

製品設計に用いる 3 次元足部モデルの座標系の設定と 精度の改善法の提案

矢原弘樹†, 高橋瑛逸‡, 福井幸男‡, 西原清一‡, 持丸正明*, 河内まき子*,

† 筑波大学教育開発国際協力研究センター, つくば市

‡ 筑波大学大学院システム情報工学研究科, つくば市

*産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター, 東京都

{yahara@criced | yoitsu@npal.cs | fukui@cs | nishihara@cs}.tsukuba.ac.jp
{m-mochimaru | m-kouchi}@aist.go.jp

あらまし 近年, 3 次元計測技術の発展に伴って, 3 次元身体モデルを利用した身体に適合する製品設計が注目されてきている. しかし, 3 次元スキャナ等で計測された身体 of 表面形状データは座標系が定められていない. そこで, 従来は座標系を定めるために必要な身体 of 部位に, 3 次元スキャナで計測可能なマーカーを専門家があらかじめ貼る事で解決していた. しかし, マーカーを貼ることは手間や顧客への心理的負担がかかるという問題があった. 本稿では, 足部モデルの座標系を定義するのに必要な身体 of 部位 MT(脛側中足点)と MF(腓側中足点)の位置を, すでにそれらの位置が定められているサンプルモデルセットをあらかじめ用意しておき, それらの統計的な情報を基にマーカーの位置情報無しの表面形状データ of みの足部モデル of マーカーの位置を推定することで, 座標系を設定する手法を提案する. そして, FFD法を用いた身体モデル生成法を用いることで, 推定された MT, MF の位置推定の精度向上を試みる.

キーワード 身体モデリング, 解剖学的特徴点, 自由形状変形, 回帰分析

Definition of the Coordinate System of 3D Foot Model Using Regression Analysis and Improvement of the accuracy by the Free Form Deformation

Hiroki YAHARA†, Yoitsu TAKAHASHI ‡, Yukio FUKUI ‡, Seiichi NISHIHARA ‡,
Masaaki MOCHIMARU*, Makiko KOUCHI*

†Center for Research on International Cooperation in Educational Development, University of Tsukuba, Japan

‡ Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba, Japan

*Digital Human Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japan

Abstract In order to design industrial products fitting well to the human body, it is necessary to make full use of information of human anatomical landmarks. However, the surface data, measured by 3D scanner, is not set the coordinate system. So, the specialists pasted the scannable markers to the parts of the body beforehand so as to set the coordinate system. Here, pasting the markers had the problems such as time consuming for the specialists and psychological load to the customers. We propose an automatic detection method of the basic landmarks used for defining the coordinate system, MT(metatarsale tibiale) and MF(metatarsale fiburale), from the point cloud of a human foot using regression analysis. Then the coordinate system of the foot model is defined by using these obtained MT and MF. Then, we attempt to improve the accuracy by the Free Form Deformation method.

Key words: human shape modeling, anatomical landmarks, Free-Form Deformation, regression analysis

1. はじめに

店頭で売られている身につける製品は, 大まかな形状分類による大量生産によって設計されているため, 平均的な体型から大きく外れた身体の特長を持つ人に対しての適合性があまり良くな

かった. そこで, 従来はオーダーメイドにより個性の強い体型の人でも, ぴったりフィットする製品を手に入れることが出来ていた. しかし, オーダーメイドによる製品設計は, コストや時間等がかかるため, あまり手軽ではなかった. そこで,

3次元スキャナで計測された個人の表面形状データから製品設計に必要とされる身体モデルをコンピュータ上で生成する研究が注目されている[1]. このような製品設計システムに必要な身体モデルは、製品と身体との対応を取るために、解剖学的特徴点を持った身体モデルが必要とされる. この身体モデルの生成方法に関して様々な研究が行われている[2-8]. しかし、所要時間やコストが大きく、精度の要求される製品設計に十分応えられる誤差でのモデル生成手法の提案はされていなかった.

我々は以前の報告で、Free-Form Deformation 法[9] (以下 FFD 法と表記する) を用いて解剖学的特徴点のテンプレートを推定対象の形状に解剖学的特徴を保持したまま変形させることで、3次元足部モデルの解剖学的特徴点位置を自動推定する手法[10-12] (以下 FFD 推定法) を提案した. また、この手法で推定精度の悪かった指先の解剖学的特徴点の位置推定を、身体形状から直接抽出する手法[13]を提案した. しかし、これらの手法で扱った足部モデルは、既にその座標系を定義するために必要な点と、その座標系があらかじめ定義されているものを扱っていた. しかし、スキャナ等で計測された身体の表面形状データは座標系が定められていない. そこで、従来は座標系を定めるために必要な身体の部位に、あらかじめ3次元スキャナで計測可能なマーカーを貼る事で解決していた. しかし、マーカーを貼ることは専門家の手間や顧客への心理的負担がかかるという問題があった.

このような背景を受けて、本稿では、足部モデルの座標系を定義するのに必要な身体の部位 MT(脛側中足点)と MF(腓側中足点)の位置を推定する手法を提案する[14]. 本手法は、既に MT, MF の位置が定められているサンプルモデルセットをあらかじめ用意しておく. 次に、それらの統計的な情報を基に MT, MF 及び座標系の情報が無い表面形状データのみ足部モデルの MT, MF の位置を推定する. そして、推定された MT, MF を用いて足部モデルの座標系を設定する. また、FFD 推定法を用いることで、推定された MT, MF の位置推定の精度向上を試みる[15]. 最後に、本手法の有効性について、得られた座標系と、MT, MF の推定精度の検証実験を行い確認した.

2. 本稿で扱う基本事項

2. 1 3次元足部モデル

本研究で扱う3次元足部モデルは、形状点、解剖学的特徴点、基準点の3種類の点群で構成されている (図 1).

2. 2 形状点

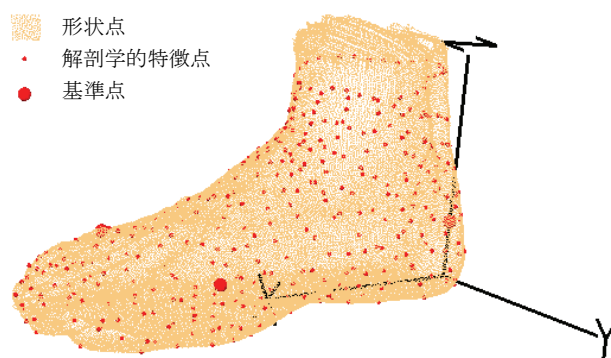


図 1 3次元足部モデル

3次元スキャナで身体の表面形状を直接計測した身体形状データであり、数万点からの点群で構成される.

2. 3 解剖学的特徴点

解剖学的特徴点は足の骨格情報に基づいて定義された点で、各足部モデル間で対応の取るために用いられる点である. この研究では 372 個の解剖学的特徴点で定義された足部モデルを用いた[16-18].

2. 4 基準点

解剖学的特徴点のうち、3次元足部モデルの座標系を設定する上で重要な点を特に基準点と呼ぶ.基準点は3点あり、それぞれ MT, MF, 踵点と呼ばれる. MT は親指の付け根の骨(中足骨頭)の最も外側に対応する点であり、MF は小指側の同様の点である.

2. 5 座標系

モデルの座標系は次のように定義される. 足底の面を XY 平面とする. 踵点を XY 平面に下ろした垂線の足が原点となる. また、この垂線が Z 軸となる. 原点から、MT と MF の中点を底面に射影

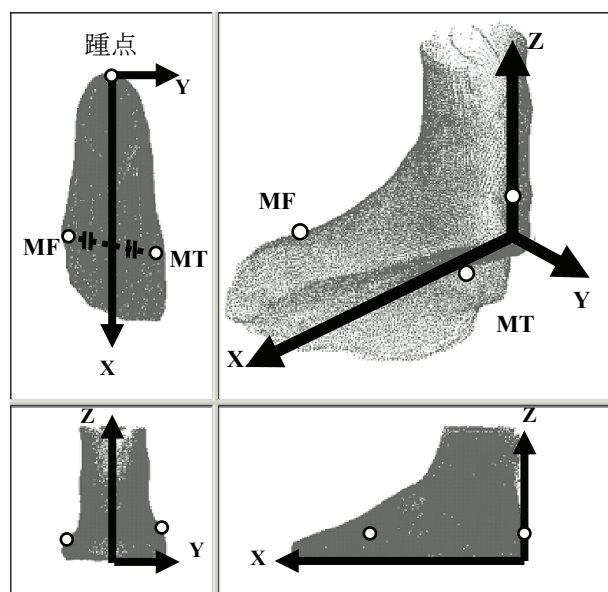


図 2 3次元足部モデルの基準点と座標系

した点へ向かうベクトルの方向が X 軸となる。 Y 軸は X および Z 軸と右手座標系をなすように定義される。 図 2 に足部モデルの基準点と座標系を示す。

2. 6 サンプルモデル

本手法ではあらかじめ基準点位置を人手で計測した複数の足部モデルを用意し、回帰分析で変形制御格子の推定式を算出する際の標本として用いる。 サンプルモデルは、形状点、解剖学的特徴点、3つの基準点および座標系を全て備えている。

2. 7 推定対象モデル

本稿において、基準点位置を推定して足部モデルの座標系を設定する対象となる形状点群を推定対象形状モデルと呼ぶ。 推定対象モデルは前述の形状点、踵点のみから構成される。

2. 8 標準モデル

標準モデルとは、各サンプルモデルの解剖学的特徴点の平均位置を解剖学的特徴点、基準点の平均位置を基準点とするモデルである。

2. 9 回帰分析

回帰分析とは、ある1つの変数の値を、別の変数の値を使って、予測したり制御したりする場面で利用する手法である[19]。 予測したい変数を目的変数と呼び、予測に使う変数を説明変数と呼ぶことにする。 回帰分析には単回帰分析と重回帰分析がある。 説明変数が1つの場合が単回帰分析で、2つ以上の場合が重回帰分析である。 重回帰分析は、(1)式のように目的変数 y を n 個の説明変数 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ の1次式で表す手法である。

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots + a_nx_n + a_{const} \quad (1)$$

ここで、 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ は(偏)回帰係数と呼び、 a_{const} は定数項と呼ぶ。

(偏)回帰係数および定数項は、多数の目的変数の実測値と、その時の各説明変数の値の関係から、最小自乗法を用いて決定する。

2. 10 Free-Form Deformation

Free-Form Deformation は、Computer Graphics で用いられる3次元形状の変形手法である。 これは、形状点を、Bezier 曲線パラメータを媒介変数とし

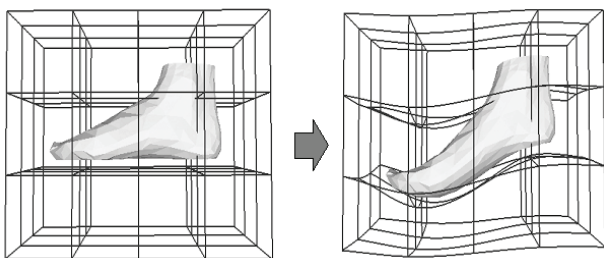


図 3 FFD 形状変形の例

た区間多項式によって、形状の周囲に設定した変形制御格子点位置の関数として再定義するものである。 この変形制御格子点を移動することによって形状をなめらかに変形することができる。 FFD 変形の例を図 3 に示す。 本手法では、この FFD を用いることで対象形状を目的形状に一致させるような変形(相同変形)を行う。

この変形制御格子点を移動させることにより内部の対象形状を変形し、対象形状と目標形状のそれぞれの特徴点が一致するような相同変形を実現できる。 このような相同変形を行う変形制御格子の配置について、本手法では文献[3]で提案された形状同士を一致させる変形制御格子の算出手法を用いて求める。

すべての格子点の3軸方向の移動量を未知数とし、(2)式の評価量 E を最小にするような格子点移動ベクトルを、共役勾配法[20]によって計算する。

$$E = \frac{1}{I \times J \times K} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K B_{(i,j,k)} + \frac{w}{N} \sum_{n=1}^N (Po_{(n)} - Pt_{(n)})^2 \quad (2)$$

ここで、

$$\begin{aligned} B_{(i,j,k)} = & ((C_{(i,j,k)} - C_{(i-1,j,k)}) - (D_{(i,j,k)} - D_{(i-1,j,k)}))^2 \\ & + ((C_{(i,j,k)} - C_{(i+1,j,k)}) - (D_{(i,j,k)} - D_{(i+1,j,k)}))^2 \\ & + ((C_{(i,j,k)} - C_{(i,j-1,k)}) - (D_{(i,j,k)} - D_{(i,j-1,k)}))^2 \\ & + ((C_{(i,j,k)} - C_{(i,j+1,k)}) - (D_{(i,j,k)} - D_{(i,j+1,k)}))^2 \\ & + ((C_{(i,j,k)} - C_{(i,j,k-1)}) - (D_{(i,j,k)} - D_{(i,j,k-1)}))^2 \\ & + ((C_{(i,j,k)} - C_{(i,j,k+1)}) - (D_{(i,j,k)} - D_{(i,j,k+1)}))^2 \end{aligned} \quad (3)$$

(2,3)式中の各記号の説明は以下の通りである。

I, J, K	それぞれ X, Y, Z 軸方向の格子点の数
$C(i,j,k)$	i, j, k 番目の移動後の制御格子点座標
$D(i,j,k)$	制御格子点の初期位置
N	モデルの特徴点数
$Po(n)$	n 番目の変形対象形状の特徴点座標
$Pt(n)$	n 番目の変形目標形状の特徴点座標
w	重み係数

座標には x, y, z の3軸成分があるが、それぞれについて(2)式の評価量 E を計算し、独立に最適解を求めた。 右辺第一項は、6近傍に隣接する制御格子点との間隔を初期状態のまま保持しようとする項で、第2項は2つの形状を一致させる項である。 すなわち、制御格子をできるだけ歪ませることなく、対象形状を目標形状に一致させるよ

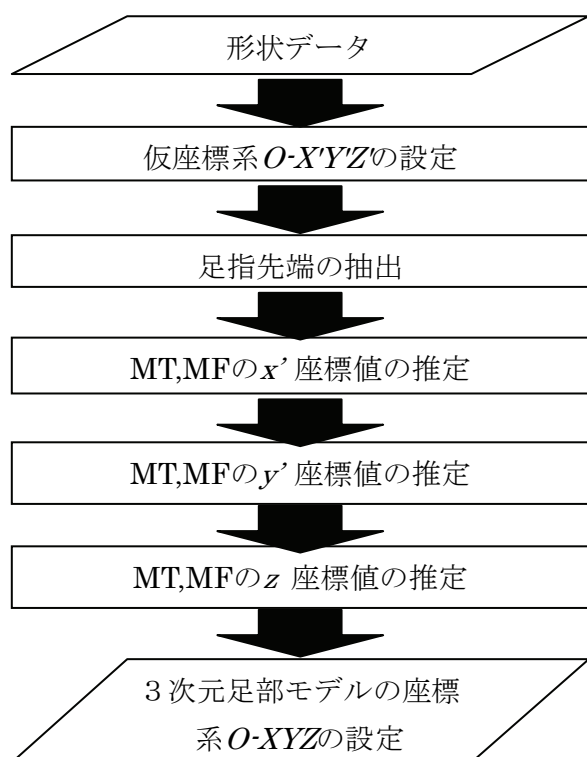


図4 3次元足部モデルの座標系の設定方法

うな制御格子点移動ベクトルを求めることになる。

3. 足部モデルの座標系の設定法

前述のとおり、本来、足部モデルの座標系 $O-XYZ$ の定義によれば X 軸と Y 軸の向きは MT , MF の位置に依存する。しかし、3次元スキャナから得られる生データ座標系 $O-X''Y''Z$ の座標値は、スキャン時の足の姿勢に依存して設定されるものである。そのためこの段階では足部モデルの形状データの座標値を共通のローカル座標系に存在するものとして扱うことが出来ない。

そこで提案手法の図4に示されるような、大きく5つのステップにより足部モデルの座標系を設定する。以下では、この手順に沿って説明をしていく。ここで補足しておく、生データの足底面はスキャン時の姿勢に関わらず同一平面上に存在する。したがって、 XY 平面と Z 軸の方向に関して、求めるべきモデルの座標系 $O-XYZ$ と生データ座標系 $O-X''Y''Z$ は同一であり、これらは既に定義されているとみることができる。また踵点の位置は足底面への投影後の形状の曲率を基に精度良く求められることが確認できたので、本稿ではこれらは既知であるとして扱う。したがって X 軸の方向のみを定めればよい。

3.1 仮座標系の設定

本手法は、スキャン時の足の向きが大きくずれると、足部モデルの X 軸方向に対して、足の向きに対応した生データ座標系の X'' 軸方向も大きく

ずれる。ところが、本手法は X'' 方向が X 方向よ

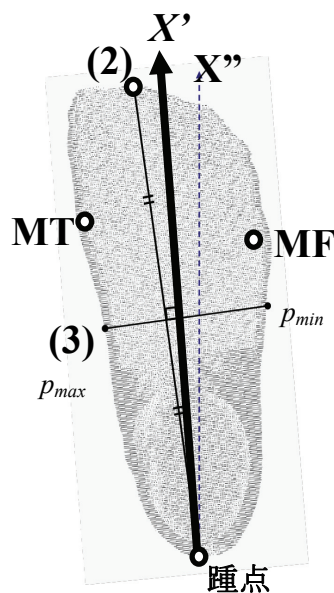


図5 3次元足部モデルの仮座標系の設定

(X' :仮座標系, X'' :生データ座標系)

り大きくずれると、後述するように推定精度が悪くなる。そこで、 X'' 軸方向を X 軸方向に近づけるために X'' 方向に代わる X' 方向をもつ仮座標系 $O-X'Y'Z$ を設定する必要がある。本手法では、仮座標系を設定する事により、スキャン時に足の向きが大きくばらついても、安定した精度で座標系を設定することができる。

本手法では、以下のような方法で仮座標系 $O-X'Y'Z$ を設定する。

- (1). 生データ座標系を $O-X''Y''Z$ とし、形状点を $X''Y''$ 平面に投影する。
- (2). X'' 座標が最大となる形状点を探す。
- (3). 踵点と(2)の点を結ぶ線分の垂直二等分線を引き、二等分線上で Y'' 座標において最大最小となる形状点を端点(p_{max} , p_{min})として取り出す。
- (4). 踵点から p_{max} , p_{min} の中点に向けて直線を引きこれを X' 軸とする。
- (5). Y' 軸を X' 軸および Z 軸と右手座標系をなすように定義する。

図5にこれらの処理の一部を示す。

3.2 足指先端の抽出

先行研究の手法を用いて、図6に示す足指先端にあるランドマークを抽出する[13]。この手法は、はじめに、足指先端の凹凸情報を基に、各足指の境界の断面を設定する。そして、それらの断面を用いて、図6の青線に示すような足指の中央を通る中間断面を設定する。そしてこの中間断面上で最も先端にある形状点から解剖学的特徴点の位置を抽出する。

この手法では、入力の一部として MT と MF が要

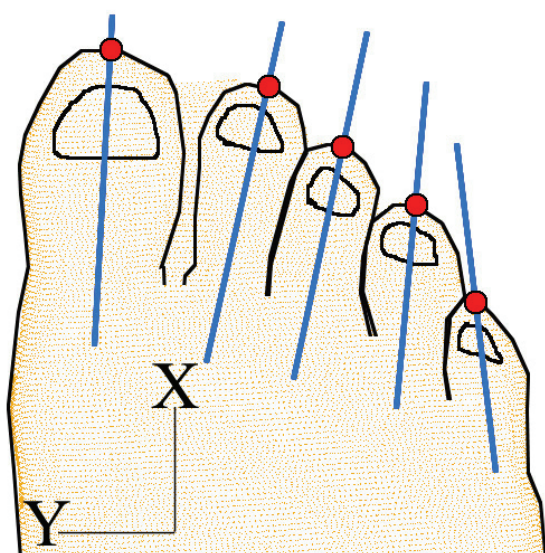


図 6 足指先端にあるランドマーク

求されるが、この値の精度が高くなくとも、足指先端のランドマークを精度良く得ることができるので、本稿では標準モデルMTとMFの座標値を用いた。

3. 3 MT, MF の x' 座標値の推定

サンプルモデルから、MT, MFの x' 座標の推定に用いるべく偏回帰式を算出する。ここでは、5つの足指先端を説明変数の候補として予備実験を行い、最も結果が良かった式を x' 座標の推定に採用した。

(4)式に示されるようにMTの x' 座標の推定には第1, 第4, 第5指の先端を用いた。またMFの推定には(5)式に示されるように第5指の先端のみを用いる。なお式中の添え字“const”は定数項を示す。

$$x_{MT} = a_{MT1}x_1^2 + a_{MT4}x_4^2 + a_{MT5}x_5^2 + a_{MTconst} \quad (4)$$

$$x_{MF} = a_{MF5}x_5^2 + a_{MFconst} \quad (5)$$

これらの式について、サンプルモデルの足指先端の座標値から(偏)回帰係数を求める。算出された回帰式に推定対象モデルの足指先端の x' 座標を代入することでMTとMFの x' 座標が求められる。

3. 4 MT, MF の y' 座標値の推定

次に、再び回帰分析を用いる事で y' 座標値を推定する。しかしこの場合、表面形状の特徴から説明変数とできるような点を得るのが困難であった。そこで本稿では、足の底面の点群に着目した。ここで、足底の点群とは $0 < z < 1.5 \text{ mm}$ なる点群を指す。

足底点群において、 $x' = x_{MT}$ なる点で、 y' 座標が最大である点を $y_{MTy\max}$ とし、また $x' = x_{MF}$ なる点で、 y' 座標が最小である点を $y_{MFy\min}$ とする(図 7)。

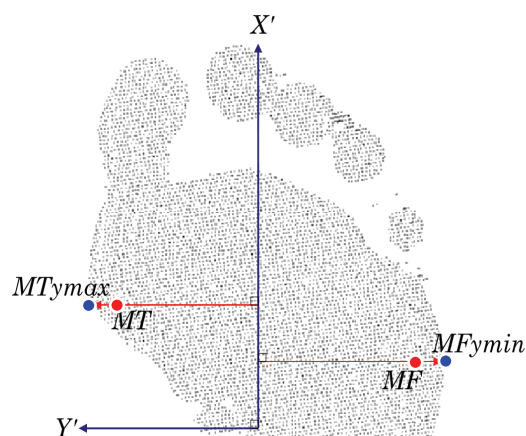


図 7 y' 座標値の推定時の説明変数となる点

(6)式および(7)式で示すように、それぞれMTとMFの y' 座標を推定する際の説明変数とする。

$$y_{MT} = b_{MTy\max} y_{MTy\max} + b_{MTyconst} \quad (6)$$

$$y_{MF} = b_{MFy\min} y_{MFy\min} + b_{MFyconst} \quad (7)$$

これらについてサンプルモデルから(偏)回帰係数を計算する。推定対象モデルからも説明変数となる点を取り出し、それぞれ、(6)式および(7)式に代入することでMTとMFの y' 座標値を推定する。

3. 5 MT, MF の z 座標値の推定

z 座標値は、全てのモデルにおいて安定して抽出できる説明変数に利用できるような点を得る事が困難であった。そこで、推定されたMT・MFの x' , y' 座標値を形状上に投影することで z 座標値を算出する。しかし、推定された x' , y' 座標値を持つ形状点が存在するとは限らない。そこで以下のような処理で形状点付近に投影することにより z 座標を算出する。推定されたMT, MFの x' , y' 座標値を中心として、半径 5mmの円柱状の範囲の形状点を取り出す(図 8)。しかし、このままでは、足

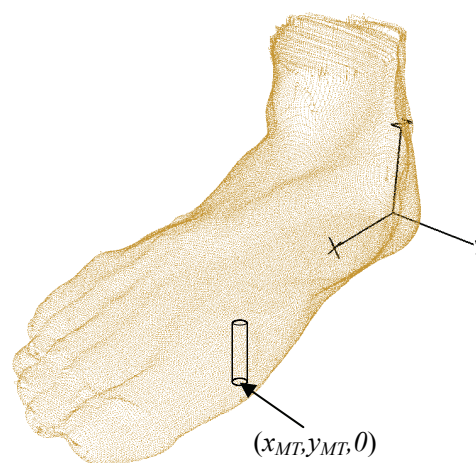


図 8 取り出す形状点

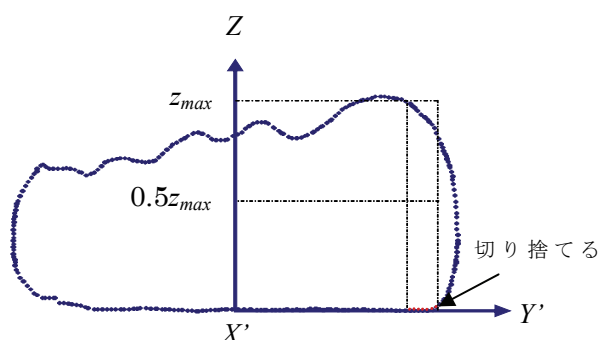


図9 X' 軸+方向から見た様子

底の点群も取り出すことになる．そこで，範囲内の形状点の z 座標の最大値を z_{max} として

$$0.5z_{max} \leq z \leq z_{max} \quad (8)$$

を満たす形状点以外を切り捨てる(図9)．

これにより，数十点から数百点程度の点群に絞り込まれる．これらの形状点から，検証実験で一番精度の良かった z 座標値の平均値を推定モデル z 座標値とした．

3. 6 座標系の設定

XY 面上において，これまでの過程での推定結果からMTとMFの中点を XY 面上投影した点の位置が決まる．この垂線の足に向けて原点から直線を引き，これを足部モデルの X 軸とする．また Y 軸を X 軸および Z 軸と右手座標系をなすようにとり，座標系を定義し直す．以上の処理を行い，足部モデルに座標系を設定する．

4. FFD 推定法

我々の以前の報告[11,12]で提案した FFD 法を

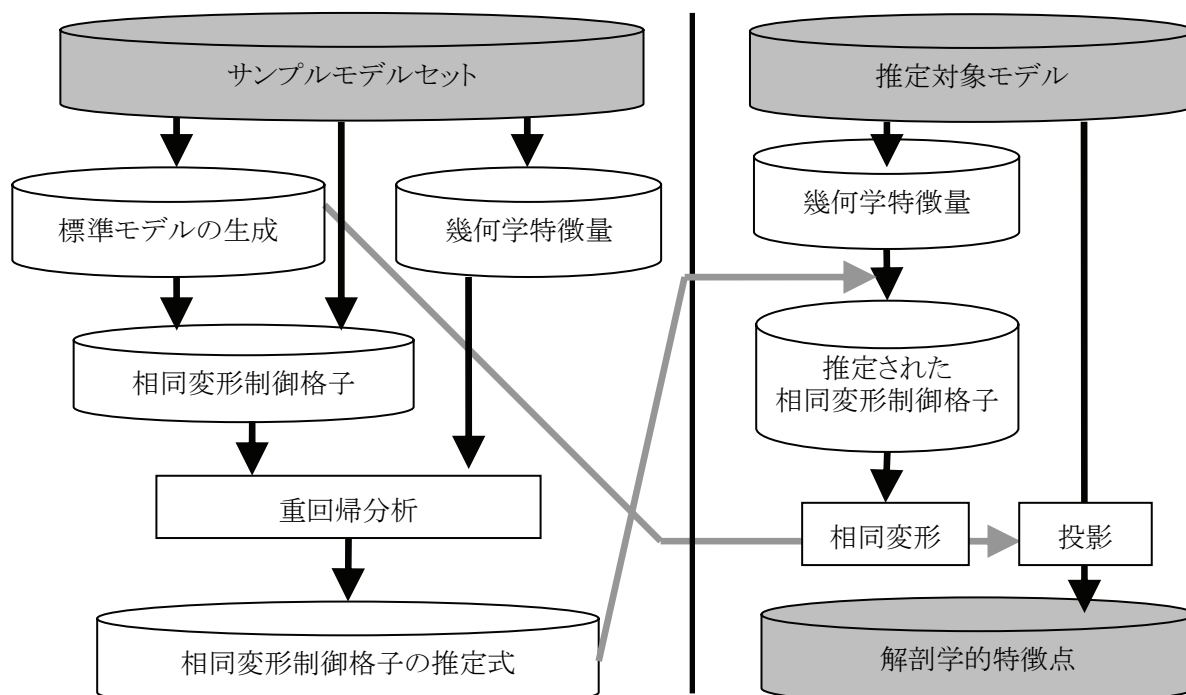


図10 FFD 推定法による3次元足部モデル生成の処理手順

用いた解剖学的特徴点の推定法について，もう一度ここで触れておく．

4. 1 処理手順

標準モデルをサンプルモデルに一致させるように相同変形する FFD の変形制御格子の推定式算出手順を図10の左半分に，推定対象モデルの解剖学的特徴点推定手順を図10の右半分に示す．

4. 2 相同変形する変形制御格子の算出

標準モデルを各サンプルモデルの形状に相同変形する FFD の変形制御格子の算出手順について説明する．

FFD を用いて 2.8 節で述べた標準モデルを各サンプルモデルの形状に相同変形させる変形制御格子を算出する．ここで相同変形を，互いの解剖学的特徴点位置が一致するような変形として定義する．

4. 3 幾何学特徴量の抽出

表面形状の曲率極大／極小点や，表面形状断面における Z 軸方向への最大値を取る点など幾何学的特徴を持つ点の座標値を幾何学特徴量と定義するが，本稿では3章の手法を用いて推定されたMT，MFを幾何学特徴量として用いた．なお，MT，MFの y 座標値は多重共線性[19]が生じるのを防ぐために，一方を幾何学特徴量から除いている．

4. 4 変形制御格子の推定式の算出

標準モデルを各サンプルモデルに相同変形する変形制御格子と，各サンプルモデルの幾何学特徴量を用いて，幾何学特徴量から変形制御格子を推定する式を重回帰分析によって算出する．このとき重回帰式として，予備実験を行った結果，最

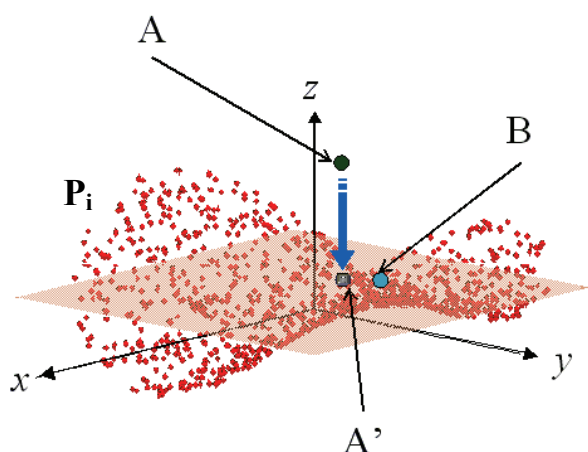


図 11 表面形状への投影

も推定精度の高かった(9)式を用いることとした。

$$y = \sum_{i=1}^5 (a_i x_i^2) + a_{const} \quad (9)$$

(9)式で変形制御格子の制御格子点の各座標値を目的変数 y とし、4.3節で抽出した幾何学特徴量を説明変数 x_i とした。

4. 5 推定対象モデルの解剖学的特徴点の算出

4. 5. 1 推定対象モデルに対する標準モデルの相同変形

はじめに、推定対象モデルの足長が標準モデルの足長と同じになるように、推定対象モデルを等比変形する。次に、4.3節で述べたようにして推定対象モデルの幾何学特徴量抽出する。

それから、この幾何学特徴量を4.4節で算出した変形制御格子の推定式に代入して、標準モデルが推定対象モデルと一致するような相同変形を行う変形制御格子を求める。最後に、標準モデルをこの変形制御格子を用いて変形する。

4. 5. 2 形状点上への投影

4.5.1節で得られた変形後の標準モデルと等比変形をした推定対象モデルを、元のサイズとなるように等比変形する。次に、図11に示すような投影を行う。まず、変形後の標準モデルの各解剖学的特徴点 A から最も近い推定対象形状の形状点 B を求める。次に、点 A からユークリッド距離で近くにある推定対象形状の形状点 P_i を数点取り出し、 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ を使って点 B における近似接平面を計算する。そして、点 A をその近似接平面に向かって垂直に投影した点を A' とする。そして、点 A' を推定対象モデルの解剖学的特徴点とする。

5. 本手法の評価

5. 1 実験条件

提案手法の実装にあたり、MT, MFの位置が既知である190名分の3次元足部モデルのうち、150

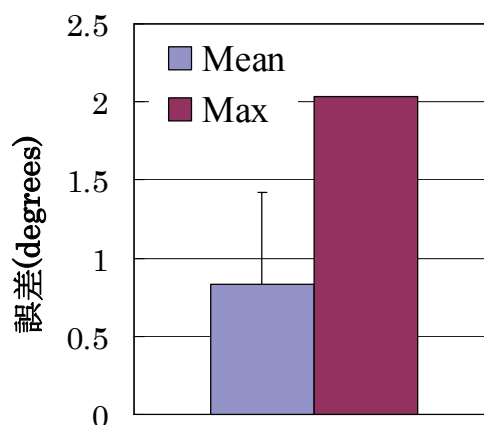


図 12. 設定された X 軸の誤差

名分をサンプルモデルセットとして重回帰分析を行い、40名分を推定対象モデルとする。

5. 2 座標系設定法の評価

3章で提案した手法の評価を行った。

回帰分析の結果、(4)～(7)式はそれぞれ(10)～(13)式に推定された。ここで、mm単位で測定した座標値を変数の値とした。

$$x_{MT} = 0.00146 x_1^2 + 0.000409 x_4^2 - 0.000543 x_5^2 + 94.7 \quad (10)$$

$$x_{MF} = 0.00183 x_5^2 + 82.8 \quad (11)$$

$$y_{MT} = 0.951 y_{MTy \max} - 0.958 \quad (12)$$

$$y_{MF} = 0.834 y_{MFy \min} - 1.89 \quad (13)$$

実験結果を図12に示す。ここで誤差とは、提案手法によって定義された座標系と、専門家によってマーキングされたものから算出された座標系における比較をした際に、踵点を中心として両X軸(Y軸でも同様)がなす角である。ここで、人の手による基準点の計測誤差は平均1mmと言われている。標準モデルにおいて、踵点が1mmずれていた場合、X軸の方向に 0.66° の誤差が出ることとを考慮すると、この誤差は十分小さいと言える。

5. 3 FFD 推定法の評価

FFD推定法を用いて、3章で推定されたMT, MFの推定精度の改善の評価を行った。実験結果を図13に示す。

ここで、平均推定誤差とは推定されたMT, MFの位置と、専門家によってマーキングされたものとのユークリッド距離、及びその各軸方向成分を示したものである。また、提案手法とは3章の手法により推定されたMT, MFの精度である。そして、提案手法+FFD推定法とは、提案手法により推定されたMT, MFの座標値を用いて、FFD推定法により推定精度の改善を試みた結果である。この結果から、FFD推定法を用いることで、十分な精度で推定できなかったMT, MFの位置

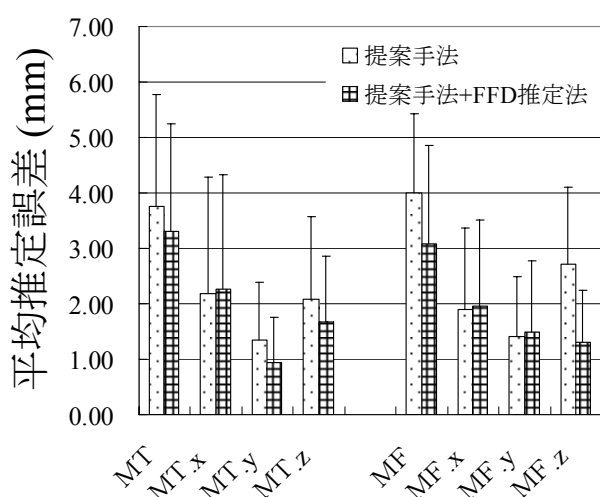


図 13 基準点の推定誤差の改善

推定の精度をさらに向上することが確認できた。

6. むすび

本稿では、座標系が定められていない3次元スキャナで計測された身体の表面形状データのための3次元足部モデルから、回帰分析を用いて3次元足部モデルの座標系の設定に用いる基準点位置を推定する手法を提案した。また、推定された基準点位置の推定精度を、FFD推定法によって改善する事を試みた。そして、提案手法の検証実験を行い、本手法の有効性を示した。

今後の課題として、推定精度の改善、推定精度とフィット感の関係の調査、他の身体部位への適用等を考えている。

謝辞

株式会社アイウェアラボラトリー木村幸三代表取締役他には、データの提供をはじめ本研究分野に関する有用な助言を賜りました。心から感謝致します。

参考文献

- [1] 日本皮革産業連合会, "イージーオーダーシステム研究報告書", 日本皮革産業連合会, 1989.
- [2] 西田典了, 福嶋茂信, 美濃導彦, "部分計測データへの標準人体モデル当てはめによる人体形状推定法", 電子情報通信学会論文誌, vol.J84-D-II, no.7, pp.1310--1318, 2001.
- [3] 持丸正明, 河内まき子, 福井幸男, 堤江美子, "FFD法による形態間距離に基づく足部三次元形態の特徴分類", 人間工学, vol.33, no.4, pp.229--234, 1997.

[4] L.Dekker, I.Douros, B.F.Buxton, P.Treleaven, "Building Symbolic Information for 3D Human Body Modeling from Range Data", 3DIM99 Proceedings, pp.388--397, 1999.

[5] B.F.Buxton, L.Dekker, I.Douros, T. Vassilev, "Reconstruction and interpretation of 3D whole body surface images", Scanning 2000 Proceedings, 2000.

[6] 青木義満, 寺嶋雅彦, 中島昭彦, 橋本周司, "X線規格画像を用いた3次元頭部物理モデルの構築とその臨床応用", 電子情報通信学会論文誌, vol.J84-D-II, no.2, pp.390--399, 2001.

[7] B.Allen, B.Curless, Z.Popovic "Articulated Body Deformation from Range Scan Data", SIGGRAPH'2002, vol.21, no.3, pp.612--619, Feb. 2002.

[8] D.DeCarlo, D.Metaxas, and M.Stone, "An anthropometric face model using variational technique", SIGGRAPH'98, pp.67--74, July, 1998.

[9] T.W.Sederberg, "Free-form deformation of solid geometric models", Proceedings of ACM SIGGRAPH'86 in Computers & Graphics, vol.20, no.4, pp.151--160, 1986.

[10] M. Mochimaru, M.Kouchi, H.Yahara, and Y.Fukui, "Automatic landmarking based on 3-D foot database using the FFD method", SAE Digital Human Modeling for Design and Engineering, 2004, pp.2004-01-2197.

[11] 矢原弘樹, 日隈直紀, 福井幸男, 西原清一, 持丸正明, 河内まき子, "FFDを用いた3次元足部モデルの解剖学的特徴点抽出", 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J87-D2 No.4, pp.967-977, Apr. 2004.

[12] Hiroki Yahara, Naoki Higuma, Yukio Fukui, Seiichi Nishihara, Masaaki Mochimaru, Makiko Kouchi, "Estimation of anatomical landmark positions from model of 3-dimensional foot by the FFD method," Systems and Computers in Japan, Vol.36, No.6, pp26-38, Apr. 2005.

[13] Hiroki Yahara, Shinpei Inou, Yukio Fukui, Seiichi Nishihara, Masaaki Mochimaru, Makiko Kouchi, "Extraction of Five Anatomical Landmarks on Toes of a Foot Model by using the Surface Shape," SAE Digital Human Modeling for Design and Engineering, pp.2005-01-2730, Jun. 2005.

[14] Yoitsu Takahashi, Hiroki Yahara, Yukio Fukui,

Seiichi Nishihara, Masaaki Mochimaru, Makiko Kouchi, "Defining the Coordinate System of 3D Foot Model Using Regression Analysis," Proc. NICOGRAPH International 2006, s4-4, Jun. 2006.

[15] Hiroki Yahara, Yoitsu Takahashi, Yukio Fukui, Seiichi Nishihara, Masaaki Mochimaru, Makiko Kouchi, "Estimation of Basic Anatomical Landmarks on 3D Foot Model using the Free-Form Deformation Method," Proc. NICOGRAPH International 2006, s4-3, Jun. 2006.

[16] E.Tsutsumi, M.Kouchi, "Geometrical modeling of the foot", 5th ASEE International Conference ECGDG, pp.171--174, 1992.

[17] 土肥麻佐子, 持丸正明, 河内まき子, "足部計測値に基づく3次元形態特性の分布推定", 人間工学, vol.36, no.2, pp.73--80, 2000.

[18] 人間生活工学研究センター, "新規産業育成即効型国際標準開発事業 身体形態特性データの計測・データベース化手法に係る標準化", pp.21, 2000.

[19] 内田治, "すぐ分かる EXCEL による多変量解析", 東京図書株式会社, 1996.

[20] 矢部博, 八巻直一, "非線形計画法", 朝倉書店, 1999.