

代表寸法を用いた個人別手指モデルの高速生成

○野原 健(中央大院) 多田 充徳(産総研) 梅田 和昇(中央大) 持丸 正明(産総研)

Fast Generation of Individual Finger Model Using Finger Dimesnion

* Ken Nohara(Chuo University)

Mitsunori Tada (Digital Human Research Ceneter, AIST)

Kazunori Umeda(Chuo University)

Masaaki Mochimaru(Digital Human Research Center, AIST)

Abstract—This paper suggests the method to create individual finger model by the finger dimensions that can be measured easily. We constructed the database of dimension. This database is based on volume registration results and result of principal component analysis(PCA). As a result, we can obtain the synthesized model using weighted sum of principal components. Between measured dimensions and finger dimensions of synthesized model using principal components is minimized. As a result, we obtained weighted value of each principal components for each individual. we can synthesize individual finger model.

Key Words: FEModel, VolumeRegistration, Optimization

1. はじめに

近年では個人毎の人体形状モデルを作成し、それらを用いることで工業製品の安全性や操作性の評価をコンピュータ上で行うことが試みられている。このようなシミュレーションにおいて必要となる人体形状モデルの構築方法としては、CTを用いて医用画像を取得し、それらの中から関心のある組織を抽出することで人体モデルを作成する手法が提案されている[1]。しかし、この手法では個人毎のモデルを作成するたびに医用画像を取得する必要がある。また、コントラストの低いMRIの画像に対して適用することが難しくなるという問題点がある。また、宮崎らは頭部の形状寸法データから、個人毎の頭部形状を推定し、それらを基に頭部有限要素モデルを生成する手法[2]を提案しているが、表面形状データのみから構築したデータベースを用いているため、内部構造まで正確に再現できることが保証されていない。このようなことから、本稿では、まず3次元の医用画像を取得し、それらを基に形状の個人差を定量化・分析することで、内部構造まで含んだ形状データベースを構築する。そして、それらの結果とノギス等で簡単に取得できる代表寸法データから、内部構造まで考慮した個人別人体モデルの作成手法を提案する。なお本稿で対象とする人体部位は手指とする。

2. 提案手法

2.1 提案手法の概要

手指の代表寸法から、内部構造まで考慮した手指モデルを迅速に生成するために以下の作業を行う。(1) MRIを用いてボリュームデータを取得、(2) 取得したデータの1つを基準指とし手作業により人体形状モデルを作成、(3) 基準指のMR画像とその他の被験者のMR画像間でボリュームレジストレーションを行い、形状の個人差を変位場として定量化、(4) それら変位場対

して主成分分析を実施、(5) 被験者の手指代表寸法を計測し、その被験者に対する各主成分の重み係数を最適化により算出、(7) 算出された重み係数を用いて変位場を計算、(8) (7)で求めた変位場を用いて基準モデルを変形することで、任意の被験者の手指モデルを生成することができる。

2.2 形状データベースの構築

はじめに、ポリウムデータを取得する。そして、取得したポリウムデータの中の1つを基準のモデルとして、手作業で関心部位に関して領域分割を行い、モデルを生成する。その後、この基準モデルとその他被験者との間の、形状の個人差を定量化・分析することで形状データベースを構築する。

2.2.1 個人差の定量化

形状の個人差を定量化するために、ポリウムレジストレーションを行う。ポリウムレジストレーションとは、ポリウム間の類似度が最大になるように、あるポリウムデータを同じ物体を撮像した別のポリウムデータに対応付けるための写像を求める手法である。本研究では、Szeliskiらが提案した2次元画像に対応するレジストレーション手法[3]を3次元に拡張した手法[4]を採用した。この手法では、ポリウム間の類似度指標としてSSDを用いる。また、ポリウム中に等間隔に並ぶ制御点でのみ変位が定義される。少ない変数で変位場を記述できるため計算コストの低減とレジストレーションの安定化とを同時に達成できる。ポリウムレジストレーションを行うことで、図1に示すソースデータをターゲットデータへと変形させるための変位場が求まる。この変位場こそが手指形状の個人差となる。

2.2.2 個人差の分析

手指形状の個人差を基準指からの変位場で表すために、変位場に対して主成分分析を施す。具体的にはレ

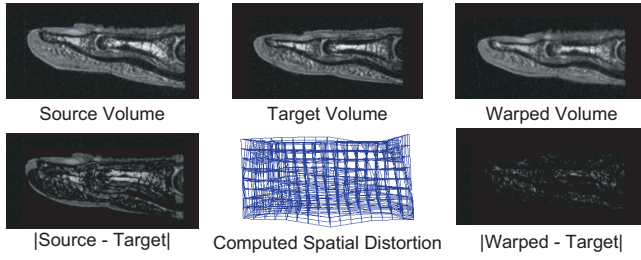


Fig.1 Volume Registration

ジストレーションによって計算された，基準モデルからある被験者 k へと変形させる変位場が式 (1) とする．

$$\mathbf{d}_k = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & \cdots & x_n & y_n & z_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

これより，被験者数を p とすると，基準モデルを平均的な形状の手指に変形させるための変位場 $\mathbf{m}$ は式 (2) で求めることができる．

$$\mathbf{m} = \sum_{k=1}^p \frac{\mathbf{d}_k}{p} \quad (2)$$

そして，式 (3) のように各行が各被験者の変位場と平均形状への変位場との差を表す行列 $\mathbf{F}$ を作成する．

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \mathbf{d}_1 - \mathbf{m} \\ \mathbf{d}_2 - \mathbf{m} \\ \vdots \\ \mathbf{d}_p - \mathbf{m} \end{pmatrix} \quad (3)$$

最後に行列 $\mathbf{F}$ の共分散行列を求め，これに対して特異値分解を施すことで，形状の特徴量を表す各主成分を求める．

2.3 モデルの生成

前節の計算において算出された固有ベクトルと，式 (2) で表される平均形状への変位場を用いることで，基準モデルを，統計的に存在し得る手指形状のモデルに変形させるための変位場 $\mathbf{s}$ が式 (4) のように表すことができる．

$$\mathbf{s} = \mathbf{m} + \sum_{i=1}^n \alpha_i \mathbf{c}_i \quad (4)$$

ここで， i 番目の固有ベクトルを $\mathbf{c}_i$ ，各主成分の重み係数を α_i とした．式 (4) の重み係数 α_i を変化させることにより，統計的にあり得る手指形状のモデルが生成することが可能となる．

式 (4) の重み係数 α_i を各個人に対応した値を求めることで，個人別の手指モデルを生成することができる．具体的には，式 (4) によって算出される変位場を用いてモデルを生成し，そのモデルから得られる代表寸法 l_i と，前節で直接計測した代表寸法 L_i の誤差が最小化されるように，合成されるモデルの各主成分の重み係数を最適化することで，個人毎のモデルを生成するために必要な変位場を得ることができる．即ち，式 (5) を最小化する問題と帰着される．

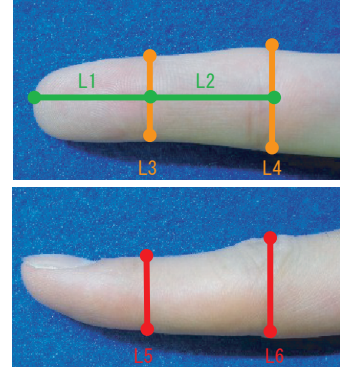


Fig.2 Measurement region of finger dimension

$$e(\alpha) = \sum_{i=1}^6 (L_i - l_i(\alpha))^2 \quad (5)$$

3. 実験

3.1 形状データベースの構築

3.1.1 個人差の定量化

ポリウムデータの撮像には磁場強度 4.7 T の実験用 MRI (Unity INOVA, Varian) を使用した．撮像を短時間で行うために 3 次元グラディエントエコーシーケンスを選択し，TR を 20 msec, TE を 10 msec, FOV を $120 \times 30 \times 30$ mm，解像度を $512 \times 128 \times 128$ に設定して 20 代前半から 30 代後半までの日本人男性 50 名の右手人差し指を撮像した．1 回の撮像には約 5 分を要した．ここで得られた 3 次元の医用画像の中の 1 つを基準モデルする．そして，基準モデルとその他の被験者 (49 人) との間の形状の個人差を，変位場として定量化するために，ポリウムレジストレーションを施す．この際，制御点の間隔はどの方向にも 16 pixel と設定した．ポリウムのサイズが $256 \times 128 \times 128$ であるため，全 1377 点で変位が計算される．

3.1.2 個人差の分析

取得したポリウムデータに対して，ポリウムレジストレーションを施すことで，形状の個人差を定量化した後，得られた変位場に対して主成分分析を施した．この際， n 番目の被験者を除いた 48 人分のデータに対して主成分分析を行った．即ち， n 番目の被験者を対象としてモデルを生成する際には， n 番目の被験者の形状データを含めない主成分分析の結果を用いた．

また，各主成分が手指のどのような形状に対応しているかなどの，主成分分析を施した結果に関する詳細は文献 [5] を参照されたい．

3.2 個人別モデルの生成

25 人の被験者に対して，図 2 に示す L_1 から L_6 の 6 項目 (長径 2，幅径 2，厚径 2) に関して，ノギスで測定することで各被験者の代表寸法データを取得した．

取得した 6 項目の代表寸法データをもとに式 (5) を滑降シンプレックス法 (downhill simplex method) を用いて最小化を行い，最適化された上位 6 個の主成分に対する重み係数を取得した．ここで用いる，主成分

Table 1 Average error , standard deviation and between registered model and generated model by proposed method

	Average Error	Standard Deviation
Skin	0.65mm	0.64mm
Distal Phalanx	0.73mm	0.82mm
Middle Phalanx	0.51mm	0.58mm

の線形和で合成されるモデルには、対象としている各被験者の形状情報を抜いた主成分分析の結果を用いている．具体的には、被験者 1 のモデルを最適化によって生成する際には、被験者 1 の形状データを抜いた 48 人分のデータに対して主成分分析をし直し、その結果を用いた．

4. 結果

4.1 個人別モデルの生成と評価

ある被験者の形状寸法データから、提案手法によって重み係数を取得する．そして、得られた重み係数により、対象被験者の形状へと変形するための変位場を計算する．その変位場を用いて生成されたモデルを図 3(a) に示す．また、図 3(b) には、ポリウムレジストレーションによって得られた変位場から生成されたモデルを示す．提案手法によって生成されたモデルの再現精度を、図 3(a) と (b) のモデルの距離値を計算することで行った．その結果の 1 例をカラーマップで表したものを図 4 に示す．また、25 人の被験者に対して同様に再現精度を検証した結果から得られた、誤差の平均値・標準偏差を表 1 に示す．なお、本稿では図 3(b) に示されているモデルを真値として、再現性評価を行った．ここで、真値として用いているモデルの再現性は十分であることは既に証明済みである [4] ．

各部位の平均誤差は、0.51mm から 0.73mm の値をとっている．これにより、各被験者の指形状は概ね再現可能であることが分かる．誤差の要因としては、上位 6 個の主成分の説明率が 69%となっていたために、再現したモデルに、上位 6 個の主成分では説明できない形状が含まれていたためであると考えられる．また、25 人の個人別モデルにおける各部位の最大誤差は、表皮で 4.9mm、中節骨で 2.9mm、末節骨で 5.8mm となった．これは、計測した代表寸法データに手指の反りに関する情報が含まれていなかったために、反りの情報が重要となる指先先端 (表皮) と末節骨の最大誤差が特に大きくなってしまったと考えられる．

また、基準となる有限要素モデルを作成 [6] し、そのモデルを本手法によって得られたある被験者の変位場によって変形させることで、個人別有限要素モデルを作成することが可能である．ここで、有限要素モデルを手作業で作成するには約 40 時間を要するのに対し、提案手法を用いることで代表長さを取得後、約 3 分で作成することが可能である．

5. おわりに

手指の代表寸法データから、内部構造まで考慮した個人別手指モデルを高速に生成する手法を提案した．手

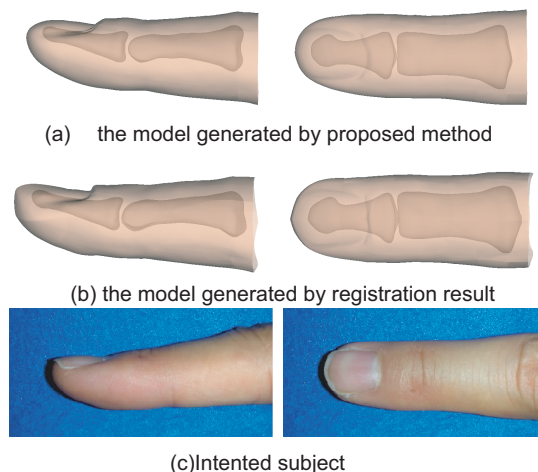


Fig.3 Generated model by proposed method

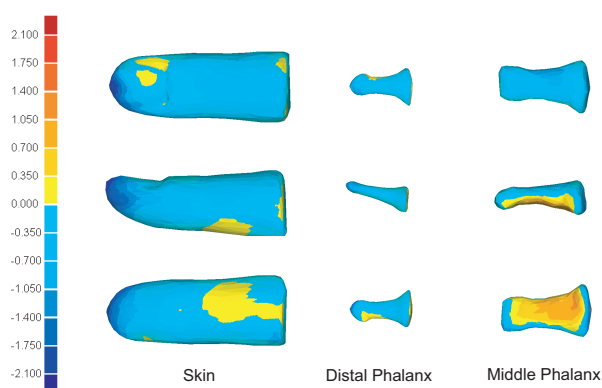


Fig.4 Error between registered model and generated model by proposed method

指形状の個人差をポリウムレジストレーションにより定量化し、それらに対して主成分分析を施すことで、形状の特徴量を各主成分として得た．これにより、統計的にあり得る手指状モデルを主成分の線形和で合成された変位場を用いた変形により表すことが可能となった．そして、被験者の代表寸法データと、主成分の線形和で表されたモデルの代表寸法の差が最小になるように、各主成分の重み係数を最適化することで、各個人に対応する重み係数を取得することができた．この結果を用いることで個人別モデルが高速に生成することが可能であることを示した．今後は、より精緻なモデルを生成可能にするために、代表寸法部位の改善を行っていく．

- [1] 伊能 教夫, 鈴木 知, 横 宏太郎, 宇治橋 貞幸, X 線 CT データに基づく骨体の自動モデリング手法 (テラウニー分割を利用した有限要素モデルの生成), 日本機械学会論文集 C 編, 68 巻 699 号 (2002)1481-1486
- [2] 宮崎裕介, 宇治橋貞幸, 持丸正明, 河内まき子 :“ 代表形状合成法による個別別頭部有限要素モデルの創成, 日本機械学会 A 編, vol.71, No.704, pp.692-699(2005)
- [3] R.Szeliki and J.Coughlan.”Spline-Based Image Registration”, International Journal of Computer Vision, vol.22,no.3,pp199-218,197.

- [4] M.Tada.et.all, Generating Subject-Specific FE Models of Fingertip with the Use of MR Volume Registration, in Proceedings of Eurohaptics2006,pp.99-104,2006.
- [5] 野原健, 多田充徳, 梅田和昇, 持丸正明: “主成分分析を用いたあり得る指先構造の合成” ロボットメカトロニクス講演会 2007 講演論文集, 1A2-H06.
- [6] 野原健, 多田充徳, 梅田和昇, 持丸正明: “形状の個人差を利用したあり得る手指有限要素モデルの高速生成” 第20回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, pp.205~pp.206(2008)