解説

接触の個人差

Individual Difference in Contact

多田 充徳* *産業技術総合研究所

Mitsunori Tada* *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

1. はじめに

「感覚の個人差」と言うとき多くの方が感覚受容器の受容感度の個人差を思い浮かべるのではないだろうか？ もちろんこれは間違いではない。しかし、触覚の場合には受容感度以外の個人差も考える必要がある。そう、皮膚の形状や皮膚の硬さに関する個人差である。触覚とは主に皮膚の変形に起因する感覚である。このため、表面に与えた同じ外刺激も皮膚の形状や硬さに応じて受容器の近傍では異なる機械刺激となる。つまり、外刺激がフィルタリングされるのである。

このことは、触覚研究の困難さを増幅させる一因となる。視覚や聴覚であれば、計測した外刺激と受容される刺激がほぼ等価になると考えてよい。一方、触覚の場合には、フィルタリングされた外刺激を考えなければならない。しかし、皮膚の応力や歪みのような物理量を直接計測することは技術的に極めて難しい。このため、ハプティクスやバイオメカニクスにおける触覚研究では、皮膚モデルを用いたシミュレーションに基づくフィルタリング効果の予測が盛んに行われてきた。

例えば、針電極で計測した遅順応 I 型受容器の応答と指腹内部の歪みエネルギー密度を比較した研究 [1] [2]、振動に対する指腹内部の歪み応答を計算した研究 [3]、平板の接触に伴う指腹部の変形を計算した研究 [4]、そして接触面の固着・滑りの分布に対する指腹内部の応力分布を計算した研究 [5] など枚挙にいとまがない。

これらのシミュレーションでは、指腹部の断面を再現した二次元平面歪みモデルや、特定個人の形状データから作成した三次元モデルが使用されていた。つまり、皮膚の形状や硬さに起因するフィルタリング効果の個人差には言及されていなかったのである。筆者らは、MRI 画像から指形状のデータベースを構築することで、様々な形状特徴を持つ指モデルを迅速に生成する手法を開発した [6]~[8]。本稿で

は、フィルタリング効果の個人差、つまり「接触の個人差」を議論するために必要な多様な指モデルの生成手法と、この手法を用いて生成した代表形状に対する接触シミュレーションの結果を概説する。

2. MRI 画像を用いた形状データベースの構築

皮膚フィルタリング効果を予測するためには、その表面形状だけでなく骨や筋腱のような内部組織の形状も必要になる。仮に表面形状が同一でも、骨の太さが違えば変形挙動も変わるからである。筆者らは MRI 画像から内部組織まで含めた個人差を計測する手法を開発した [6]。この手法では、図 1 のようにソース画像が比較対象となるターゲット画像に近づくように、ソース画像中に等間隔に配置した制御点を移動させる。そして、最終的に画像間の誤差が最小となるときの移動ベクトルを形状の個人差とする。

もちろん実際の MRI 画像の場合には四隅の制御点だけで画像を合致させることができない。このため多数の制御点を配置する必要がある。一方で、多数の制御点を配置すると移動ベクトルを計算するための最適化問題が不安定となる。この問題に対処するためにイメージピラミッドを構築し、低解像度・少数制御点から徐々に粒度を向上させる手法を実装した。指画像のサイズは $256 \times 128 \times 128$ 画素であり、すべての方向に対して 16 画素ごとに制御点を配置したため、最終的には 4131 自由度の最適化問題となった。

50 名分の示指 MRI 画像から基準となる画像を一枚選択し、それ以外の画像との間の個人差を計算した。計算した 49 名分の移動ベクトルに、基準画像自身を表すゼロベクトルを付加した 50 名分の移動ベクトルを主成分分析することで指形状の特徴を明らかにした。MRI 画像の撮像対象と

図 1 変形場を用いた医用画像に対する個人差の計算

原 2012 年 3 月 13 日

キーワード: Finger Geometry, Individual Difference, Principal Component Analysis, Finite Element Method

*〒 135-0064 江東区青海 2-3-26

*Koto-ku, Tokyo

図2 指のバウンダリーファミリー (文献[6] から一部改変の上転載)

なった成人男性の場合には、指の大きさ、太さ、そして指腹の厚さが顕著な特徴となることが分かった。これらの特徴の重み付け和を計算すれば、多様な形状特徴を持つ指モデルを迅速に生成できるようになる。個人差を統計的に分析したことで、形状がデータベース化できたわけである。一例として図2に横軸を指の大きさ、縦軸を指腹の厚さとしたときのバウンダリーファミリー[9]を示す。

3. 形状データベースを用いた個人別指モデルの生成

前章で述べたとおり、特徴の重み付け和を計算すれば多様な形状特徴を持つ指モデルが迅速に生成できる。次に、生成した指モデルの代表寸法、例えば節長、関節幅、関節厚などを、ある被験者の代表寸法に合致させることができるような重みを計算する最適化問題を考えてみよう。被験者の代表寸法については、ノギスなどを使えば容易に計測できる。つまり、この最適化問題を解くことができれば、形状データベースとノギスから個人別の三次元指モデルを迅速に生成できるようになる[7][8]。

筆者らは様々な条件下で検証を行い、末節と中節の長さ、第一関節と第二関節における幅と厚み、そして爪根本における幅と厚みの計8代表寸法に対して、上位10主成分を用いた最適化を行えば実用上十分な精度を持つ指モデルが生成できることが確認した[7][8]。最適化のための目的関数については、代表寸法誤差の二乗和からなる誤差項に、標準偏差で除すことで正規化した重みの二乗和からなるペナルティ項を加えたものとした。後者を導入することで、過大もしくは過小な重みへの最適化を抑制できる。±2標準偏差の区間内に約95%の被験者が存在するという統計的意

図3 典型的な大人指と典型的な子ども指

味を考えれば、ペナルティ項の導入は妥当であろう。

図3に生成した指モデルの一例を示す。上が典型的な大人指である。図中には示されていないが、皮膚形状だけでなく骨形状も再現可能であることを確認した。またこの手法の特徴として、大人とはプロポーションが異なる子どもの指も生成可能な点が挙げられる。図3下に生成した典型的な子ども指を示す。単純なスケーリングだけではプロポーションの違いを再現できない。一方、筆者らの手法では特徴の重み付け和から形状を生成する。このため、長さの割に全体的に太く、指腹部に厚みがある子ども指の特徴を的確に再現できる。

4. 形状の個人差が接触に与える影響

最後に、2章で作成した指のバウンダリーファミリーから、指腹が薄い指、平均的な指、そして指腹が厚い指を対象に有限要素法を用いた接触解析を行う。解析に使用するモデルは45,468個の4面体一次要素から構成されている。材料特性については文献[3]を参考に設定した。このモデルを剛体平板に対して約30°の角度に固定して、この平板を

図4 指形状が接触圧力やミーゼス応力の分布に与える影響

指腹部に対して1.0 [mm] 押し込む接触解析を行った。骨と爪部は完全に固定されており、指と平板との間の摩擦は考慮しなかった。

接触解析の結果を図4に示す。図上が接触圧力、下がミーゼス応力の分布を表す。平板の押し込み量が同じでも、指の形状によって接触圧力やミーゼス応力が1.5倍程度変化することが分かる。またいずれの指についても、接触圧力については指先側に偏心する傾向があること、ミーゼス応力については接触面よりも指腹内部の方が高くなることが分かった。後者の現象は古典的な接触理論でも説明されている[10]。また、図中には示されていないが、ミーゼス応力が最も高くなるのは爪と皮膚の境界の近傍であった。人の触覚知覚を考える上で示唆に富む結果である。

5. おわりに

本稿では、個人差を考慮した指モデルを生成するための手法を概説した。この技術では、形状の特徴をデータベース化するため、大人の指だけでなくプロポーションの異なる子どもの指も生成できるようになる。また、指腹の厚さの異なる三つの指モデルに対して接触解析を行った。この結果、同じ外刺激を与えても、接触圧力やミーゼス応力が指腹の厚さによって1.5倍程度変化することが分かった。本稿で紹介した指モデルの生成技術は製品の安全性検証に応用されている[11]。今後は、触覚の個人差を議論するためにも広く活用したい。

参考文献

- [1] M.A. Srinivasan and K. Dandekar: "An investigation of the mechanics of tactile sense using two-dimensional models of the primate fingertip," *Journal of Biomechanical Engineering*, vol.118, pp.48-55, 1996.
- [2] K. Dandekar, B.I. Raju and M.A. Srinivasan: "3-D finite

element models of human and monkey fingertips to investigate the mechanics of tactile sense," *Journal of Biomechanical Engineering*, vol.125, pp.682-691, 2003.

- [3] J. Wu, K. Krajnak, D. Welcome and R. Dong: "Analysis of the dynamic strains in a fingertip exposed to vibrations: Correlation to the mechanical stimuli on mechanoreceptors," *Journal of Biomechanics*, vol.39, no.13, pp.2445-2456, 2006.
- [4] 嶋脇, 酒井, 福田: "CT 画像から構築した三次元ヒト指尖部モデルの有限要素法による力学的変形解析", *日本機械学会論文集 C 編*, vol.71, no.704, pp.204-209, 2005.
- [5] 広瀬, 前野: "物体把持時におけるヒト指腹部の固着・滑り分布と触覚受容器応答", *日本機械学会論文集 C 編*, vol.68, no.667, pp.914-919, 2002.
- [6] 多田, 野原, 梅田, 持丸: "個体差の統計分析に基づく多様な形状特徴を持つ手指有限要素モデルの生成", *日本機械学会論文集 C 編*, vol.75, no.758, pp.2765-2772, 2009.
- [7] 木村, 多田, 寺林, 梅田: "形状特徴の重ね合わせによる個別手指モデルの生成", *日本機械学会論文集 C 編*, vol.78, no.788, pp.1202-1210, 2012.
- [8] K. Kimura, M. Tada, K. Terabayashi and K. Umeda: "Subject-specific finger model from geometric database," *Proceedings of International Society of Biomechanics Congress*, 2011.
- [9] A.C. Bittner Jr., F.A. Glenn III, R.M. Harris, H.P. Iavecchia and R.J. Wherry Jr.: "CADRE: A family of manikins for workstation design," S. S. Asfour (ed.), *Trends in Ergonomics/Human Factors IV*, pp.733-740. Elsevier Science Publishers, 1987.
- [10] K.L. Johnson: *Contact Mechanics*. Cambridge University Press, 1987.
- [11] 平成 21 年度中小企業支援調査 安全知識循環型社会構築事業報告書, 独立行政法人産業技術総合研究所, 2010.

多田充徳 (Mitsunori Tada)

2002 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報システム学専攻修了。同年 4 月より産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究ラボ、現在に至る。ロボティクスやバイオメカニクスを背景に持ち、手指の触覚機能や筋骨格構造のモデル化とそのコンピュータシミュレーションに従事。また、これらを製品の操作性や安全性の向上に役立てるための研究にも携わる。博士 (工学)。