

# ヒトの皮膚と触覚のモデリング

## Modeling of Human Skin and Tactile Sensation

正 前野 隆司 (慶應義塾大学)

Takashi MAENO, Keio University, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522

E-mail: maeno@mech.keio.ac.jp

### 1. はじめに

ヒトは、あるときは意識下で、またあるときは無意識下で、全身の触覚をモニタしている。また、大脳皮質には巨大な触覚野があり、つるつるとすべすべの違いを区別したり、こりとしこりを触診したり、様々な触感のクオリアを感じることができる。このため、触覚の研究は、医療・福祉分野や美容・被服・コスメロジーの分野において重要である。触覚が視覚や聴覚と異なるのは、自己知覚感覚であるという点である。視覚・聴覚の受容器はむき出して、光量や空気の振動などの物理量を直接検出している。これに対し、触覚受容器は奇妙なことに皮膚の内部に埋め込まれていて、自分の皮膚が何かにふれたときに、対象物の物理量を直接計測するのではなく、自分の皮膚の変形（またはその時間微分）を計測する[1]。したがって、自分の皮膚がどう変形したときに、触覚受容器がどのように応答するのかを明らかにする必要がある。筆者らは、ヒトの皮膚と触覚の理解およびそれらのロボットへの応用という研究を行ってきた。本稿では、有限要素法を用いた皮膚・触覚受容機構のモデル化手法と、いくつかの適用例について述べる。

### 2. 有限要素法による皮膚組織の変形解析モデル

図 1 に示したのが、筆者ら[2]が作成した示指（人差し指）断面の有限要素モデルである。図(a)に示した全体モデルの上

部に図(b)のモデルを埋め込むことにより、指紋(epidermal ridge)や真皮乳頭(papilla)を有する指腹部皮膚の変形を解析し、それぞれの節点の変位、応力、ひずみを求めることができる。なお、上面がフラットな図(c)のモデルは、3章で述べる指紋の有無の比較のために作成した。ヒト指は、表面より、表皮(epidermis)、真皮(dermis)、皮下脂肪(subcutaneous fat tissue)から成る。また、真皮乳頭の先端にマイスナー小体が、真皮乳頭の付け根にメルケル小体が、真皮内部にルフィニ小体が、皮下脂肪内部にパチニ小体が、それぞれ配置されている。(それぞれの受容器は、それぞれ独特の周波数応答特性を示す[3]。)このため、図1に、 $\bullet$ 、 $\blacksquare$ 、 $\blacktriangle$ 、 $\blacktriangledown$ で示した箇所のひずみ状態を解析することにより、それぞれの触覚受容器の応答状態を見積もることができる。

なお、本モデルでは、指・対象物間の接触解析を行っている。すなわち、接触部において、指と物体が接触するか否か、固着(stick)するか滑る(slip)かを考慮した数値解析を行っている。このため、接触部における法線反力と接線反力(摩擦力)を求めることができる。

指断面モデルの形状と物性値は以下のように決定した。まず、慶大医学部の協力を得て、ヒト新鮮屍体の指断面の形状および弾性の計測を行った。また、図1の有限要素モデルを作成し、指に平板を押し込んだ際の、力、変位、接触面積の関係を解析した。これらを実験結果と比較することによって、縦弾性係数の妥当性を確認した。同定された縦弾性係数の値は、表皮、真皮、皮下脂肪の順に、 $1.36 \times 10^5$  Pa,  $8.0 \times 10^4$  Pa,  $3.4 \times 10^4$  Paであった。なお、皮膚の応力 ひずみ関係は実際には非線形性を有するが、指を平板に2 mm程度押し込んだ範囲では、線形解析でも十分に精度のよい結果が得られた。

また、筆者らは、有限要素解析結果と過去の実験結果を比較することによって、有限要素法で求めたひずみエネルギーと触覚受容器のインパルス発火頻度が比例関係にあることを明らかにした[4]。したがって、本モデルを用いてひずみエネルギーを計算すれば、それぞれの触覚受容器の発火状態を見積もることができる。

本モデルを用いれば、様々な解析を行うことが可能である。たとえば、指紋や真皮乳頭は触覚受容感度に影響しているのかどうか[2]、触覚受容器はなぜ図1のような箇所に配置されているのか[2]、表面状態の異なる物体を触ったときに触覚受容器はどのように応答するのか[4][5]、ヒトが物体を滑り落とさず握りつばさずに持ち上げるとき接触部でのスティック・

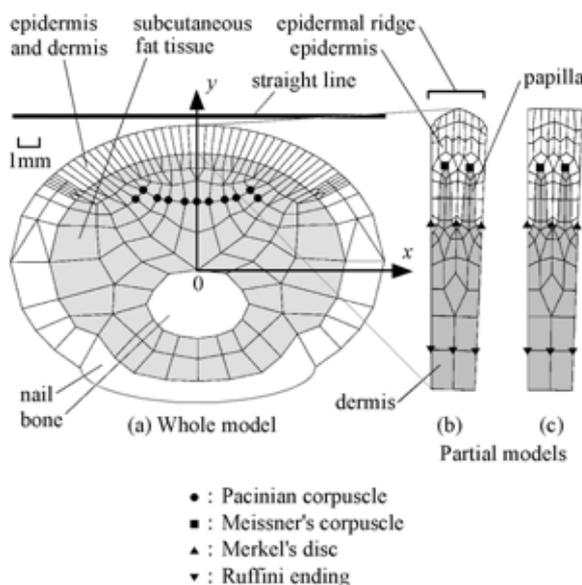


図1 ヒト指断面の有限要素解析モデル[4]

スリップ状態はどうなっているのか[6], 触覚ディスプレイでヒトの指に柔らかさ・質感・形状を呈示するとき, 触覚受容器はどのように応答しているのか[7], ヒトに物体把持時と同じような“局所滑り覚”を呈示するにはどのような構造の触覚ディスプレイを設計すればいいのか[8], などである。本稿では, これらのうち最初の例をピックアップして説明する。

### 3. 指紋はなぜあるのか?

指紋はなぜあるのだろうか? あまりにも身近なものなのに, 文献を調べてみても, この問いへの厳密な答えは見つからない。皮膚病理と指紋パターン分析についての研究は多いが, 指紋と触覚の関係についての研究は, 筆者が調べた限り, 見つからなかった。また, 指紋は滑り止めの役割を果たしている, という記述は様々な文献で見られるのだが, その真偽も定かではない。そこで, 筆者らは, 図 1 の有限要素モデルを用いて, 指紋がある場合とない場合, 真皮乳頭がある場合とない場合の解析を行った[2]。図 2 は解析結果の一例である。平板を指表面に押し付けた後に横方向に移動させた際の指断面の変形図に, ミーゼス応力分布を濃淡で示している。

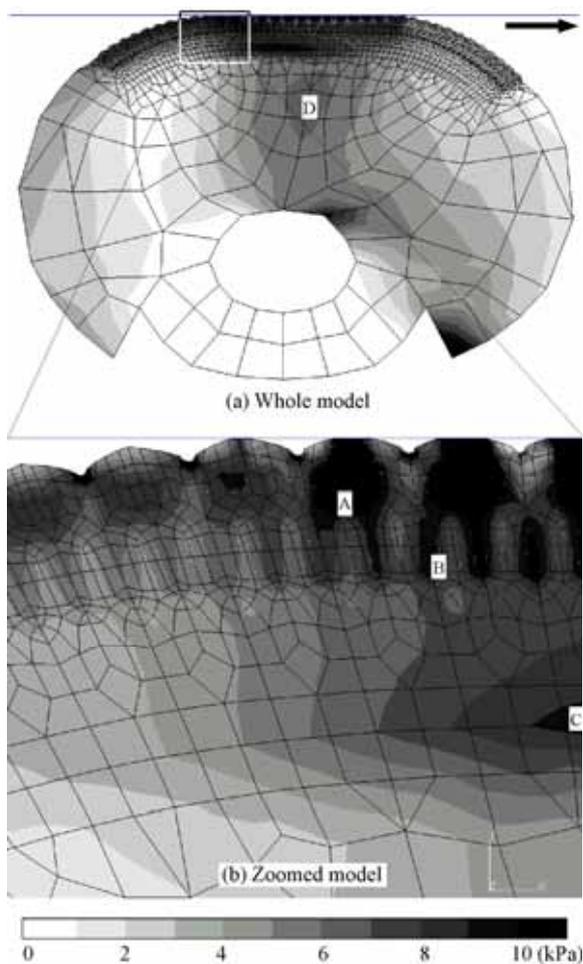


図 2 ヒト指断面の有限要素解析結果の例  
(ミーゼス応力分布) [4]

(ただし, A: マイスナー小体, B: メルケル小体, C: ルフィニ小体, D: パチニ小体 の位置)

このような解析の結果, 4 つの触覚受容器は応力が集中している箇所に配置されていること, 指紋や真皮乳頭はマイスナー小体やメルケル小体の感度を増大させる効果を持つことなどがわかった。つまり, 指紋は, 単なる滑り止めではなく, つるつる・ざらざら, あるいは, 滑りそう・滑らなそう, という触覚の検出感度を向上する役割を担っているのである。

### 4. おわりに

ヒト皮膚の有限要素モデルとその適用例について, 指の触覚という観点から述べた。指の有限要素モデルは, 指の変形と触覚受容器の発火状態を見積もることができるので, ヒトの触覚理解と, これに学ぶ触覚センサ・触覚ディスプレイ設計[9]のために重要である。

本稿では触れなかったが, ヒト皮膚の力学特性を明らかにすることは, 触覚以外にも様々な点で有用である。ヒト皮膚の粘弾性を精度よくバーチャルに再現する手術シミュレータの精度向上は, 医師の技能向上のために不可欠である。また, コンピュータ入出力機器, 文房具, 家具, 自動車, 化粧品, 洗剤など, ヒトの皮膚と接する人工物では, 使い勝手や触り心地が売れ行きを左右する。したがって, これらの設計現場ではヒト軟組織の特性を知ることの必要性が今後ますます高まっていくものと考えられる。

### 参考文献

- [1] 前野, ヒトの触覚受容機構 —力学・アナロジー・錯覚という視点から—, 電気学会センサマイクロマシン部門誌, Vol. 122-E, No. 10, pp. 469-473, 2002.
- [2] 前野, 小林, 山崎, ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係, 日本機械学会論文集 63 巻 607 号 C 編, pp. 881-888, 1997.
- [3] 前野, ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能, 日本ロボット学会誌, 18 巻 6 号, pp. 1001-1004, 2000.
- [4] 小林, 前野, ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係 (第二報, 動的接触解析手法および移動する平面と指の動的接触解析結果), 日本機械学会論文集 64 巻 628 号 C 編, pp. 4798-4805, 1998.
- [5] 小林, 前野, ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係 (第三報, 凹凸を有する面と指の接触解析結果), 日本機械学会論文集 65 巻 636 号 C 編, pp. 3321-3327, 1999.
- [6] 前野, 広光, 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 68 巻 667 号 C 編, pp. 914-919, 2002.
- [7] 鄭, 前野, ヒト指腹部における柔らかさ分布検出特性に及ぼす触覚呈示法の影響, 日本機械学会論文集 67 巻 658 号 C 編, pp. 1926-1933, 2001.
- [8] 毛利, 前野, 山田, 局所滑りディスプレイを用いたヒト下位中枢への「滑りそう」な触感の呈示法, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, 1A1-H-34, 2004.
- [9] 白土, 前野, 「触る」ということ - ヒトとロボットの触覚 -, 表面, Vol. 41, No. 5, pp. 145-152, 2003.