

GFFD空間変形手法を用いたカメラ画像からの爪形状モデリング

近藤聡[†] 托雅^{††} 赤木康宏^{††} 北嶋克寛^{††}

複数方向から撮影したカメラ画像を用いて爪形状モデルの生成を簡便におこなう手法を提案した。本手法は、(1)画像からの特徴点の3次元座標決定(2)GFFD(北嶋研究室が開発した空間変形手法)による標準形状の変形という過程からなる。また、実物の指から作成した石膏模型を用いて、本手法による生成形状とレンジファインダによる計測結果を比較することにより、本手法における変型誤差についての評価・検証をおこなった。

3D Virtual Nail Modeling from Camera Images Based on the GFFD Deformation Method

Satoshi Kondo[†] Toya^{††} Yasuhiro Akagi^{††} and
Katsuhiko Kitajima^{††}

This paper proposes a novel method of generating a 3D virtual nail model from multiple camera image data based on the GFFD deformation method. The outline of whole procedures is as follows: 1) Take a pair of pictures of an individual's nail. 2) Extract feature points of a nail in each image. 3) Obtain the corresponding 3D positions of feature points using a stereo computing method from the pair of pictures taken in (1). 4) Transform the 3D generic virtual model into an individual's one with GFFD based on the obtained 3D positions of feature points. We experimented on the error by comparing to generated model and scanned data.

1. はじめに

近年、仮想現実におけるアバタ、美容整形のシミュレーション等のように、バーチャルヒューマンを利用して様々な現象をシミュレーションする場面が増えてきている。そのひとつとして、個人の体にフィットした製品を製作するためにバーチャルヒューマンを利用する取り組みがある。眼鏡のフィッティングや衣服の試着シミュレーションなどがその例である。眼鏡や服などのように人々が日々の生活を快適に送る上で重要な製品である物については、大量生産された既製服を店頭で購入する方式だけでなく、その人の体形に合った製品を注文して購入するカスタム(オーダー)メイド方式も、以前から一般消費者の間でも受け入れられてきており、バーチャルヒューマンを用いてのフィッティングの対象としても最初に挙げられるものである。その一方で、ネイルアートのようにおしゃれが目的であるものに関しては、一般的にフィッティングの重要性があまり認識されていないという現実がある。しかし近年、美容に対する関心は大きくなりつつあり、ネイルアートに関しては既に女性のファッションとして流行している。ところが、マーケットで販売されている商品は、S,M,Lサイズといった大雑把なサイズ分けがされているだけのものであり、実際に個人の爪に合わせて使用するには、削る等のカスタマイズが必要となり、手間がかかる。また、曲面のカーブが自分の爪に合っていないと爪と付け爪の間に隙間ができ、上手くくっつかず外れやすいという問題もおこる。これらのことより、個人の爪形状に適応した付け爪の作成を簡単におこなうことができるシステムが求められる。以上のような状況認識のもとに、本研究では、著者らが独自に開発した空間変形手法(GFFD)を用い、市販のデジタルカメラで爪を2方向から撮像して得た画像から、精度のよい個人の爪形状モデルを迅速かつ低コストで作成する方法を提案し、個人の爪形状に適応した付け爪の作成を簡単におこなうことができるシステム確立の第一歩とすることにした。

2. 本研究の位置づけ

個人の人体形状の幾何形状モデルを復元する方法として、(1)レンジファインダを用いて実在する人間の形状を読み取り、これをもとにしてポリゴンモデルを構築する方法と、(2)写真画像などから特徴となる情報を抽出し、これをもとに標準形状モデルを変形してポリゴンモデルを構築する方法、の2通りがある。(1)の例としては、全身用のものとして、ボディラインスキャナ(浜松ホトニクス)、Voxelan(浜

[†] 東京農工大学
Tokyo University of Agriculture and Technology

^{††} 東京農工大学
Tokyo University of Agriculture and Technology

野エンジニアリング)、Danae-S (NEC エンジニアリング) が、足専用のものとして INF00T が挙げられる。これらの人体特性計測装置の原理は、スリット状のレーザー光で測定対象を走査し、その反射光をカメラで受光した結果を測定するというものであり、高精度での測定が可能であるという利点がある。しかし、この手法にとって本質的な問題として、専用の機器が必要なが挙げられる。

製品とのフィッティングを目的とした3次元人体形状計測については、低価格・省スペースの計測装置が求められる場面が多い。そこで、注目されるのが(2)の手法である。たとえば、個人の顔形状を復元する研究においては、顔を複数の方向から撮影し、撮影した画像上から特徴点の3次元座標を求め、空間変形手法などを用いて、特徴点の座標を満たすように標準顔形状モデルを変形して個人の顔形状モデルを復元するいくつかの研究がある。著者らも、独自の空間変形手法(GFFD)を用いた個人の顔形状復元手法を提案している[1]。本研究では、著者らが開発した空間変形手法(GFFD)の利点を生かし、市販の安価なデジタルカメラで撮影して取得した画像のみから、あらかじめ用意した標準モデルを変形することにより、個人の3次元爪形状モデルを復元する手法を提案する。

3. GFFD に基づく爪形状のモデル化

3.1 爪形状のモデル化の概要

個人に適応したネイルアートを製作する上で重要な爪形状のモデル化を考えた場合、曲面の形状や外形を精度よく再現することが要求される。そこで、本研究では、このような部位に特徴点を配置することにした。その上で、作成対象となる個人の爪の写真画像からそれら特徴点の3次元座標を求め、標準形状モデルの特徴点座標と個人の特徴点座標の差分情報を得る。これら特徴点を GFFD 空間変形手法 (3.4 節参照) の操作点とし、差分を操作点の移動量とすることにより空間を変形し、個人の爪形状の幾何モデルを生成する。

3.2 個人爪形状モデルの構成

個人爪形状モデルは、その爪の曲面形状を表す点 (以下、特徴点と呼ぶ) の座標値の集合と、それらを GFFD の操作点として標準幾何モデルを変形することによって得られる個人の爪形状の幾何モデルからなる。

特徴点は、前述のように、爪の曲面形状や外形を決定する際に重要な点であり、これについては次節で詳しく述べる。幾何モデルは、表皮形状をモデル化したものであり、3角形ポリゴンからなる。

3.3 特徴点の配置

特徴点は、爪の曲面形状や外形を決定する際に重要である箇所に配置した。

爪の曲面はなだらかな曲面であり、写真画像から判断できるような特別に特徴的な点は存在しない。そこで、図 1 左に示すような格子状のシールを貼り付けた状態で写真撮影をおこない、その格子の交点 (図 1 右の赤点) を曲面上の特徴点とすることにした。なお、本研究で用いた格子は 1mm 間隔で 9×9 の格子で、その交点数は 81 個である。

外形を決定する点は、爪の生え際や先端等 (図 1 右の緑点) に 6 点配置した。

なお、これらが GFFD の操作点となることにより、幾何形状を代表する役割ももっている。

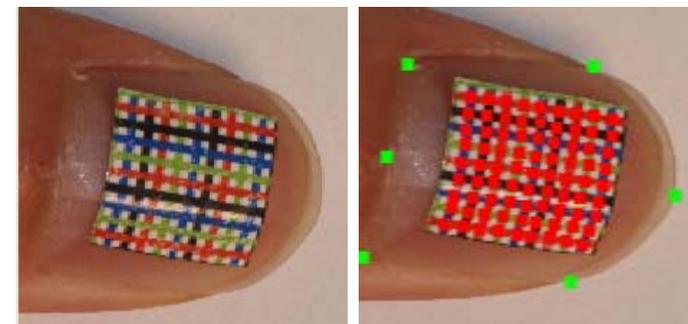


図 1 撮影画像 (左) と特徴点の配置 (右)

3.4 GFFD (Generalized Free-Form Deformation) の特徴

標準幾何モデルの変形には、任意関数による FFD (Generalized Free-Form Deformation, 以下 GFFD) [2] を用いる。これについての詳細は文献[2]で述べているので、割愛するが、基底関数によって空間の変形の仕方を変えられる点が特徴のひとつとなっている。また、一般の FFD では、制御点を格子の上に配置する必要があるため、制御点の移動と対象となる形状の変形との関係が直観的に把握しづらいという問題があるが、GFFD では、対象形状は必ず移動後の操作点に乗るように変形されるので、変形結果がかなり予測できるという特長がある。ただし、操作点以外の任意の点は、基底関数によって定まる補間方法によって自動的に算出されることになるので、この誤差がなるべく小さくなるような基底関数を用いることが重要となる。

GFFD では、点 $p(x,y,z)$ の移動を制御ベクトル $V_i(x,y,z)$ の重み付け線形結合として与える。

$$\mathbf{p}'(x', y', z') = \sum_{i=1}^n \mathbf{V}_i G_i(x, y, z)$$

ここで、 G_i を GFFD の基底関数と呼び、本研究では、基底関数としてユークリッドノルム (式(2)) を用いる。

$$\|\mathbf{x}\| = \sqrt{\mathbf{x} \cdot \mathbf{x}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$$

このときの GFFD における基底関数 G_j ($j = 1, 2, \dots, n$) は

$$G_j(\mathbf{p}) = \|\mathbf{p} - \mathbf{V}_j\| = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_j)^2}$$

となる。この基底関数の特徴は、遠くの点の影響を強く受けるので、多くの操作点が配置されているような場合、元の形状を保持し、滑らかに変形が行われる点にある。したがって、顔や足や爪などの人体 (の一部) を標準幾何モデルの特徴を維持しながら変形するような用途に適している。

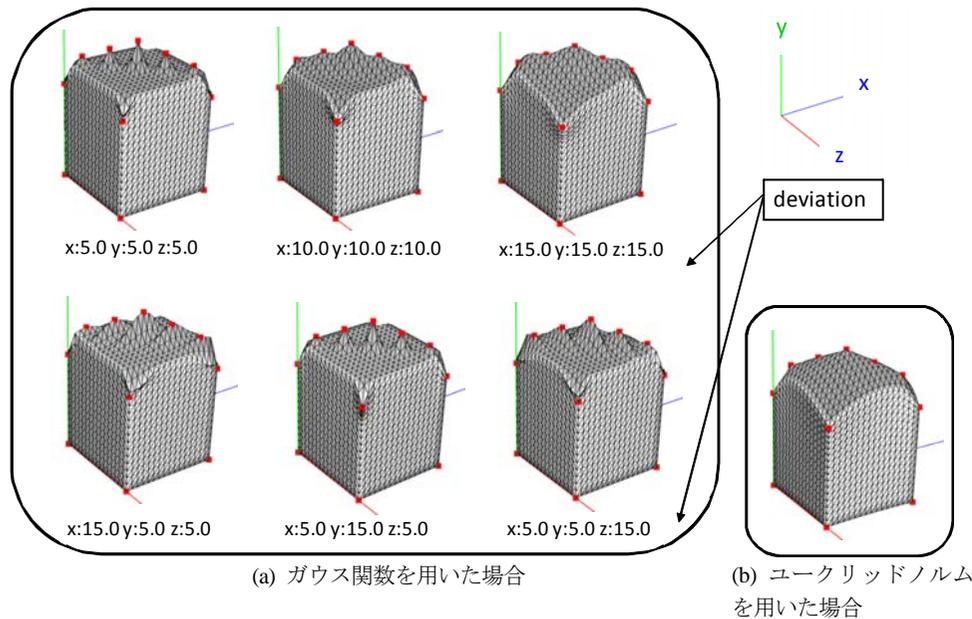


図 2 GFFD を用いた変型例

なお、本研究では、少数の点により形状を局所的に変形させるのにふさわしい関数としてガウス関数を基底関数とする GFFD も用いているが、参考のために、立方体の一面を同一の操作点を用いて変形したときの両者の変形結果の違いを図 2 に示す。ユークリッドノルムを基底関数として用いた場合の方が、より元の形状を保った滑らかな変形を実現していることがわかる。

4. 画像を用いた個人爪形状モデル生成の一連のプロセス

前章で、GFFD を用いることを前提とした爪形状のモデル化の方法について述べた。本章では、爪画像から特徴点を抽出し 3次元座標を取得する方法に始まり、最終的に個人爪形状の幾何モデルを生成するまでの一連のプロセスについて述べる。その全体の流れを、図 3 に示す。

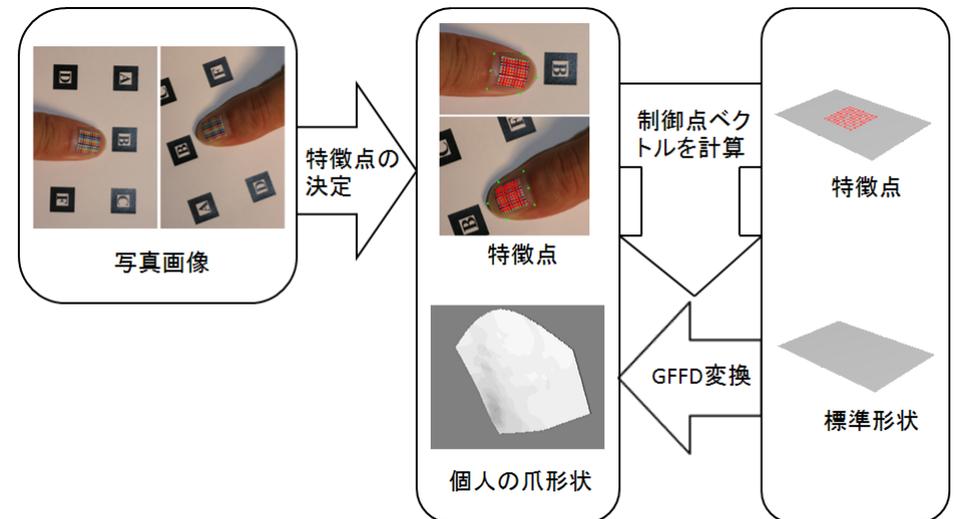


図 3 個人爪形状モデル生成のプロセス

4.1 爪画像の撮影とカメラ位置の推定

3.3 節で述べた格子状のシールを貼った爪を図 4 に示すようなマーカーとともに複数方向から撮影する。画像中でこれらのマーカーを認識することで、カメラパラメータを推定することができる。このようにマーカーを共に撮影することによって、簡単

にカメラの位置を計算することができるので、撮影時のカメラの位置姿勢を調べる必要がなくなるという利点がある。なお、本研究で用いたマーカーおよび、マーカー検出のアルゴリズムは ARTToolKit[3] で用いられているものを利用した。

また、球面レンズを搭載したカメラで撮影した被写体は凸状に歪むので、本研究では、Zhang のカメラキャリブレーション手法[4, 5, 6]を用いて画像の補正を行う。幾何特性が既知の平面パターンを多方向から撮影し、得られた画像中の特徴点をもとにカメラパラメータを推定することによって歪みを測定し、その補正値を撮影した画像に加えることにより、歪みの影響を減じた補正画像を作成する。

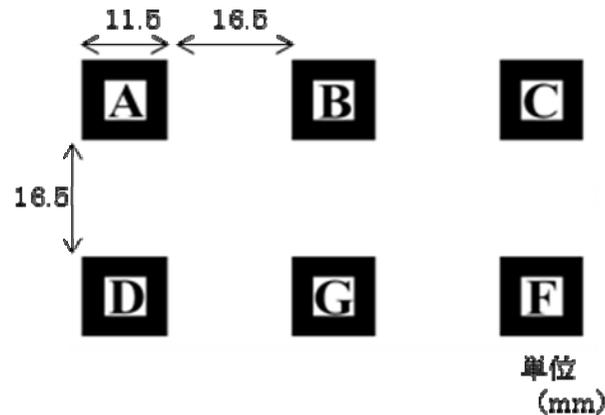


図 4 マーカー

4.2 画像上での特徴点選択と特徴点座標の計算

2枚の画像上で、特徴点 (3.3 節参照) を選択し、ステレオビジョンの原理により各特徴点の 3次元座標を計算する。

4.3 GFFD による標準幾何モデルの変形

得られた特徴点を、3.4 節で述べた GFFD の操作点として用いることにより、標準幾何モデルがカメラで撮像した個人の爪形状の幾何モデルへと変形される (図 5)。

◆ 標準形状 (板状の物体)

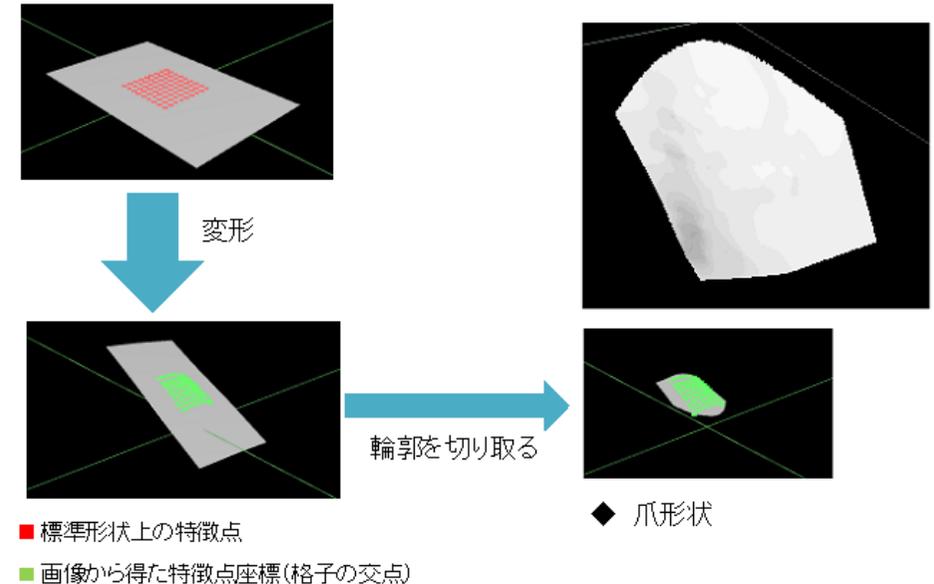


図 5 標準形状の変形による個人爪形状の生成

5. 実験

この種の研究では、復元された爪形状モデルについて、誤差が生じる原因を考察し、生成された個人の爪形状モデルが満足のいく精度内に収まっているかについての検証をきちんと行うことが重要である。4章で提案した手法において誤差が生じる要因は、主として「画像からの特徴点座標の取得時に生じる誤差」と「GFFD による変形時の補間による誤差」の 2つである。そこで、次の実験を行う。

5.1 誤差の評価方法

本実験では、上で述べた方法で作成された爪形状の幾何モデルと 3次元スキャナでの計測により得られた 3次元データを比較し、各頂点における誤差を計測する。作成された爪形状モデルの各三角形メッシュの各頂点とその特徴点に最も近接する元の 3次元データの三角形メッシュとの間の距離を計算し、これをその点における誤差とす

る。

なお、本実験では、人の爪から石膏模型を作り、これを撮影および計測に用いることにより実験をおこなった。なお、3次元スキャナとしては、KONICA MINOLTA製のレーザ式非接触3次元スキャナ VIVID910を用いる。このスキャナの精度は±0.008mmと公表されており、評価用のデータとして十分な精度が保証される。

5.2 GFFD 変形時の補間による誤差についての実験

はじめに、本研究の大きな特徴となっている GFFD 変形手法に固有に生じる誤差がどの程度生じているかについての実験を行う。この実験を行うためには、「画像からの

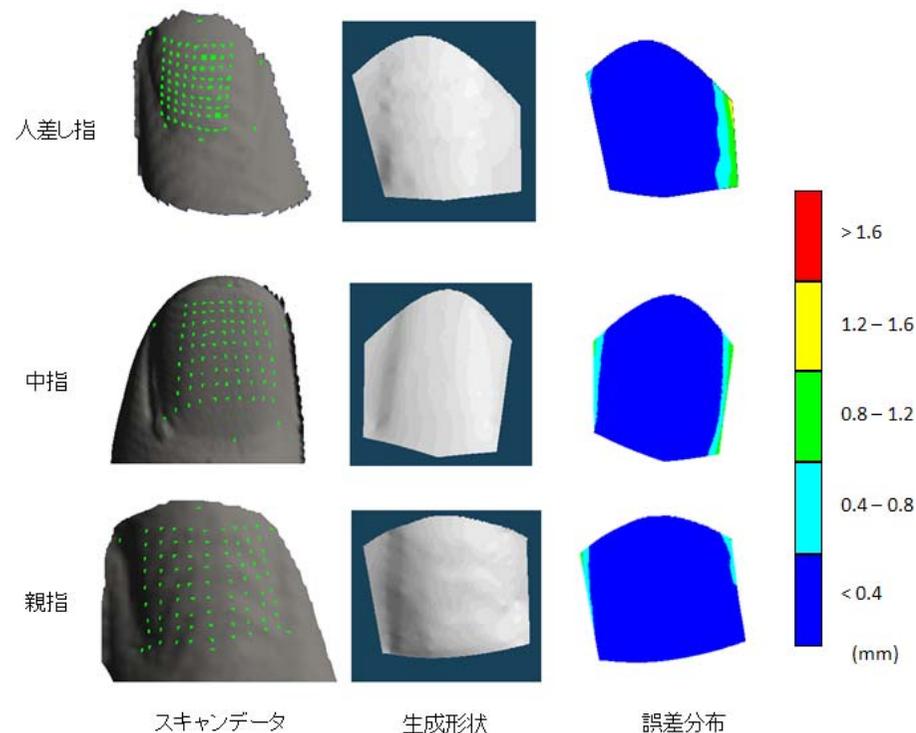


図 6 GFFD 変形時の補間による誤差

特徴点座標の取得時に生じる誤差」を排除しなければならない。画像処理による誤差が混在している条件下で実験を行っても、何を評価しているかわからなくなるからである。そこで、本実験を行う際は、画像からではなく、レンジファインダで計測された3次元データ上で直接特徴点を抽出し、それらを操作点として標準幾何モデルに GFFD 変形を行う。GFFD 変形では操作点を必ず通るように形状が変形されるので、特徴点（操作点）についての誤差はほぼ0となり、その他の点についての GFFD 変形時の補間による誤差だけが純粋に計測されることになる。

結果を図 6 に示す。なお、本実験では、爪の曲面部の精度に注目することにした。したがって、変形の際、輪郭部の特徴点は変形の操作点として用いていない。

図 6 の結果より、特徴点が配置されている箇所の周辺は 0.4mm 以下の誤差になっていることが分かる。このことより、特徴点（操作点）の誤差はほぼ0になるという GFFD の特徴が満たされていることが分かる。また、変形の性質上、特徴点から離れた位置ほど、補間の誤差が大きくなるため、特徴点を配置する間隔が重要となる。本実験の結果では、誤差は小さくなっており、特徴点配置の間隔が十分であると言える。

また、これらの結果より、爪の曲面上の特徴点（格子の交点）の位置座標を正確に求めることができさえすれば、精度良く爪の曲面形状を得ることができるということが分かる。

5.3 全体の誤差について

画像から個人の爪形状モデルを生成する一連のプロセス全体の誤差についての結果を、図 7 に示す。5.2 節の結果より、爪の曲面部分については「GFFD による変形時の補間による誤差」は 0.4mm 以下となっており、ほぼ0に近いということが分かる。つまり、図 7 に示したプロセス全体の誤差の大部分は「画像からの特徴点座標の取得時に生じる誤差」に起因するものと考えられる。なお、「画像からの特徴点座標の取得時に生じる誤差」の要因は、「カメラの位置座標の推定」と「ステレオ視の原理による座標値の計算」の2つが挙げられるが、本結果の誤差がこのどちらの要因によるものかについての検証は今後の課題とする。

図 7 の結果より、爪の曲面形状の誤差は 5.2 節の結果より少し大きくなっており、0.4~0.8mm の箇所も表れている。しかし、人差し指の平均誤差が 0.28mm、分散が 0.07、薬指の平均誤差が 0.41mm、分散が 0.12 であり、爪の長さに対する平均誤差の比率は、人差し指（長さ 13mm）の場合、約 2.1%、薬指（12mm）の場合、約 3.4%であることから、十分な精度であると言える。

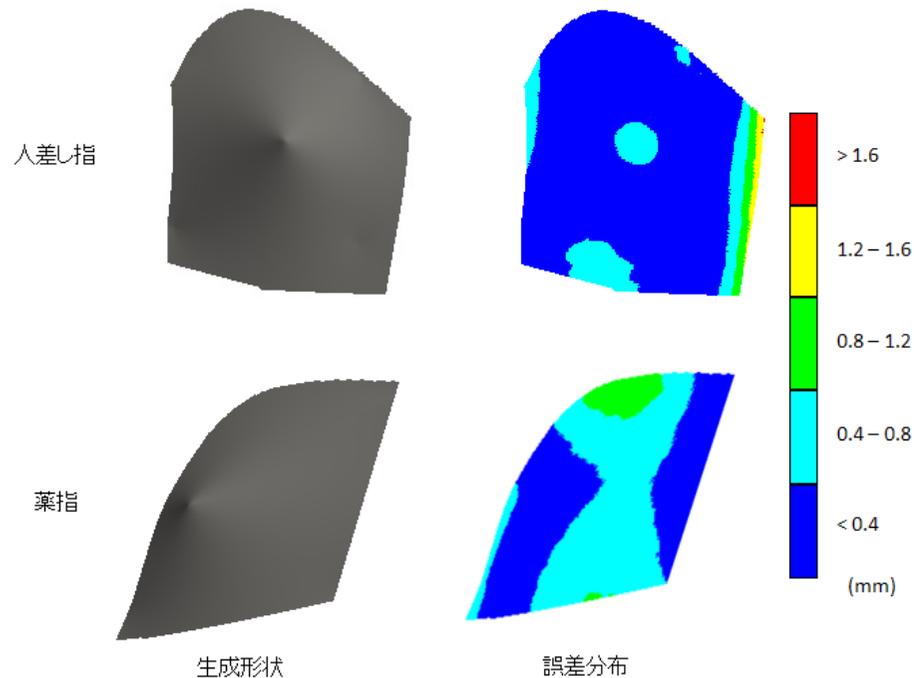


図 7 プロセス全体の誤差

6. おわりに

複数方向から撮影したカメラ画像を用いて爪形状モデルの生成を簡便におこなう手法を提案した。本手法は、(1)爪画像の撮影、(2)画像からの特徴点の3次元座標決定 (3)GFFD (北嶋研究室が開発した空間変形手法) による標準形状の変形という過程からなる。

本手法において誤差が生じる要因は、主として「画像からの特徴点座標の取得時に生じる誤差」と「GFFDによる変形時の補間による誤差」の2つである。

そこで、以下の実験をおこなった。

(1) GFFDによる変形時の補間による誤差

レンジファインダで計測された3次元データ上で直接特徴点を抽出し、それらを操作点として標準幾何モデルにGFFD変形を行った結果とレンジファインダで計測した

データを比較することにより、「GFFDによる変形時の補間による誤差」について検証をおこなった。その結果、特徴点周辺の誤差は、0.4mm以下となっており、十分に小さな誤差での補間がおこなわれていることが示された。

(2) 全体の誤差について

画像から得られた特徴点座標を操作点として標準幾何モデルにGFFD変形を行った結果とレンジファインダで計測したデータを比較することにより、「プロセス全体の誤差」について検証をおこなった。(1)によりGFFDによる変形時の補間による誤差は0.4mm以下となっており、ほぼ0に近いということが分かっているので、本実験における誤差の大部分は「画像からの特徴点座標の取得時に生じる誤差」に起因するものであると考えられる。人差し指の平均誤差が0.28mm、分散が0.07、薬指の平均誤差が0.41mm、分散が0.12であり、爪の長さに対する平均誤差の比率は、人差し指(長さ13mm)の場合、約2.1%、薬指(12mm)の場合、約3.4%であることから、十分な精度であると言える。

今後の課題として、「画像からの特徴点座標の取得時に生じる誤差」の要因のうち、「カメラの位置座標の推定」と「ステレオ視の原理による座標値の計算」のそれぞれが、変形結果の精度にどの程度の影響を与えているのかについての検証をおこなうことが挙げられる。また、画像上での特徴点(格子の交点)位置の選択は手動であると手間がかかるので、自動的に選択できるように改善をおこなう予定である。

参考文献

- 1) 北嶋克寛, 赤木康宏, 山内玲, 岡澤直輝, 樋口靖和: GFFDに基づく顔形状モデリングに関する研究, 精密工学会誌 Vol.74, No.8, pp. 883-890, 2008
- 2) 吉田典正, 加納顕也, 北嶋克寛: ガウス関数に基づく Free-Form Deformation, 精密工学会誌, 65巻, pp.971-975, 1999.
- 3) ARToolKit
<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>
- 4) Z. Zhang, Parameter Estimation Techniques: A Tutorial with Application to Conic Fitting, Image and Vision Computing Journal, 1996.
- 5) Z. Zhang, Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations. International Conference on Computer Vision (ICCV'99), Corfu, Greece, pages 666-673, September 1999.
- 6) Z. Zhang, A Flexible New Technique for Camera Calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11):1330-1334, 2000.