造メッシュの節点を対応させる。
- ・面積座標を用いて2つの定構造メッシュの体表面上の対応点を決定する。

5.3 面積座標による点の対応

面積座標は三角形を基準として定義される座標の表示方法である [16]。平面内の任意の点の面積座標値は、基準となる

三角形の面積と、その点と三角形の2つの頂点から構成される三角形との面積比によって表される。物体が変形した際に変形前後の対応点を求めるために用いられる。

定構造メッシュの節点以外の点を対応付けるためには以下の手順に従う。人体表面形状を表す任意の点を、その人体表面形状より求めた定構造メッシュの三角要素上に射影する。末端部などでは垂直に射影した場合に適当な三角要素上に射影されない場合がある。このような場合、この点は定構造メッシュのいずれかの三角要素の辺上もしくは頂点上に最近接点があるものとする。この最近接点は三角形のボロノイ特徴領域を計算することにより得られる。

面領域において点が与えられたときに、その点の面領域におけるボロノイ特徴領域とは、その面領域に対する他のどんな点より近い、あるいは同じだけ近い面領域における点として定義される [17]。Fig. 7 は1つの面領域、3つの辺領域、3つの頂点領域の7つボロノイ特徴領域によって分割された三角形を表す。射影された点が面領域内にある場合は、射影された点を人体表面形状と定構造メッシュとの対応点とする。また、射影された点が面領域内にない場合、各辺領域内に点が射影されるならば、面領域に最も近い辺上に対応点をとる。

Fig. 7 Seven Voronoi regions of a triangular polygon for projection of a point of human body surface.

射影された点が面領域内になく、各頂点領域に任意の点が射影されるならば、面領域に最も近い頂点に対応点とする。これにより、人体表面形状を表す点群の座標データと、それから生成された定構造メッシュが2組あった場合、定構造メッシュの節点以外の点を、定構造メッシュへの射影点として対応付けが可能となる。

6. 内部構造推定について

定構造メッシュの作成により、ある人体表面上の任意の点を他の人体表面上の対応する点に対応づけることができた。この手法によって、数値人体モデルの表面形状と計測によって得られた任意の人体表面形状との対応関係が得られる。この対応関係を用いて、構造が既知である数値人体モデルの内部構造を変形させ、その結果から体表面形状の計測により得られた人体の内部構造の推定を行う。

6.1 質点-バネモデル

ここでは推定のために、変形の調整が比較的容易である質点-バネモデルを用いた。人体の一定領域の質量が一点に集中したものとみなし、格子状に配置された複数の質点間をスプリングで連結した状態として人体をモデル化する。人体の変形はバネの伸長・圧縮、曲げ、せん断変形として与えられる。これらの変形メカニズムは、次の手順によってモデル化する。

- ① それぞれの質点間の局所的な構造における相互作用をエネルギー関数として定義を行い、伸長・圧縮、曲げ、せん断での各変形回復応力を計算する。
- ② 各質点にかかる力を算出する。
- ③ 上で得られた力に基づいて、最適化の手法 [4] によってエネルギー最小の状態を求める。エネルギー最小の場合に釣り合いの状態が求められる。

以上の手順によりエネルギーの最小状態を求める最適化を行なう。

Cross Sectional Image

Fat Tissues

Muscular Tissues

Fig. 8.1 A cross section image of waist part.

Fig. 8.2.1 Estimated inner structure of waist part (fat tissues)

Fig. 8.2.2 Estimated inner structure of waist part (muscular tissues)

6.2 内部構造の推定

数値人体モデルの表面形状と、VHDの表面形状との対応関係と、数値人体モデルの内部構造を用い、質点-バネモデルにより内部エネルギーを最小化することでVHDの内部構造の推定を行った。そして、質点-バネモデルによる内部構造の推定結果と、VHDの断面画像データから再構成した内部構造との比較を行った。ウェスト部分の断面画像をFig. 8.1に示し、断面画像の中で脂肪組織に当たる領域と、筋肉組織に当たる領域も示した。これらに対応する箇所の内部構造推定モデルの脂肪組織をFig. 8.2.1に、筋肉組織をFig. 8.2.2に示す。

断面画像に関して、推定された内部構造と断面画像から得られた内部構造との定性的な比較を行った。脂肪組織についての内部構造の比較に関しては、体表面近くでの分布や身体を中心部の分布は、実際の人体データである断面画像と近い構造となっていることが観察された。また筋肉組織において、背筋の形状や腹斜筋付近で類似の構造の表現がなされて

いた。今回作成された内部構造推定モデルについて、断面画像データと推定モデルが完全な一致みられなかったが、ある程度の表現はなされていた。このように質点-バネモデルによる推定を用いて、内部構造の推定がある程度可能であることが示唆される。

表面形状から内部構造を推定することは本来非常に困難な問題である。骨格の寸法や軟組織の分布についてのおおまかな情報を得る、あるいは特定の部位に限定することで多少詳しい情報を得ることはある程度可能であると考えられる。おおまかな情報を得るためであっても、2つの表面形状の対応関係だけでは推定のための情報は十分ではない。

情報を補うためには多くの人体について内部構造を計測する必要がある。これらの人体について、これまで述べた方法で内部構造の推定を行い、計測した内部構造と比較する。質点-バネモデルの各部位のパラメータを推定値と計測値の誤差を最小化するようにフィッティングすることによって決定し、そのパラメータを用いて推定を行うことによって情報を補うことができると考えられる。

本論文では内部構造の推定に力学的な手法を用いているが、力学的な手法が正確な内部構造を与える理由はない。最初に述べたFFD法は制御点の対応に基づいて、幾何学的な変形によって形状の予測を行っており、箇所ごとに変形のパラメータを調整するなどの工夫がされている[18]。本手法では、部位毎に力学的なパラメータの設定が可能であり、例えば骨組織のバネは固く、軟組織のバネは柔らかく設定することにより、各部位の相互作用によって内部組織全体が決定されるところに利点があると考えられる。

7. 結 言

本論文では、人体表面形状のデータから、ユニークな幾何学位相構造を有する定構造メッシュを作成することで、異なる人体表面形状上の任意の点を対応づけている。また、人体内部には質点バネのモデルを設定した。内部構造が既知な人体表面に、内部構造が未知である人体表面形状を対応付け、それによって人体内部モデルを変形させる。この変形によって未知の内部構造を推定する。その結果ある程度の推定の可能性が示されたが、予測精度の向上のためには体型の異なる人体内部構造および表面形状の計測を行うことでデータを蓄積し、それらを用いた予測結果の解析を行うことが必要である。

謝 辞

VHD使用の機会を与えて頂いたNIH、および数値人体モデル使用の機会を与えていただいた独立行政法人情報通信研究機構に感謝の意を表す。また、本研究は科研費・萌芽(17650062)の援助によるものであり、一部は科研費・基盤研究(A)(19300240)の援助によるものである。ここに記して謝意を表す。

References

- [1] Terzopoulos D, Platt J, Barr A, Fleischer K (1987) *Visual Computer*, **4**, 205-214
- [2] M-Thalmann N, Yang Y (1991) "Techniques for Cloth Animation", in *New Trends in Animation and Visualization*, N. M-Thalmann and D. Thalmann, eds., pp243-256, John Wiley & Sons, UK
- [3] Breen DE, House DH, Getto PH (1992) *Visual Computer*, **8**, 264-277
- [4] Okabe H, Imaoka H, Tomiha T, Niwaya H (1992) *Computer Graphics*, **26**, 105-110
- [5] <http://www.i-designer-web.com/> (browsed on 2009. 5. 27)
- [6] <http://www.dressingsim.com/> (browsed on 2009. 5. 27)
- [7] Choi Dong-Eun, Nakamura K, Kurokawa T (2005) *J Tex Eng*, **58**, T68-T75
- [8] Inui S (2001) *International Journal of Clothing Science and Technology*, **13**, 339-350
- [9] <http://www.voxelan.co.jp/> (browsed on 2009. 5. 27)
- [10] http://jp.hamamatsu.com/product_info/index.html (browsed on 2009. 5. 27)
- [11] Mochimaru M, Kouchi M, Dohi M (2000) *Ergonomics*, **43**, 1301-1313
- [12] Nagaoka T, Sakurai K, Kunieda E, Watanabe S, Honnma H, Suzuki T, Kawai M, Sakamoto M, Ogawa K, Kokawa N, Kubota K, Kim H, Taki M, Yamanaka Y, Watanabe B (2002) *Seitaiikougaku*, **40**, 239-246
- [13] Nagaoka T, Watanabe S, Sakurai K, Kunieda E, Watanabe S, Taki M, Yamanaka Y (2004) *Physics in Medicine and Biology*, **49**, 1-15
- [14] Banvard, Richard A. (2002) "The Visible Human Project® Image Data Set From Inception to Completion and Beyond", *Proceedings CODATA 2002: Frontiers of Scientific and Technical Data, Track I-D-2: Medical and Health Data*, Montréal, Canada
- [15] Okabe H, Masuda T, Hara K, Inui S (2005) "Isomorphic meshes of human body surface for computerized apparel design", 17th. IMACS
- [16] Miyoshi T (1994) "YugenYousohou Nyumon Kaiteiban", p181, Baifukan
- [17] Ericson C (2005) "Real-Time Collision Detection", Elsevier
- [18] Yahara H, Hikuma N, Fukui Y, Nishihara S, Mochimaru M, Kouchi M (2004) *The Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineerings D-II*, 1 J87-D-II, 967-977