

個体差を持つ指腹の接触力学

Contact mechanics of a finger pad with individual variation

学 野原 健 (中大) 正 多田 充徳 (産総研) 正 梅田 和昇 (中大) 正 持丸 正明 (産総研)

Ken NOHARA, Chuo University, nohara@sensor.mech.chuo-u.ac.jp

Mitsunori TADA, Digital Human Research Center, AIST, m.tada@aist.go.jp

Kazunori UMEDA, Chuo University

Masaaki MOCHIMARU, Digital Human Research Center, AIST

This paper reports the influence of finger geometry on mechanics of contact. We synthesized nine representative FE models from geometric database of human finger, and simulated mechanical behavior of finger pad under the same boundary condition for this purpose. The results of the simulation revealed that there is strong correlation between thickness of a finger pad and the maximum von mises stress that arise in the boundary between finger nail and skin.

Key Words: Contact mechanics, individual difference, finger pad, finite element analysis

1 はじめに

バイオメカニクスや触覚研究では、指の有限要素解析が盛んに行われている。例えば、振動に対する指腹部の歪み応答を解析した事例 [1]、平板の接触に伴う指腹部の変形を解析した事例 [2]、そして接触面の固着・滑りの分布に対する指腹部の応力分布を解析した事例 [3] などがある。

従来の有限要素解析では、指腹部の断面を再現した 2 次元平面歪みモデルや、特定個人の医用画像から作成した 3 次元モデルが使われていた。つまり、手指形状の個体差が考慮されることはなかった。我々は、MRI 画像から形状の個体差を計測し、それらを統計的に分析することで、様々な形状特徴を持つ有限要素モデルを迅速に生成する手法を開発した [4]。本稿では、この手法を用いて代表的な指の有限要素モデルを生成し、それらを用いた接触解析を行う。そして、形状の個体差に起因する応力分布の変化を明らかにする。

2 個体差を有する手指有限要素モデルの生成

本研究で行う解析のために生成した代表的な指の有限要素モデルを Fig. 1 に示す。横軸が指の大きさ (第 1 主成分) を、縦軸が指腹の厚さ (第 6 主成分) を表す。また、図中の青丸が MRI 画像を撮像した 50 人の被験者の分布を、楕円がそれらの 95% を包含する確率楕円 [5] を表す。解析にはこの楕円上に存在する 8 種類のモデルと、その中心に存在する平均モデルを用いた。なお、第 6 主成分を第 2 軸としたのは、指腹部の厚みの変化が接触に伴う応力分布の変化に最も寄与すると考えられるからである。

3 個体差を考慮した有限要素解析

3.1 解析条件

解析に使用する有限要素モデルは 45468 個の 4 面体 1 次要素から構成されている。材料特性については文献 [1] を参考に

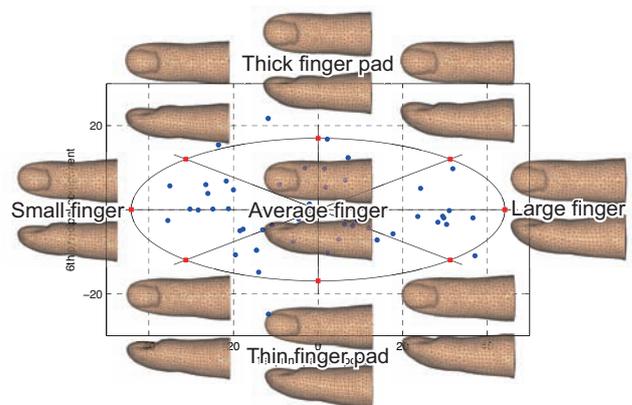


Fig. 1 Boundary family.

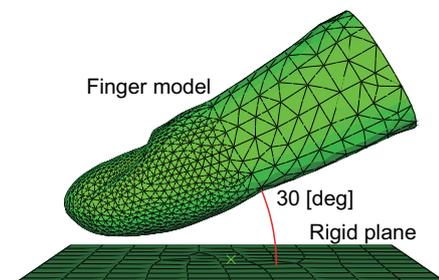


Fig. 2 Condition of the FE analysis.

次のように決定した。骨 (末節骨, 中節骨, 基節骨): ヤング率 1.0×10^8 Pa, ポワソン比 0.3。軟組織: ヤング率 1.0×10^4 Pa, ポワソン比 0.49。このモデルを Fig. 2 のように剛体平板に対して約 30 度に固定して、この剛体平板を指腹部に対して 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。解析には Abaqus Standard 6.7 (Dassault Systèmes) を用いた。また、プリポストプロセッサには Abaqus CAE 6.7 (同) を用いた。

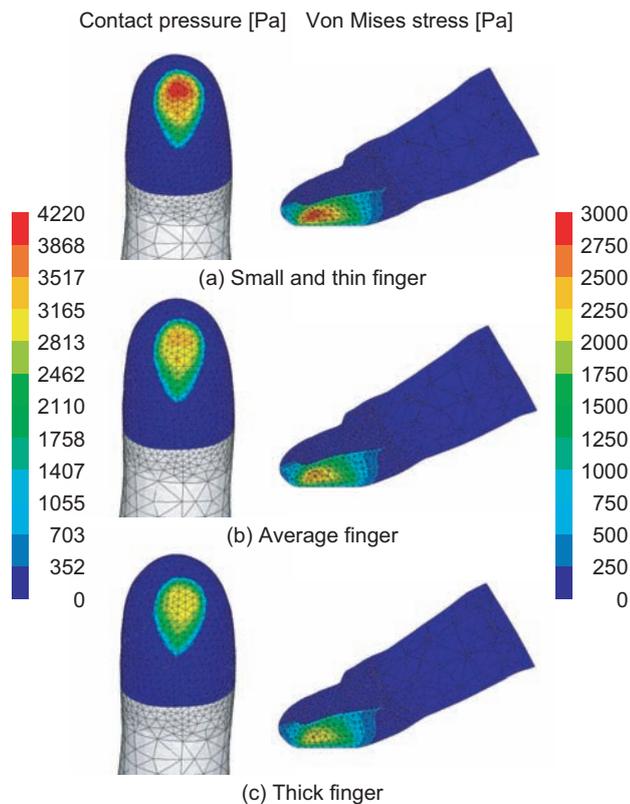


Fig. 3 Results of the FE analysis.

3.2 解析結果

接触解析の結果を Fig. 3 に示す。同図左が接触圧力の、右がミーゼス応力の分布を表す。また、同図 (a), (b), (c) がそれぞれ、小さく指腹の薄い指、平均指、指腹の厚い指を表す。平板の押し込み量と同じでも、指の形状によって接触圧力やミーゼス応力の分布が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も分かる。後者のような現象は古典的な接触理論でも説明されている [6]。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。これは、人の触覚知覚を考慮の上で示唆に富む結果である。

一方、Fig. 4 と 5 に、指の大きさと指腹の厚さの変化に対する最大接触圧力と最大ミーゼス応力の変化を示す。前述の通り、ミーゼス応力が最大となったのは指腹内部ではなく爪の近傍であることに注意されたい。これらのグラフより、指の大きさが大きくなるほど、そして指腹の厚さが厚くなるほど最大接触圧力が減少することが分かる。一方、指の大きさと最大ミーゼス応力には相関がみられないが、指腹の厚さとそれとの間には強い負の相関があることも分かる。

4 おわりに

個体差を有する手指の有限要素モデルを用いた接触解析を行った。即ち、指の大きさを第 1 軸、指腹の厚さを第 2 軸とした時の 95% 確率楕円上に存在する 8 種類のモデルに平均モデルを加えた 9 種類のモデルである。解析の結果、接触圧力が指先側に偏心すること、ミーゼス応力が接触面より指腹内部で高くなること、そ

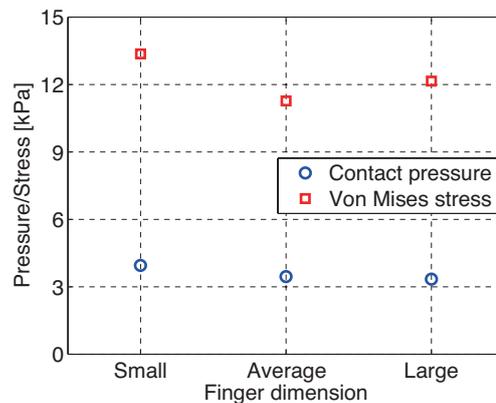


Fig. 4 Maximum contact pressure and Von Mises stress for different finger dimension.

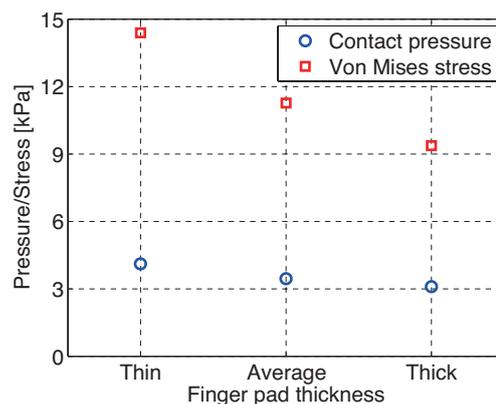


Fig. 5 Maximum contact pressure and Von Mises stress for different finger pad thickness.

して最大ミーゼス応力が爪と皮膚の境界の近傍に発生することが分かった。また、指腹の厚さと最大ミーゼス応力との間に特に強い相関があることも分かった。今後は、形状の個体差が触覚受容に与える影響を検討する。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 嶋脇聡, 酒井直隆, 福田智史. 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.
- [3] 広瀬慎一, 前野隆司. 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.
- [4] 多田充徳, 野原健, 梅田和昇, 持丸正明. 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, 投稿中.
- [5] A. C. Bittner, F. A. Glenn, R. M. Harris, H. P. Iavecchia, and R. J. Wherry. CADRE: a family of manikins for workstation design. In S. S. Asfour, editor, *Trends in Ergonomics/Human Factors IV*, pp. 733–740. Elsevier Science Publishers, 1987.
- [6] K. L. Johnson. *Contact Mechanics*. Cambridge University Press, 1987.