

# 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

## Fast Generation of Possible Finger FE Model Using Individual Difference of Geometry

○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)

Ken Nohara<sup>1</sup> Mitsunori Tada<sup>2</sup> Kazunori Umeda<sup>3</sup> Masaaki Mochimaru<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Course of Precision Engineering, School of Science and Engineering, Chuo University

<sup>2</sup> Digital Human Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

<sup>3</sup> Faculty of Science and Engineering, Chuo University

*Key Words* : FE Model, Principal Component Analysis, Volume Registration, Individual Difference

### 1 序論

工業製品の操作性や安全性などの評価では、どのような人体構造をした人が最も操作しにくいのか、を明確にする必要がある。即ち、形状の個人差を統計的に把握し、それらの結果を反映させた網羅的な解析が必要となる。そのためには様々な形状の有限要素モデルを作成する必要があるが、全てを手作業で作成することは効率的でない。そこでCT画像から組織の抽出を行い4面体要素の有限要素モデルを構築する手法が提案されている<sup>1)</sup>。しかし、この手法では4面体要素で骨部にしかモデルを構築できず、コントラストの低いMR画像には適用できない。また解析速度・精度を考慮すると6面体要素が望ましい。一方、形状の差異を統計的に分析するために有用な手法<sup>2)</sup>が提案されているが、この手法を用いて形状の解析を行うには、多くの相同なモデルを作成する必要がある。この手法では予め特徴点を取得し、それらを作成する有限要素モデルと対応付けしなければならないので、多くの時間を要する。そこで本稿では、手指形状の個人差を基準指からの変位場として計算し、その結果に主成分分析を施す。得られた主成分の重み付き線形和によって基準モデルを変形させることで、統計的にあり得る形状の有限要素モデルを迅速に生成する手法を提案する。

### 2 提案手法

**2.1 手法概要** 内部構造までも考慮した様々なバリエーションの手指有限要素モデルを迅速に生成するために以下の6つの作業を行う。(1) MRIを用いてポリウムデータを取得、(2) 取得したデータの一つを基準指とし手作業により有限要素モデルを作成、(3) 基準指のMR画像とその他の被験者のMR画像間でポリウムレジストレーションを行い、個人差を変位場として定量化、(4) 変位場に対して主成分分析を実施、(5) あり得る形状の有限要素モデルへと変形させるための変位場を主成分の線形和として計算、(6) 算出した変位場を用いて、基準の有限要素モデルを変形させることによりあり得る形状の有限要素モデルを生成。

#### 2.2 個人差の定量化

**ポリウムデータ撮像** 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120×30×30 mm, 解像度を512×128×128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。

**ポリウムレジストレーション** ポリウムレジストレーション

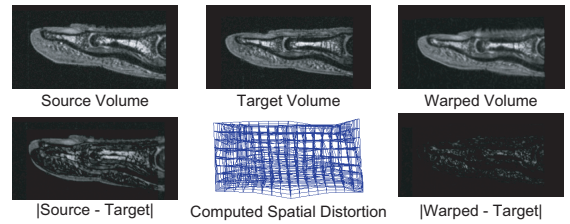


Fig. 1: Volume Registration

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<sup>3)</sup>を3次元に拡張した手法<sup>4)</sup>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。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256×128×128であるため、全1377点で変位が計算される。この変位場こそが手指形状の個人差となる。

**2.3 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<sup>5)</sup>。具体的にはレジストレーションによって計算された基準被験者からある被験者 $k$ へと変形させる変位場が式(1)とする。

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

次に被験者数を $p$ とし、式(2)のように各行が各被験者の変位場を表す行列 $F$ を作成する。

$$F = \begin{pmatrix} \mathbf{d}_1 \\ \mathbf{d}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{d}_p \end{pmatrix} \quad (2)$$

最後に行列 $F$ の共分散行列を求め、これに対して特異値分解をすることで各主成分を求める。

**2.4 主成分の線形和** レジストレーションによって計算した各被験者の変位場を $\mathbf{d}_k$ とすると、基準指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(3)のように表

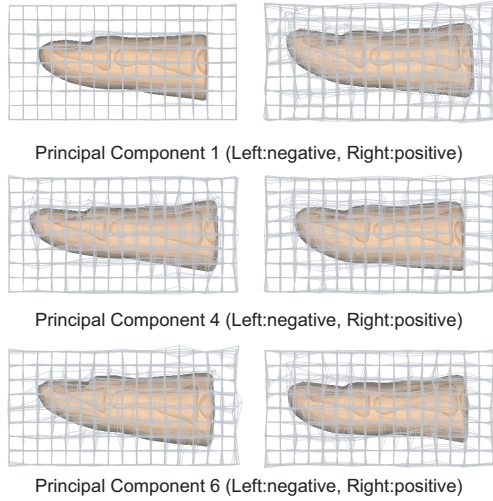


Fig. 2: Visualization of Each Principal Component

すことができる．

$$\mathbf{m} = \sum_{k=1}^p \frac{d_k}{p} \quad (3)$$

また  $i$  番目の固有ベクトルを  $\mathbf{c}_i$  とする．これより基準モデルをあり得る手指形状のモデルに変形させるための，変位場  $\mathbf{s}$  は式 (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， $\alpha_i$  は各主成分の重み係数を表す．

### 3 結果

**3.1 形状の個人差** 2.3 節で算出した各主成分が手指形状のどのような形状に対応しているかを明らかにするために，主成分分析を実施し得られた変位場とそれらを用いて変形させた基準モデルを可視化する．第  $i$  主成分を可視化するためには式 (4) の  $i$  番目の重み係数を正負に変化させ，その他の値は全て零とする．多くの主成分は単にどのような形状に対応しているとは言い難かった．ここでは明確に形状の特徴を表している第 1・第 4・第 6 主成分とそれらに従い変形させた基準モデルを可視化したものを図 2 に示す．第 1 主成分は指の大きさと反りに，第 4 主成分は指長さや厚さに，第 6 主成分は指先の腹の形状を表していることが分かった．次節では，このように形状の特徴を表している各主成分の線形和を用いて，あり得る形状の有限要素モデルを生成する．

**3.2 基準有限要素モデルの作成** ボリュームレジストレーションを行った際に基準とした被験者の手指有限要素モデルを手作業で作成した．3 次元の医用画像に対して軟組織・末節骨・中節骨の 3 部位に領域分割を行い，Geomagic Studio9 を用いて骨と指表面に NURBS 曲面データを生成した．これらのデータを HyperMesh にインポートし要素数が 98484 の 6 面体要素 (1 部 4 面体要素) で構成された有限要素モデルを作成した．作成した基準手指有限要素モデルを図 3 に示す．

**3.3 統計的にあり得る形状の有限要素モデル生成** 2.4 節で説明した変位場を用いて，基準の有限要素モデルを変形させ，統計的に存在し得る形状の手指有限要素モデルを

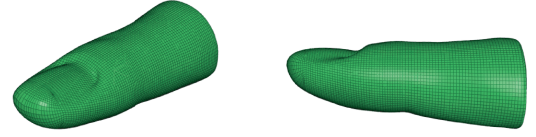


Fig. 3: Reference FE Model

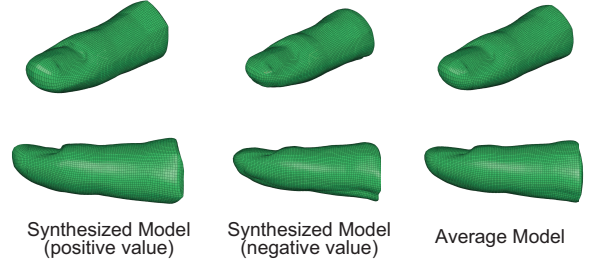


Fig. 4: Possible Variations of Finger FE Model

生成する．個々のモデルを基準モデルの変形として生成するため，それぞれのモデルにおいて解剖学的な対応がとれている．実際に上位 3 主成分の線形和を用いて基準の有限要素モデル変形させた．第 1 主成分から第 3 主成分にかかる重み係数の値を全て正として生成したモデル，全て負として生成したモデル，そして全ての重み係数を零として生成した平均的な手指有限要素モデルを図 4 に示す．また，基準モデルを作成するのに約 30 時間を要したのに対し，提案手法を用いてモデルを生成するのに要した時間は 5 分以下であった．このように主成分の線形和として表された変位場を用いて基準モデルを変形させることにより，各モデルの解剖学的な対応がとれている様々なバリエーションの手指要素モデルを，迅速かつ簡便に生成することが可能である．

### 4 結論

人体形状の個人差を用いて有限要素モデルを迅速に生成する手法を提案した．人体形状の個人差をボリュームレジストレーションを用いることにより定量化し，それらに対して主成分分析を施し個人差を統計的に分析した．これにより手指形状の個人差がどのような形状に対応しているかを明らかにした．そして，主成分の線形和で表された変位場を用いて基準の有限要素モデルを変形させることにより，統計的にあり得る様々な形状の有限要素モデルを迅速かつ簡便に生成できることを示した．今後は，提案手法をその他の人体部位に適用することや，人体形状の違いに起因する機能の相違の解明など様々な分野に応用していく．

### 参考文献

- 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), 機論 C, 68 巻 699 号 (2002)1481-1486
- 2) M.Mochimaru, M.Kouchi, "Statistics for 3D Human Body Forms", Proceeding SAE Digital Human Modeling for Design and Engineering, 2000, 2000-01-2149.
- 3) R.Szeliski and J.Coughlan, "Spline-Based Image Registration", International Journal of Computer Vision, vol.22, no.3, pp199-218, 1997.
- 4) M.Tada et.al, 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.