

3次元MR画像を用いた手指形状データベースの構築

野原 健*, 梅田 和昇 (中央大), 多田 充徳, 持丸 正明 (産総研)

Constructing of Database in Finger Geometry Using Three-Dimensional MRImages
Ken Nohara*, Kazunori Umeda (Chuo University), Mitsunori Tada, Masaaki Mochimaru (AIST)

Abstract

This paper suggests the method to generate possible variations of finger model and individual model. Specifically, volume registration technique was employed to quantify individual differences as a displacement grid from three-dimensional MR Images. These result were analyzed with principal component analysis(PCA), so that we constructed the database which revealed principal axes of individual differences in dimension. Thus, we can compute displacement grid that transforms the reference model into various geometric models. On the other hand, weighted value of each principal components for each individual can be obtained by minimizing between measured dimensions of target subject and dimension of synthesized model using principal components, so we can also generate individual models.

キーワード：3次元MRI画像，個人差，ボリュームレジストレーション，主成分分析，最適化，
(Three-dimensional MRImage, Individual differences, VolumeRegistration, Principal component analysis, Optimization)

1. はじめに

近年では，工業製品の操作性や安全性の評価に人体モデルを用いた数値シミュレーションが多く試みられている．このようなシミュレーションでは以下の2種類のモデルが必要とされている．1つは，統計的に存在し得る様々な形状のモデルである．これは，どのような構造をした人が最も操作性・安全性が悪いのかを明らかにし，そのような人でも最低限の基準を満たすような設計にする必要があるからである．即ち，様々な形状のモデルを用いた網羅的な解析が必要となるからである．もう1つは，個人別のモデルである．これは，衣類・靴などの個人適合への要求が高い製品に対する適合性評価や，より詳細な安全性評価などのシミュレーションに必要とされるからである．現在，このようなシミュレーションに用いられている人体モデルの多くは，医用画像を取得し，関心部位に対して手作業で領域分割を施すことで作成されている⁽¹⁾．このような手法では，様々な人体モデルを作成する際に時間的・人的コストが大きくなってしまいうために実用的ではない．そこで，医用画像から関心部位の抽出を自動化した手法⁽²⁾が提案されているが，そもそも対象とする被験者毎にCTやMRIを用いて医用画像を取得しなければならないことや，特定個人のモデルしか作成することができないという問題点がある．即ち，網羅的な解析を行なうことが困難であると言える．一方で，多様な形状のモデルを生成するための手法⁽³⁾⁽⁴⁾が提案されている．これらの手法は，形状データを収集し，それらに対して統計分析を施している．その結果，形状の主軸が明らかになり，様々な形状のモデルが主軸の線形和で合成できる形状データベースを構築した．宮崎らは，このような手法を用いて様々な形状のモデルと個人別モデルの合成手法⁽⁵⁾を提案している．しかし，この手法はモデルを作成し，それらモデルの形状に対して統計分析を施して

いる．即ち，予め解剖学的特徴点を調査し，それらをモデル間で対応付けしなければならないことや，モデルの要素数が変化した場合，統計分析をし直さなければならないといった問題が挙げられる．

このような問題に対して，物体の形状差を空間の変位として表現し，それらに対して統計分析を施す手法⁽⁶⁾が提案されている．形状の差異を変位場として表現すると，基準となるモデルを変位場で変形することにより，その他のモデルを生成することが可能となる．即ち，基準のモデルの節点数を変化させるだけで，その他のモデルも対応させることが可能である．また，この手法は，特徴点抽出を必要としていない．このように空間の変位場を用いて形状差を考慮し，統計分析を行なう手法はモデルの生成において合理的である．しかし，既存の手法では扱うデータが表面形状のみであるため，内部構造は考慮されていない．

そこで本稿では，内部構造も考慮した効率的な3次元データベースの構築法を提案する．具体的には，3次元MRI画像に対してボリュームレジストレーションを施す．これにより，予め特徴点抽出をすることなく，人体形状の個人差を変位場として定量化する．それらの結果に対して主成分分析を施すことによって内部構造まで考慮した人体形状データベースの構築方法を提案する．また，このデータベースを用いて統計的にあり得るモデルを高速かつ簡便に生成するための手法と，医用画像を必要としない，代表寸法を用いた個人別モデルの生成手法も合わせて提案する．なお，本稿で対象とする人体部位は右手人指し指とする．

2. 提案手法

2.1 手法概要 内部構造も考慮した手指形状データベースを構築するために，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

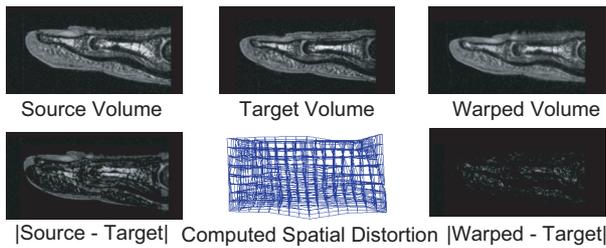


図 1 Volume Registration

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) それら変位場に対して主成分分析を実施することで、形状の特徴を表す量を各主成分として得ることができ、形状の特徴を統計的に把握したデータベースを構築することができる。このように構築された形状データベースを用いることで、統計的にあり得る形状のモデルを主成分の線形和を計算することで生成することができる。また、ある被験者の代表寸法を取得し、同様にデータベースから合成されるモデルからも取得する。それらの寸法誤差が最小化するように、モデルを最適化する。これにより、個人別モデルも医用画像を取得することなく、簡便かつ高速に生成することが可能となる。様々なモデルを容易に生成することを可能とする形状データベースの構築法を、次節以降で詳しく述べる。

2.2 手指形状データベースの構築

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、ボリュームレジストレーションを行う。ボリュームレジストレーションとは、ボリューム間の類似度が最大になるように、あるボリュームデータを同じ物体を撮像した別のボリュー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⁽⁷⁾を 3 次元に拡張した手法⁽⁸⁾を採用した。この手法では、ボリューム間の類似度指標として SSD を用いる。また、ボリュー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。ボリュー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、基準モデルからある被験者 k へと変形させる変位場が n 個の制御点で計算されるとする。1 つ目の制御点において計算される変位を (x_1, y_1, z_1) とすると、 n 個の制御点で計算される変位場は、式 (1) のように表すことができる。

$$d_k = (x_1 \ y_1 \ z_1 \ \cdots \ x_n \ y_n \ z_n) \cdots \cdots (1)$$

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 m は式 (2) で求めることができる。

$$m = \sum_{k=1}^p \frac{d_k}{p} \cdots \cdots (2)$$

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 F を作成する。

$$F = \begin{pmatrix} d_1 - m \\ d_2 - m \\ \vdots \\ d_p - m \end{pmatrix} \cdots \cdots (3)$$

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施すことで、形状の特徴量を表す各主成分を求める。ここで求められた各主成分を用いることで、人体モデルを簡便かつ高速に生成することができる。以下で詳細を述べる。

2.3 モデルの生成

2.3.1 統計的にあり得るモデルの生成 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 m 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 s が式 (4) のように表すことができる。

$$s = m + \sum_{i=1}^n \alpha_i c_i \cdots \cdots (4)$$

ここで、 i 番目の固有ベクトルを 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。

2.3.2 個人別モデルの生成 また、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も可能となる。以下に示す 3 つ作業から個人別モデルは生成される。(a) 式 (4) によって算出される変位場を用いてモデルを生成、(b) (a) で作成されたモデルから代表寸法 l_i と、対象とする被験者の手指を直接計測した代表寸法 L_i を取得、(c) (b) で取得した寸法誤差が最小化されるように、(a) で合成されたモデルの各主成分の重み係数を最適化する。この結果、各個人に対応した変位場を計算することができる。即ち、各被験者に対応した重み係数を求めることは、式 (5) を最小化する問題へと帰着される。

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

3. 実験

3.1 手指形状データベースの構築

3・1・1 手指の撮像 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, 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。また, 取得した全てのデータに対して, 以下の前処理を施した。(1) 中節骨の端部から基節骨側 2.54mm 以降をトリミング, (2) 指領域が画像の中央に位置するように並進・回転させた後に, $256 \times 128 \times 128$ にリサイズ, (3) 最後に, $3 \times 3 \times 3$ のガウシアンフィルタによって平滑化を行った。

3・1・2 個人差の定量化 得られた 3 次元の医用画像の中の 1 つを基準モデルとする。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・3 個人差の分析 手指形状の特徴がどのような形状に対応しているのかを明らかにするために, 前節で取得した 49 人分の変位場と, 基準モデルへと変形するための変位場の計 50 人分のデータに対して主成分分析を施した。そして, 変位場として得られた各主成分を用いて基準モデルを変形することで, 各主成分がどのような形状に対応しているのかを明らかにする⁽⁹⁾。第 i 主成分を可視化するには, 式 (4) の i 番目の重み係数を正負に変化させ, その他の値は零にすることで行う。

3・2 モデルの生成

3・2・1 あり得るモデルの生成 式 (4) を計算することで, 統計的にあり得る形状へと基準モデルを変形させるための変位場を計算する。本稿では, 第 1 主成分・第 4 主成分・第 6 主成分の 3 つの主成分に関する重み係数を正負に変化させることで, あり得る形状のモデルを生成する。3 つの重み係数を全て +15 としたモデルと, 全て -15 としたモデルを生成した。また, 全ての主成分の重み係数を零とすることで平均的な形状のモデルも生成する。

3・2・2 個人別モデルの生成 2・3・2 節で説明した手法により個人別モデルを生成するため 49 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, i 番目の被験者のモデルを最適化によって生成する際には, その形状データを抜いた 49 人分のデータに対して主成分分析を施

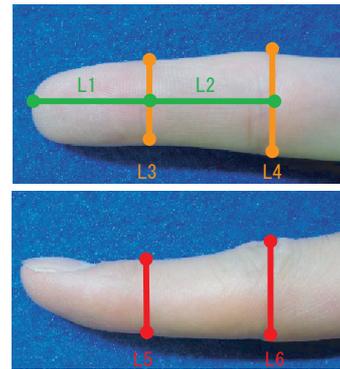


図 2 Measurement region of finger dimension

した結果求められた, 各主成分の値を用いている。これは, 提案手法によって生成されたモデルの再現性を後に, 検証するためである。

4. 結果

4・1 個人差の分析 算出した各主成分が手指のどのような形状に対応しているのかを明らかにする。主成分分析により得られた変位場と, それらを用いて基準モデルを変形したモデルを 3・1・3 で解説した手法を用いて可視化した。その結果, 第 1 主成分は指の大きさ・反りに, 第 2 主成分は中節骨の長さ, 第 3 主成分は骨部の長さ太さに, 第 4 主成分は指の厚さと長さの比に, 第 5 主成分は指の幅に, 第 6 主成分は, 指腹部の形状に, それぞれ対応していることが分かった。ここでは, 明確に形状の特徴を表している第 1 主成分, 第 4 主成分, 第 6 主成分を図 4 に示す。また, 上位 11 主成分までの累積寄与率をプロットしたグラフを図 4 に示す。このグラフから, 上位 11 個の主成分で説明率が 8 割を超えていることが分かる。

4・2 あり得るモデルの生成 前節で明らかになった形状の特徴を表す各主成分の線形和を式 (4) によって計算することで, 統計的にあり得る形状のモデルを合成することが可能となる。実際に, 第 1 主成分, 第 4 主成分, 第 6 主成分 3 つを用いて生成したモデルを図 5 に示す。図 5(a) に示すモデルは, 使用した 3 つの主成分の重み係数を全て正の数に設定して生成したモデルで, 指先の腹が厚みがあり大きく上に反った指, (b) は重み係数を全て負として生成したモデルで, 指先の腹が細く小さい指, そして (c) は重み係数を全て零に設定することで得られる平均的な形状のモデルである。このように, 主成分の線形和を計算することで, 様々な形状のモデルを簡便に生成することができる。ここで, 手作業でこのような内部構造まで考慮したポリゴンモデルを作成するには約 20 時間かかるのに対して, 本手法を適用すると約 3 分でモデルを生成することが可能となる。

4・3 個人別モデルの生成 ある被験者の形状寸法データから, 2・3・2 で説明した手法により, 対象とする

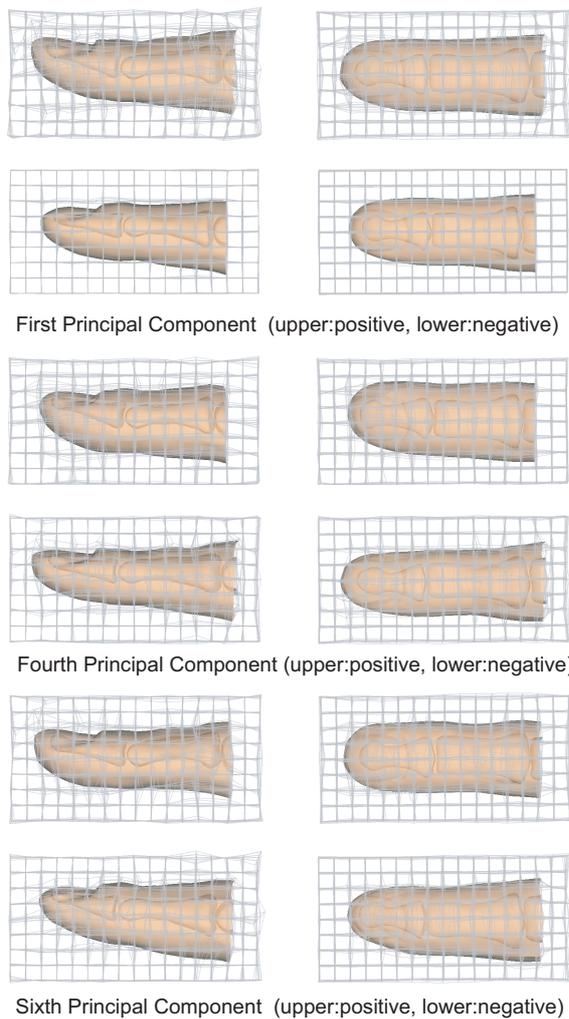


図 3 Visualization of each principal components

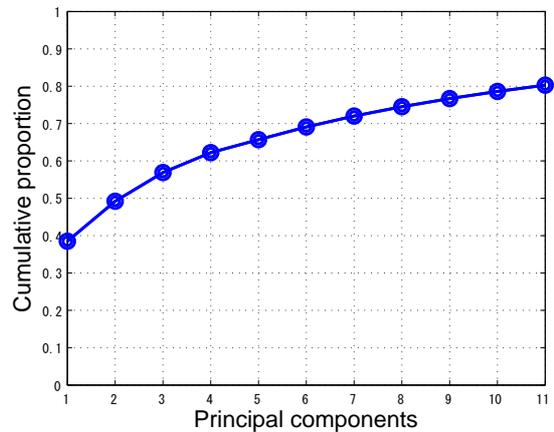


図 4 PCA result: cumulative proportion

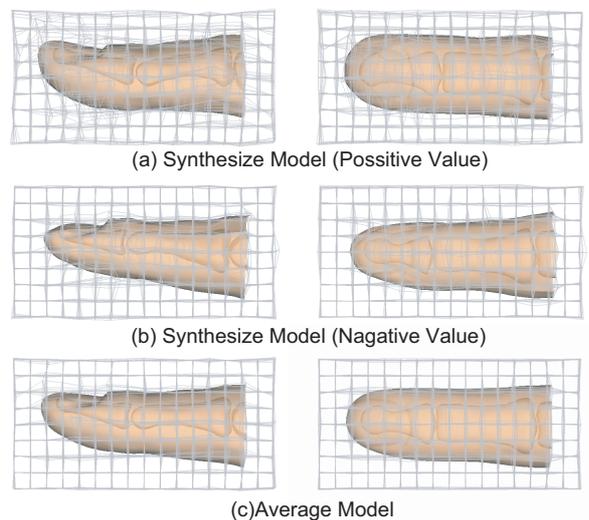


図 5 Possible variations of finger structure

被験者に対応した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 6(a) に示す．また，図 6(b) には，ボリュー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 6(a) と (b) のモデルの距離値を計算することで行った．図 6 の (a) と (b) を重ね合わせて表示したものを図 7 に示す．同様の手法を用いて，基準被験者を抜いた 49 人の被験者に対して再現精度を検証した．この結果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 6(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されている⁽⁸⁾．

各部位の平均誤差は，0.56mm から 0.74mm の値をとっている．これにより，医用画像を取得することなく，代表寸法情報のみによって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，生成したモデルの中には各部位の最大誤差が，表皮で 2.9mm，中節骨で 2.4mm，末節骨で 1.9mm と大きくなったモデルがある．このようなモデルを図 8 に示す．図 8 から明らかなように，使用した代表寸法（長径・厚径・幅径）はほぼ合致している一方で，代表寸法情報の無い指の反りや指腹部に関する形状の再現性が低いことが分かる．このことから，このような形状に対応する代表寸法を取り入れることで，再現精度の向上が期待できる．

5. おわりに

手指の 3 次元 MR 画像を基に，内部構造まで考慮した手指形状データベースを構築するための手法を提案した．ボリュームレジストレーションを用いることで，形状の個人

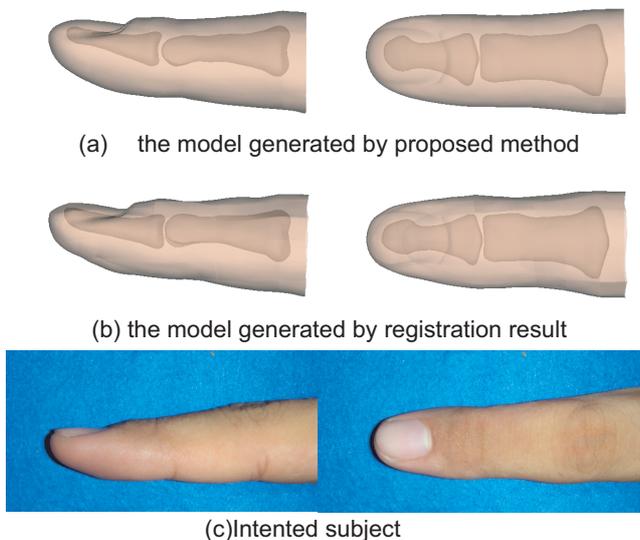


図 6 Generated model by proposed method

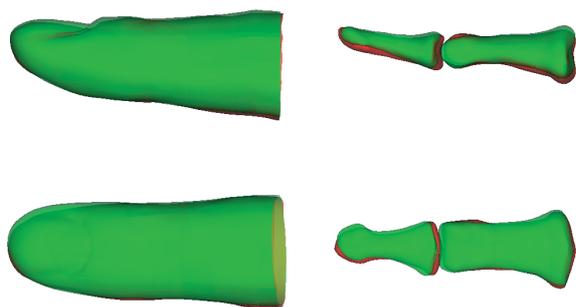


図 7 Error between registered model and generated model by proposed method

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

	Average Error	Standard Deviation
Skin	0.69mm	0.80mm
Distal Phalanx	0.74mm	0.85mm
Middle Phalanx	0.56mm	0.66mm

差を定量化し、それらの結果に対して主成分分析を施すことで形状の個人差を統計的に分析した。また、構築された形状データベースを用いることで、統計的にあり得る形状のモデルを主成分の重み付き線形和で合成することが可能となった。従来、個人別モデルの作成には医用画像を取得する必要があったが、データベースを用いることで代表寸法データのみから、簡便かつ高速に生成することが可能になることを示した。また、基準となる有限要素モデルを作

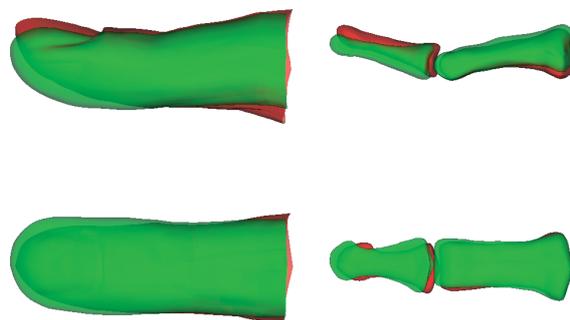


図 8 Lowly-reproducibility model

成⁽¹⁰⁾し、そのモデルを本手法によって構築されたデータベースから変位場を計算することで、ある被験者の有限要素モデルを作成することや、あり得る様々な形状の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 30 時間を要するのに対し、提案手法を用いることで、有限要素モデルを約 3 分で作成することが可能である。

参考文献

- (1) Svein Lleiven, Hans von Holst: "Consequences of head size following trauma to the human head", Journal of Biomechanics 35(2002)pp.153-160
- (2) 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, 1481-1486(2002)
- (3) M.Mohimaru, M.Kouchi: "Statistics for 3D Human Body Forms", In Proceedings of SAE Digital Human Modeling for Design and Engineering 2000, 2000-01-2149
- (4) 宮崎祐介, 宇治橋貞幸, 持丸正明, 河内まき子: "代表形状合成法による固体別頭部有限要素モデルの創成", 日本機械学会 A 編, vol.71, No.712, pp.1646-1652(2005)
- (5) 宮崎祐介, 宇治橋貞幸, 持丸正明, 河内まき子: "日本人の形態に基づいた頭部有限要素モデルの構築と衝撃シミュレーション", 日本機械学会 A 編, vol.71, No.704, pp.106-113(2005)
- (6) 真川純, 高松淳, 池内克文: "局所的位置合わせと Free-Form Deformation を用いた三次元形状解析", 情報処理学会研究報告会, vol.2007, No.31, pp.261-268(2007)
- (7) R.Szeliki and J.Coughlan: "Spline-Based Image Registration", International Journal of Computer Vision, vol.22, No.3, pp.199-218(1997)
- (8) M.Tada.et.all, "Generating Subject-Specific FE Models of Fingertip with the Use of MR Volume Registration", in Proceedings of Eurohaptics 2006, pp.99-104(2006)
- (9) K.Nohara, M.Tada, K.Umeda and Mochimaru: "Syn-

thesizing possible variation of finger structure using principal component analysis for non-rigid volume registration results "In Proceedings of the 3rd International Symposium on Measurement, Analysis and Modeling of Human Functions,pp.247-253(2007)

- (10) 野原健, 多田充徳, 梅田和昇, 持丸正明: " 形状の個人差を用いたあり得る手指形状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.205-206(2008)