



触覚のモデリングと有限要素解析

前野 隆司

慶應義塾大学



1. はじめに

触覚の研究は五感の中でも視覚や聴覚に比べ遅れているといわれる。確かに、視覚を伝送する（ビデオ）カメラとテレビ、聴覚を伝送するマイクとスピーカが明らかに成熟技術の域に達しているのに対し、触覚センサと触覚ディスプレイは、限られた分野で実用化されはじめているに過ぎない。VRでも同様だ。PHANToMのように力覚を表示するデバイスには完成度の高いものがあるのに対し、触覚を綿密に表示するデバイスの開発はまだ緒に付いたばかりだ（触覚は皮膚への力分布による感覚、力覚は $\int (触覚) d$ 面積、すなわち、皮膚に加わる力の合計による感覚、と定義する）。

触覚の研究は、なぜそんなに遅れているのだろう？必要なから？（触覚の研究者として自虐的だが）それもある。触覚遠隔伝送のニーズは視覚や聴覚ほどに切実ではない。しかし、触覚受容器はヒトの全身に分布しており、ヒトは常に、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ーしている。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。だから、必ずしもニーズが少ないとはいえない。医療・福祉分野や美容・被服・コスメトロジーの分野など、ニーズはある。したがって、触覚研究が遅れている理由は、“要らないから”ではなく、“難しいから”だと思う。

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だ。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ぶれたときに、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]。だから、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。

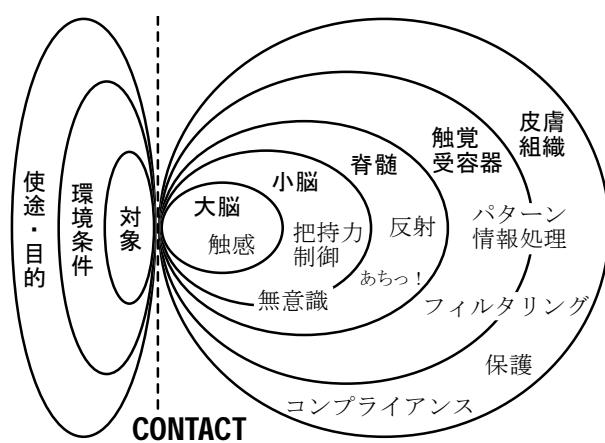


図1 触覚のヒエラルキー（物理的接触から認知的接触まで）

また、触覚が脳で利用される局面は、図1に示したように、他の感覚よりも多岐にわたる。「熱い」「痛い」といった触覚情報は、下位中枢にフィードバックされ、反射的に手を離すという制御（脊髄反射）のために使われる。大脳皮質に熱い・痛いといった情報が伝達され知覚されるのはその後である。また、摩擦係数や重さが未知の物体を持ち上げるとき、ヒトは最小限必要な力の1.3から1.5倍程度の力しか物体に加えないことが知られている[2]。これは、指と物体の接触面の状態がフィードバック情報として利用され、無意識下でフィードバック制御が行われているためと考えられている[3]。このとき、「滑り落としそう」というような触覚が意識にのぼるわけではないにもかかわらず、無意識下でしっかりとフィードバック制御が行われているという点が興味深い。3つめが、一般の人のイメージ通りの触覚である。「つるつる」「ざらざら」といったような触覚は、大脳皮質の触覚野で処理された後に、ヒトに意識される。

このように、触覚という現象は階層構造になっていて、文字通り奥が深い。物理的に接触しているのは物体と皮膚表面だけだが、現象としてみると、下位から上位までの神経系がそれぞれ独自のフィードバックループを構成していて、意識下・無意識下の触覚情報処理を行っているというわけだ。だから、少し大げさな言い方をすれば、触覚は生命の階層性の縮図であり、触覚理解は人間理解につながるといえる。そして、触覚理解のためには、皮膚の力学的インターフェースの理解が不可欠である。触覚は自分の皮膚変形を検出する感覚だから、ヒト皮膚の力学的特性を理解することが不可欠なのである。筆者らは、このスタンスから、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2に示したのが、筆者ら[4]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カー小体が、真皮乳頭の

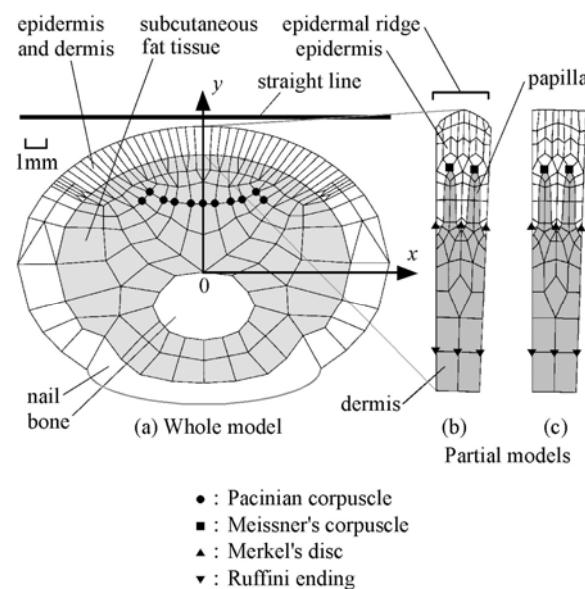


図2 ヒト指断面の有限要素解析モデル[4]

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、それぞれ独自の周波数応答特性を示す[5]。）このため、図1に●、■、▲、▽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2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、綫弾性係数の妥当性を確認した。同定された綫弾性係数の値は、表皮、真皮、皮下脂肪の順に、 1.36×10^5 Pa, 8.0×10^4 Pa, 3.4×10^4 Paであった。なお、皮膚の応力-ひずみ特性は実際には非線形性を有するが、指を平板に2mm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解析結果が得られた。

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[6]。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[4]、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[4]、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[6][7]、ヒトが物体を滑り落とさず握りつぶさずに持ち上げるとき接触部でのスティック・スリップ状態はどうなっているのか[8]、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[9]、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[10]、などである。本稿では、これらのうちの2つ（最初と最後の例）をピックアップして説明する。

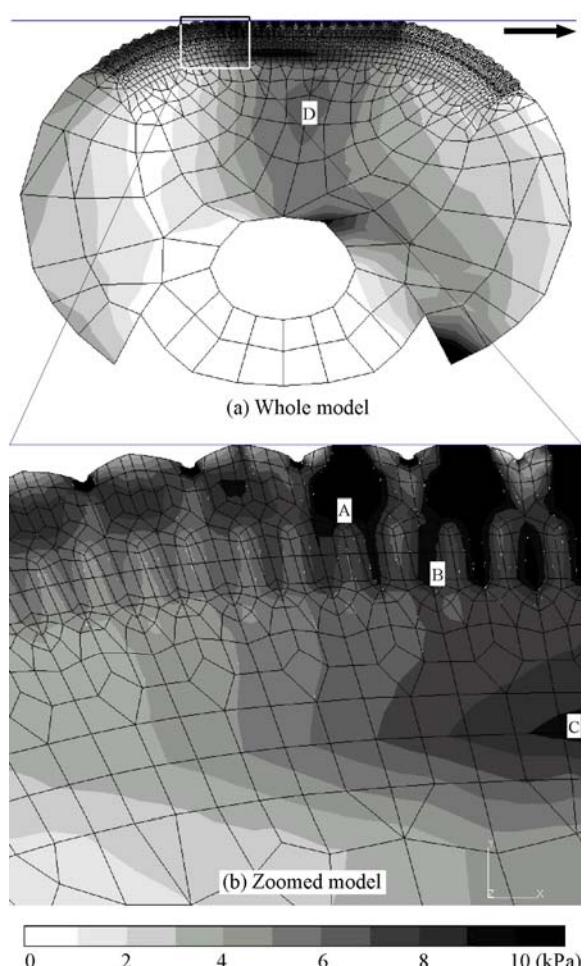


図3 ヒト指断面の有限要素解析結果の例(ミーゼス応力分布) [4]
(ただし、A:マイスナーカ体、B:メルケルカ体、
C:ルフィニカ体、D:パチニカ体の位置)

3. 指紋はなぜあるのか？

指紋はなぜあるのだろう？あまりにも身近なものなのに、文献を調べてみても、この問い合わせ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のだが、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、というような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[4]。図3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。

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カ体やメルケルカ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. 下位中枢への局所滑り覚の呈示

ちょっと毛色の變った売り出し中の研究を紹介しよう。1章や2章でも少しふれたが、下位中枢で“無意識”的もとに行われる把持力制御に対する触覚ディスプレイの研究である。

従来の触覚ディスプレイは、質感や柔らかさ、形状を、ヒトの上位中枢に対して呈示することを目的とするものばかりであった。触覚ディスプレイを触ったヒトは触感のクオリアを“意識”する。しかし、1章で述べたように、ヒトの触覚フィードバックは、反射や自動運動のためにも使われている。このとき、面白いことに、ヒトはその感覚を“意識”できない場合がある。

Johansson[2]や筆者[8]が行った研究によれば、重さと摩擦係数が不明の物体をヒトが把持し持ち上げる把持力の制御を行う際に、利用できるフィードバック情報は、接触面におけるスティック（固着）・スリップ（滑り）情報しかありえない。滑りそうなときにはスリップ領域が広がるというわけだ。そこで、筆者らが、指と物体との接触面におけるスティック・スリップ状態を計測したところ、確かに、接触面中央付近にはスティック領域が、端部にはスリップ領域が生じていた[8]。そして、これらの情報こそが、把持力制御のための入力情報のはずである。しかし、ヒトが物体を把持し持ち上げるとき、指の

どこがスリップしていてどこはスティックしている、というような接触状態を知覚することは難しい。つまり、ヒトは、スティック・スリップ状態を“意識”下で知覚することはできないけれども、“無意識”下の制御には使っている、というわけだ。

触覚に限らず、同様な現象は他の知覚でも見られる。たとえばヒトは20kHz以上の周波数の音を音として“意識”下で知覚することはできないが、音にうるさい人は、20kHz以上の成分を含む音と含まない音の音色の違いを感じとることができる。したがって、ヒトが意識下で知覚できるかどうか、という問題と、センサで検出しているかどうか、という問題は別物であることに注意が必要である。

さて、売り出し中の研究とは“滑りそう”かどうかをヒトの下位中枢に対し呈示する「局所滑り覚」呈示法の研究である。遠隔地にあるスレーブロボットハンドを、マスターロボットハンドで操作するような場合、あるいは、仮想物体をハapticデバイスで操るような場合を思い浮かべて欲しい。このとき、物体の状態を知覚することと同じくらい重要なことは、物体を滑り落とさずかつ握りつぶさずに適切な力で把持することである。遠隔物体や仮想物体は、油まみれで極めて滑りやすかったり、ゴムのように滑りにくかったりするだろう。しかし、従来のマスター手・ハapticデバイスでは、そのような摩擦係数の違いを呈示することはできなかった。それは、表面の摩擦係数を刻々と変化させるデバイスの作成が困難であることも一因だが、最大の原因是、そもそも摩擦係数が違うとヒト指表面では何が起こり、そのときに触覚受容器はどのように発火しているのか、ということが全く不明であったからに他ならない。

そこで、筆者らが考えている方法とは、以下の方法である。指と接する物体の摩擦係数を刻々と変化させて、滑りやすい／滑りにくい状態を作るのは困難極まりない。それよりも、触覚受容器をだまして、滑りやすい／滑りにくい物体を触っているときと同じような発火分布にさせてやればいいのではないか。そうすれば、ヒトは無意識に、滑りそう／滑りにくそう、という感じを受け取り、下位中枢のフィードバック制御が行われて、自動的に把持力を調節するのではないか。どうやってだますかというと、接触部の中央部ではスティックしていて、端部ではスリップしている、という、実際の物体把持状態に似た状況を作り出せばいいだろう。これを、筆者らは、下位中枢に対する「局所滑り覚」の呈示と名付けた。筆者らは、図4のような3つに分かれた刺激子のモデルを作

成し、両端の2つの刺激子に対し、中央の刺激子が独立に横に動く場合の有限要素解析を行った。結果を、平板と指との接触解析結果と比較したところ、触覚受容器(マイスナー小体)の予想発火分布(ひずみエネルギー分布)は、よく一致していた。したがって、図4の刺激子を用いて指を刺激すれば、実際に指が滑りそう／滑らなそうな場合とよく似た状況を作り出すことができる。そして、ヒトは、状況に応じて、無意識下で把持力の調整を行うものと予想できる。

有限要素法を用いて設計した刺激子を用いた「局所滑り覚」ディスプレイの試作機を図5に示す[10]。本装置では、被験者が把持部分を自ら上向きに動かそうとする際に、3つの刺激子のうち、両端の2つの刺激子の移動量が中央の刺激子の移動量よりも大きくなるように設計されている。これは、それぞれの刺激子が、上下に設けられた直径の異なるブーリにワイヤで接続されていることによる。また、刺激子に接続したばねにより、指の

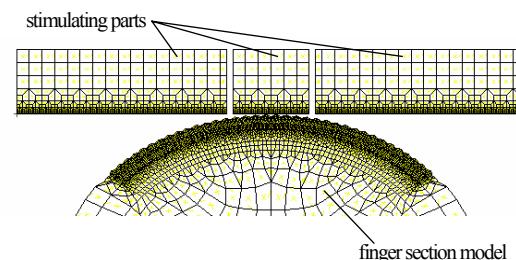


図4 局所滑り覚呈示装置とヒト指腹部の接触解析モデル[10]

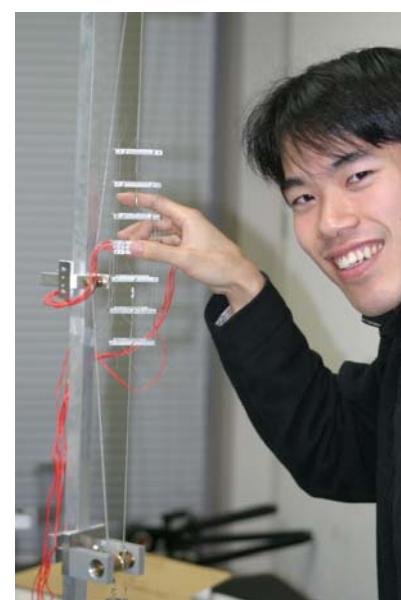


図5 局所滑り覚ディスプレイ[10]

上方向への移動量に比例した力が指に加わる。したがって、本装置を用い、ばねの弾性係数を変えて実験を行えば、接触面端部（両端の刺激子）で局所滑りが生じやすい状態と生じにくい状態において、ヒトがどのように把持力を加えながら物体を持ち上げようとしているのかを計測することができる。

本装置を用いて実験を行ったところ、被験者は、滑りやすそうなとき（局所滑りが大きいとき）には無意識に把持力を大きくし、滑りにくそうなときには逆に小さくすることを確認することができた。下位中枢に触覚フィードバック情報を呈示する、「局所滑り覚」ディスプレイというコンセプトの妥当性を確認できたといえる。

今後は、装置を小型化してハapticデバイスに実装する予定である。なお、ここで述べたのは下位中枢を“だます”触覚ディスプレイだが、触感（上位中枢）を“だます”場合も含めた広い意味での錯覚の研究[1]が、新たな触覚センサ・触覚ディスプレイ開発のために重要なと考えられる。

5. 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。触覚について考える際に、ヒトの皮膚の力学特性を解析することがいかに重要かをイメージいただけたのではないかと思う。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[11]のために重要なモデルである。

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] S. Johansson and G. Westling: "Roles of Glabrous Skin Receptors and Sensorimotor Memory in Automatic

Control of Precision Grip When Lifting Rougher or More Slippery Objects," Exp. Brain Res., vol. 56, pp. 550-564, 1984.

- [3] M. Mori, T. Maeno and Y. Yamada, Method for Displaying Partial Slip used for Virtual Grasp, Proc. IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3100-3105, 2003.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 鄭、前野、ヒト指腹部における軟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.
- [10] 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, 2004. (講演予定)
- [11] 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.

【略歴】

前野 隆司 (MAENO, Takashi)

慶應義塾大学機械工学科助教授

1984年東京工業大学工学部機械工学科卒業、1986年東京工業大学機械工学専攻修士課程修了。同年キヤノン株勤務。1995年慶應義塾大学理工学部機械工学科専任講師、1999年より現職。博士(工学)。専門はロボティクス、アクチュエータ・センサ工学。