

FFD法を用いた3次元足部モデルの解剖学的特徴点の位置推定における誤差要因の分析

矢原弘樹[†], 水野一徳[†], 福井幸男[†], 西原清一[†], 持丸正明[‡], 河内まき子[‡],

[†]筑波大学 システム情報工学研究科 コンピュータサイエンス専攻, 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

あらまし 本稿では3次元スキャナ等で計測された身体形状データから, 製品設計に用いるための解剖学的特徴点情報を持った身体モデルを自動生成する手法について述べる. 解剖学的特徴点は3Dスキャナによって得られた身体の表面形状から自動抽出することは非常に困難である. 我々は以前の報告で, FFD法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変形させることで, 解剖学的特徴点位置を自動推定する手法を提案した. しかし, この手法で推定された解剖学的特徴点は, まだ実用的な精度で推定できていなかった. そこで, この手法における誤差の要因を分析し, その対策をすることで誤差を減少させることを試みた. 足部モデルの中でも特に表面形状に解剖学的特徴が現れにくく, 自動推定が難しいくるぶしの解剖学的特徴点の推定に注目する.

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, 重回帰分析

Analysis of Error Factors in Estimation of Anatomical Landmarks from 3D Foot Model using Free-Form Deformation

Hiroki YAHARA[†], Kazunori MIZUNO[†], Yukio FUKUI[†], Seiichi NISHIHARA[†],
Masaaki MOCHIMARU[‡], Makiko KOUCHI[‡]

[†]Department of Computer Science, 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. These landmarks however cannot be extracted automatically from point cloud data of human body surface obtained by a 3D scanner. In our previous report, we proposed the method of extracting the landmarks automatically by deforming the template of point cloud form data with known landmark positions using Free Form Deformation (FFD) method. In this method, it is possible to estimate positions of the landmark by deforming the template model with the anatomical feature retained. However, estimation error in the method was more than permissible amount. This paper discusses an analysis of the factors of estimation error, and proposes revised method of reduced estimated errors for landmarks around the ankle.

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

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

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って設計される大量生産されているため, 平均的な体型から大きく外れた身体の特徴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, 3D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な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。

このような背景を受けて、3Dスキャナ等により計測された形状点データから解剖学的特徴点の位置を自動抽出することを研究の目的とする。我々は以前の報告[9-11]で、Free-Form Deformation法[12]（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を提案した。しかし、この手法で推定された解剖学的特徴点は、まだ実用的な精度で推定できていなかった。そこで、この手法における誤差の要因を分析し、その対策をすることで誤差を減少させることを試みた[13]。本稿では足部モデルの中でも特にくるぶしの解剖学的特徴点の推定に注目する。

2. 本手法で用いる基本事項

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）。形状点は足の表面形状を表現する数万の点群で、3Dスキャナで計測したものである。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、各足間で対応の取るために用いられる点である。本研究では372個の解剖学的特徴点で定義された足モデルを用いた[14-16]。基準点は足モデルの座標系を定義するための点で解剖学的特徴点のうちの3点であり、踵点、MT、MFで構成されている。

2.2 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

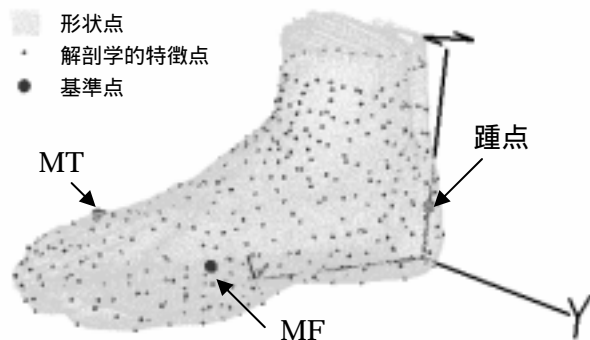


図1 3D足部モデル

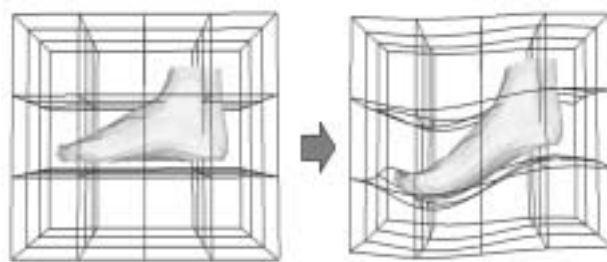


図2 FFD形状変形の例

って形状をなめらかに変形することができる。FFDを用いた形状変形の例を図2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。

オリジナルのFFDでは区間多項式としてBezier曲線を利用しているが、Bezier曲線では格子点の局所的な移動が形状全体に影響するため、局所的な変形操作が困難であるという問題があった。この問題を解決するために、ここではBezier曲線を3次B-spline曲線に置き換えることにより局所的な変形を実現した。また、ノットベクトルが等間隔に定義された一様なB-spline曲線式を、等間隔に配置された制御格子点群で用いることで、初期格子を適用した時点で形状の変形が全く生じない特長を持っている[17,18]。

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、式(1)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[19]によって計算する。

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

$$B_{(i,j,k)} = ((C_{(i,j,k)} - C_{(i-1,j,k)}) - (D_{(i,j,k)} - D_{(i-1,j,k)})) + (C_{(i,j,k)} - C_{(i+1,j,k)}) - (D_{(i,j,k)} - D_{(i+1,j,k)}) + (C_{(i,j,k)} - C_{(i,j-1,k)}) - (D_{(i,j,k)} - D_{(i,j-1,k)}) + (C_{(i,j,k)} - C_{(i,j+1,k)}) - (D_{(i,j,k)} - D_{(i,j+1,k)}) + (C_{(i,j,k)} - C_{(i,j,k-1)}) - (D_{(i,j,k)} - D_{(i,j,k-1)}) + (C_{(i,j,k)} - C_{(i,j,k+1)}) - (D_{(i,j,k)} - D_{(i,j,k+1)}), \quad (2)$$

ただし、

I, J, K それぞれ X, Y, Z 軸方向の格子点の数、

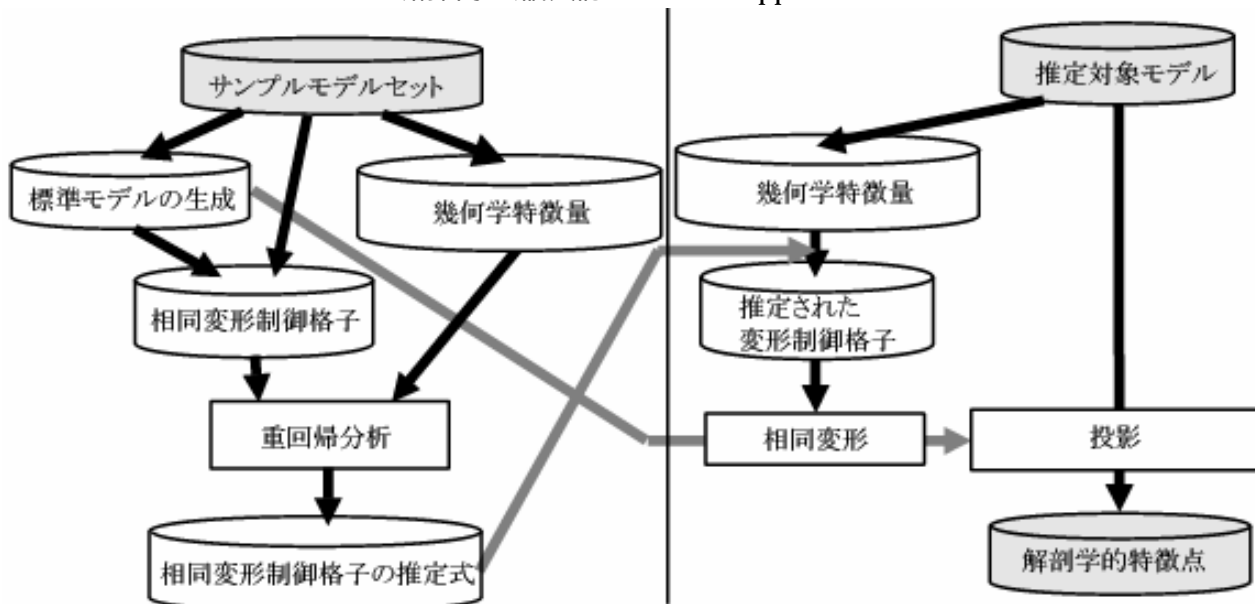


図 3 3次元足部モデル生成の処理手順

- $C(i,j,k)$ 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、それぞれについて式(1)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うな制御格子点移動ベクトルを求めることになる。

3. FFD 法を用いた解剖学的特徴点の推定法

FFD 法を用いた解剖学的特徴点の推定法[9-11]について、概略をここで触れておく。

3.1 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 3 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 3 の右半分に示す。

3.2 足部モデル

3.2.1 サンプルモデル

本手法ではあらかじめ解剖学的特徴点位置を手で計測した複数の足部モデルを用意し、重回帰分析で変形制御格子の推定式を算出する際のサンプルモデルとして用いる。サンプルモデルは、形状点、解剖学的特徴点、基準点から構成される。

3.2.2 推定対象モデル

解剖学的特徴点位置を推定して足部モデルを生成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、基準点から構成される。

3.3 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。

3.3.1 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。

3.3.2 相同変形する変形制御格子の算出

FFD を用いて 3.3.1 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。

3.4 幾何学特徴量の抽出

表面形状の曲率極大点/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し、変形させるときのキーポイントとする。

図 4 に示す足部モデルを足長方向に 10 等分した時の断面上の点の座標値や、図 5 に示す甲の移行点等を幾何学特徴量として扱う。

3.5 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

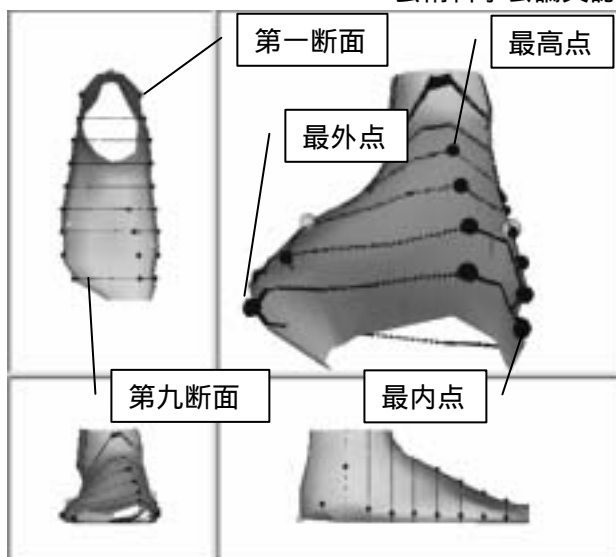


図4 幾何学特徴量(断面の最内点・最外点・最高点)

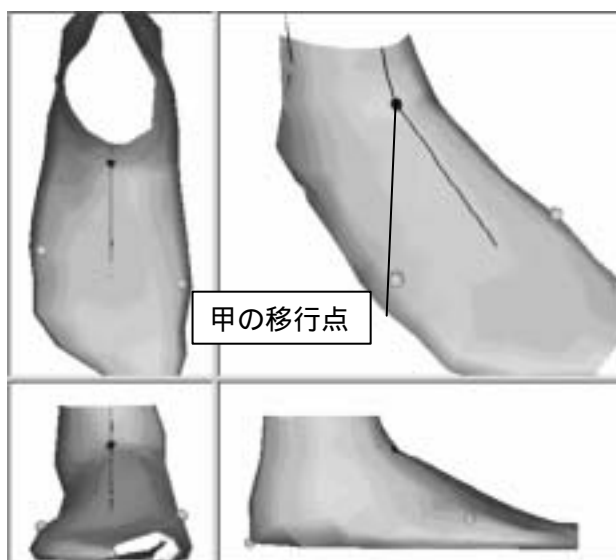


図5 幾何学特徴量(甲の移行点)

とき重回帰式として、予備実験を行った結果、最も推定精度の高かった(3)式を用いることとした。

$$y = \sum_{i=1}^n (a_i x_i^2) + a_{const} \quad (3)$$

ここ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、3.4 節で抽出した幾何学特徴量を説明変数 x_i とした。 a_i は偏回帰係数、 a_{const} は定数項である。

3.6 推定対象モデルの解剖学的特徴点の算出

3.6.1 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、3.4 節で述べた推定対象モデル

の幾何学特徴量抽出する。

それから、この幾何学特徴量を 3.5 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させる。

3.6.2 形状点上への投影

3.6.1 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、変形後の標準モデルの各解剖学的特徴点について、ユークリッド距離でもっとも近くにある推定対象モデルの形状点を求め、それを推定対象モデルの解剖学的特徴点とする。

4. 誤差要因の分析

4.1 誤差要因の仮説

この手法で推定された解剖学的特徴点は、まだ実用的な精度で推定できていなかった。特に、個人差が強く現れる爪先や、解剖学的特徴が表面形状に現れにくいくるぶし等の解剖学的特徴点の誤差が大きかった。発生する可能性のある誤差の要因として以下のようなものが考えられる。

A) FFD 相同変形時の各モデルの形体間距離が大きい

標準モデルをサンプルモデルに各々の解剖学的特徴点を一致させるように、FFD 相同変形させた時の一致度が低い。

B) サンプル数不足

重回帰分析のサンプル数不足による重回帰式の偏りが存在する。

C) 幾何学特徴量の質と量が不足

幾何学特徴量と解剖学的特徴点との相関が高いという前提で処理を行っているが、幾何学特徴量が解剖学的特徴点の位置を十分説明できていない。

D) 手法的に限界がある

もし仮に、理想的な幾何学特徴量を抽出する事ができたとしても、多段の処理を経ることで誤差が蓄積され、実用範囲を超えるような誤差が生じてしまう。

4.2 検証実験

前節で挙げた要因がそれぞれどれくらい最終的な解剖学的特徴点の推定誤差に影響するか以下のような検証実験を行った。なお、複合的に影響が出るために、必ずしも前述の誤差要因と次の実験が一对一に対応している訳ではない。

実験1. 標準モデルをサンプルモデルに FFD 法で相同変形させた時の各モデル間の解剖学的特徴点間の距離を求める。

実験2. 重回帰分析に使用するサンプル足モデ

ルの数を変化させる。

実験3. 幾何学特徴量の数を変化させて重回帰分析を行う。

実験4. 重回帰分析の説明変数に求めるべき解剖学的特徴点を使用する。

4.2.1 実験1

この実験は FFD 法を用いて標準モデルを推定対象モデルに互いの解剖学的特徴点が一一致するように相同変形させた時の両形状の一致度を検証することを目的とする。実験条件として、格子の分割数を変化させ、重要度に基づき一致させる解剖学的特徴点の重みを変化させた。

実験の結果を図6に示す。横軸は格子の分割数を示す。例えば、8x4x4はX軸方向に8、Y軸方向

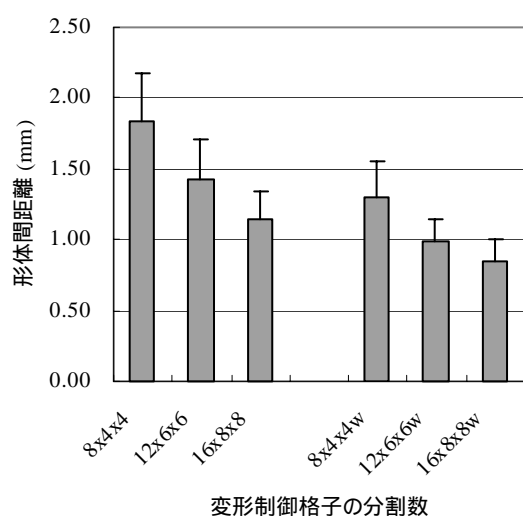


図6 実験1の結果 (標準モデルをサンプルモデルに FFD 法で相同変形させた時の各モデル間の形体間距離)

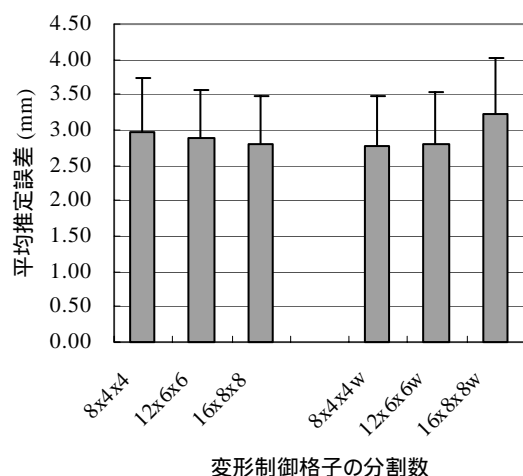


図7 実験1の結果 (推定式で推定された変形制御格子を用いて標準モデルを変形させた時の推定対象モデルとの誤差)

に4、Z軸方向に4分割したことを示す。wは解剖学的特徴点の重みを変化させたことを示す。この結果より、平均誤差が1mm前後であることから十分な誤差で形状は一致していることが分かる。特に格子の分割数を増やせば増やすほど、また解剖学的特徴点の重みを変化させた方がより形状がよく一致する結果になった。

次に、この FFD 変形制御格子を使って重回帰分析を行い、得られた推定式で推定された FFD 変形制御格子で標準モデルを変形させたところ、その時の誤差は図7のようになった。これより、あまり格子の分割数を増やしすぎると FFD 変形の際に局部的に大きな変形等が起こってしまい、そのような変形制御格子をうまく推定することができていないことがわかる。これは、標準モデルの解剖学的特徴を維持しないような変形が起こっていることが原因であると考えられる。このことから、格子の分割数は、ただ増やせばよいということではないことが分かる。

4.2.2 実験2

この実験は重回帰分析に使用するサンプルモデルの数が十分であるか検証することを目的とする。実験条件として、サンプルモデルの数を変化させた時に、重回帰分析で得られた推定式で推定した変形制御格子が推定誤差にどのような影響を与えているか調べた。この時、重回帰分析の説明変数に使用する幾何学特徴量は33個の項目とした。この33個の幾何学特徴量は前回の報告の時に使用していた41個から、モデル間であまり対応の取れていない8つの項目を省いたものになる。

実験の結果を図8に示す。サンプル数を増やした時の誤差はある値に収束している。このことから、現在の実験条件では十分なサンプル数であることが分かった。

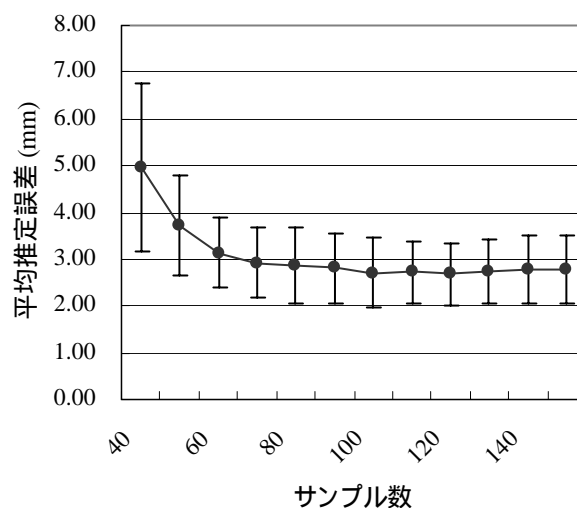


図8 実験2の結果

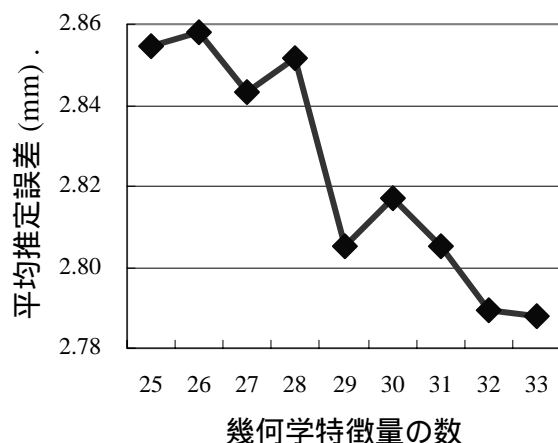


図9 実験3の結果

4.2.3 実験3

この実験は重回帰分析で説明変数として使用する幾何学特徴量が十分であるか検証することを目的とする。実験条件として、最初に現在使用している33個の幾何学特徴量と求めるべき解剖学的特徴点とのそれぞれの座標値の相関係数を計算した。次に、相関係数の大きさを元に使用する幾何学特徴量の数を変化させて推定誤差にどのような影響を与えているか調べた。サンプルモデルは150個とし、検証用に40個のモデルを使用した。

実験の結果を図9に示す。幾何学特徴量を減らすと推定誤差は増えていることがわかる。このことから、まだ幾何学特徴量を増やせば推定誤差が減る可能性があることが言える。

4.2.4 実験4

この実験はもし仮に理想的な幾何学特徴量を抽出できた時に、提案手法での推定精度がどの程度の誤差に収まるか検証することを目的とする。

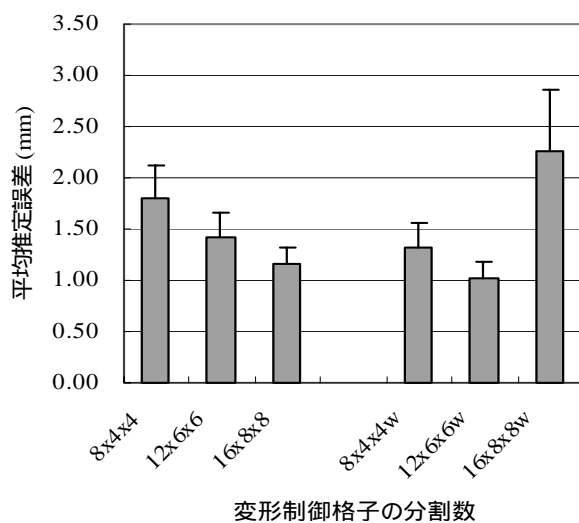


図10 実験4の結果

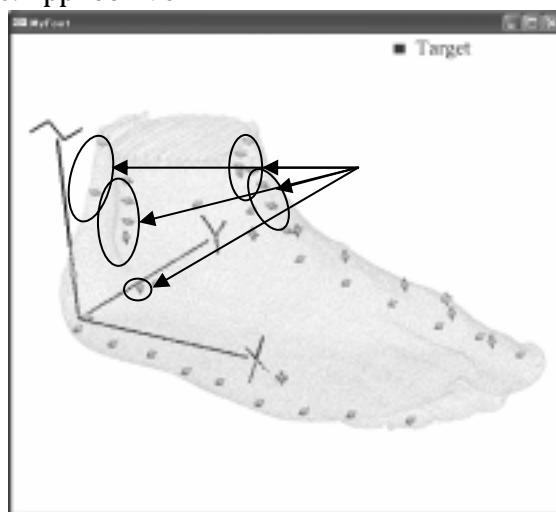


図11 追加した幾何学特徴量

理想的な幾何学特徴量とは、各モデル間で対応がとれており、解剖学的特徴点の位置を十分に説明できることが条件である。そこで、実験条件として、重回帰分析の説明変数に、理想的な幾何学特徴量として解剖学的特徴点を使用した。

実験の結果を図10に示す。実験1の結果と照らし合わせると、もし仮に理想的な幾何学特徴量が抽出できた場合、この手法での推定誤差は十分低く抑えることが可能であることを確認した。

5. 改善

検証実験の結果から、現時点では幾何学特徴量の質と量が不足していることが、解剖学的特徴点の推定誤差に大きく影響を与えていると結論付けられる。ここで言う幾何学特徴量の質とは、どのようなモデルに対しても安定して対応した部位を抽出することができ、解剖学的特徴点の位置を十分に説明できることである。

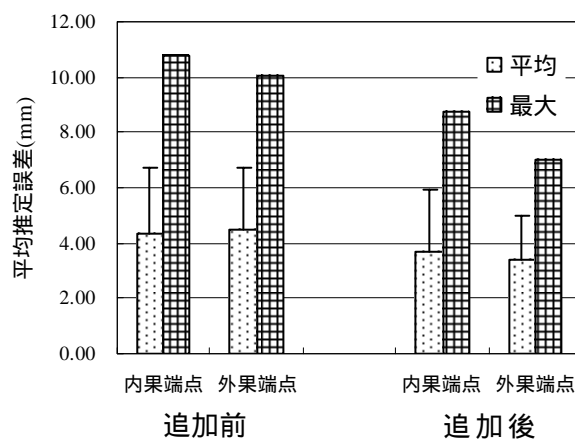


図12 幾何学特徴量追加前と追加後の推定誤差

これらの結果をふまえて、誤差の主要因である幾何学特徴量の質と量の改善のための実験を行う。今回はくるぶしにある2つの解剖学的特徴点に注目して、図11に示すように、くるぶし付近に15個の幾何学特徴量をこれまで使用していた33個に追加した。そして、48個の幾何学特徴量を重回帰分析の説明変数として使用することで推定誤差を求めた。その結果を図12に示す。くるぶし付近の幾何学特徴量を追加したことにより推定誤差が減少していることを確認した。

6. むすび

本稿ではFFD法を用いた解剖学的特徴点の位置推定における誤差要因の分析を行った。その結果、重回帰分析の説明変数として用いる、幾何学特徴量の質と量が不足していることが主要因であることを確認した。そして、この要因を取り除くことにより、誤差を改善させることができることを確認した。

今後の課題はより質の良い幾何学特徴量の抽出を行うことで推定誤差を実用的な水準まで落とす予定である。そのためには、より多くの幾何学特徴量を抽出し、どのようなモデルに対しても安定して抽出できる、手法を考える必要がある。また、解剖学的特徴点の位置をよく説明できる幾何学特徴量を発見することが必要となる。

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, "イーゲーオーダーステム研究報告書", 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.Curlless, 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] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Hiroki Yahara, Kazunori Mizuno, Yukio Fukui, Seiichi Nishihara, Masaaki Mochimaru and Makiko Kouchi, "Analysis of Error Factor in Estimation of Anatomical Landmarks from 3D Foot Model using Free-Form Deformation," Proc. NICOGRAPH International 2005, pp.89-94, Apr. 2005.
- [14] E.Tsutsumi, M.Kouchi, "Geometrical modeling of the foot", 5th ASEE International Conference ECGDG, pp.171-174, 1992.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Hsu, W. H., Hughes, J. F., Kaufman, H., "Direct Manipulation of Free-Form Deformations", Comput. Graphi. vol.26, no.2, pp.177-184, 1992.

[18] 持丸正明, 河内まき子, 福井幸男, "体形変換のための局所的形態操作手法", 第10回ヒューマンインターフェース・シンポジウム, 10, pp.173--176, 1994.

[19] 矢部博, 八巻直一, "非線形計画法", 朝倉書店, 1999.