

## 皮膚感覚のメカニズムに迫る

その工学的アプローチ

仲谷正史 (東京大学大学院情報理工学系研究科)

なかたに まさし

皮膚感覚に関して、近年急速に研究が進んでいる。皮膚感覚と一口に言ってもその役割は部位によってさまざまで、指先では局所的に非常に高解像度で形状情報・質感等を検出し、全身に張り巡らされた皮膚では危険回避や快・不快情報の取得を担う。工学の分野では主として、指先の皮膚感覚について研究が進められてきている。そこでまず本解説では、指先の皮膚感覚に関するこれまでの研究成果について概説する。その後、全身の皮膚感覚に関する最近の興味と、今後行われるであろう研究トピックについて、私なりに論じてみたい。

### 視覚 9 割・その他 1 割?

「人は見た目が 9 割」、というタイトルの本が日本ではベストセラーになっているように、日常生活では視覚情報の利用が人の行動を決める要因の大半を占めていると言われている。一方で、日常生活で何気なく使っている五感の中で、触覚は他の 4 つの感覚(視覚・聴覚・味覚・嗅覚)に比べて意識して使う場面は少ないかもしれない。しかし、これは意識に上る感覚の話であって、人間が気づかないところで膨大な触覚情報が処理されている可能性がある。たとえば、パーティで持っているグラスを落とさずに立ちながら会話する、というのは触覚の手助けがなければ決してできない離れ業である<sup>(1)</sup>。触覚をなくしてしまった場合に何がおこりうるかは、いくつかの文献によって知ることができるが<sup>(2)(3)</sup>、通常想像することは非常に難しい。目を閉じたり耳を塞いだりすれば、感覚がなくなった状態を想像することは容易にできるが、触覚を失うという体験は(足がしびれるといった例を除いて)日常的には稀だからである。人間は触覚情報を至極当たり前であつ信頼できる情報源として、五感のうちの他の感覚とも同様に無意識のうちに巧みに使い<sup>(4)</sup>、安定した日常生活

を享受していると考えられる。

### 皮膚感覚の解像度

最も古典的な皮膚感覚の研究は、触覚の解像度を求める研究である\*<sup>1</sup>。この触覚の解像度を知ることが工学的にみて非常に重要である。なぜならば、本特集で傳田氏が述べている通り、「視覚や聴覚と比べて触覚は言葉で伝えることが非常に難しい感覚」であり、「触覚そのものを再現して実際に体験しなければなかなか納得しがたい」からである。そのため、多くの研究者が触覚ディスプレイとよばれる、触覚を伝達するための装置の開発に取り組んできている。これら触覚ディスプレイの研究の目標は視覚障害者への情報伝達にあり、1970 年代ごろから盛んにプロトタイプが製作されてきた。現在では、インターネットショッピングが普及する中で、販売している衣服の「触り心地」を伝達したいという要求に対応しようと工学者が競って研究を行っていたり<sup>(5)</sup>、エンターテインメント用途でもゲーム中の接触を触覚(振動感覚)を通して伝える手法が盛んに取り入れられる

\*<sup>1</sup> ここで解像度とは、どのくらい細かい小さなキズまで人間が区別できるか、という指標である。

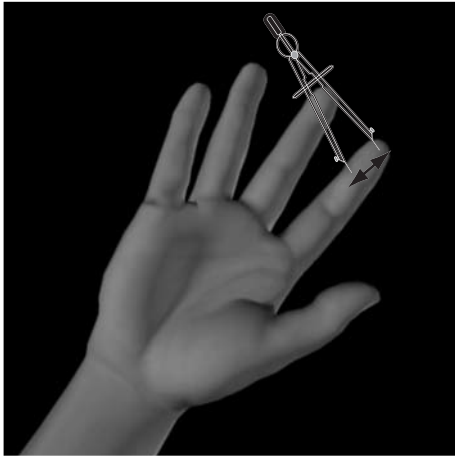


図1—2点弁別閾の測定方法。コンパスのような2本の先端の細い針を横から押し当て、受けた印象が1点か2点を答えることで、2点と区別できる最小の間隔を求める。

など、少しずつ応用範囲が広がってきている。

指先の皮膚感覚の解像度を調べるために、これまでさまざまな方法が提案されている。図1に示すような、コンパスの先2点で体の部位を刺激して、それが1点か2点を回答させるものが、もっとも基本的な解像度を求める方法である。一方、この方法に対しては、指の急激な「ひずみ」が手がかりとなって正しく解像度が計測できないのではないかという指摘がされている。この批判に対する解決策として、Johnsonらは図2のような方法で解像度を計測する方法を提案している<sup>(6)</sup>。彼らは、接触表面の溝の幅を変化させ、その溝の有無(図2, II)やその向き(図2, III)を答えさせることによって指先の解像度を検討している。その他、提示された2回の刺激が同じ場所になされたか否かといった定位を用いた解像度の計測方法も提案されている(詳細は文献(7)(10)を参照)。

上記の方法で求める解像度は、指が完全に止まった状態で、刺激が外部から加えられる場合であったが、それに対して指がアクティブに探索している状態での指の解像度を調べる研究も、同時に多くの研究者が取り組んできたトピックである。Loomisらは、その解像度は指が静止している場合の30倍の解像度をもつ場合すらあると報告している<sup>(8)</sup>。また、筆者らは高密度ピンマトリクス

を利用した皮膚感覚の解像度を計測する方法を提案している(図3)<sup>(9)</sup>。この簡易な器具は、1本1本別々に、垂直方向にだけ自由に上下動する細いピンを大量にならべたものである。このピンマトリクスを用いて物体表面をなぞると、表面の高さ情報のみを指に伝える一種の計測・ディスプレイ装置である。ピンの間隔を変えたピンマトリクスも用意し、これらで実際に物体表面をなぞることにより、たとえば外部刺激から形情報を再構成するために必要な触覚の細かさが検討できる。

筆者のバックグラウンドである工学的な見地から考えると、テレビやパソコンの液晶ディスプレイと同様に、触覚刺激を与える際に接触部分がどの程度高精細であれば(=高い解像度であれば)、どの程度リアルな皮膚感覚情報が再現されるか、ということは非常に興味深い。筆者らの研究であるピンマトリクスを用いた例では、形を正しく認識するためにはピン間隔が2 mm程度では不十分であり(これは、多くの触覚ディスプレイがもつ解像度)、ピン間隔が1 mm程度必要であることがわかっている。一方で、ピンを細くしてピン間隔をあまりにも細かくしてしまうと(解像度を高くしすぎると)、逆にエッジばかりが強調されリアリティを失ってしまい、形の知覚の正確さが大幅に改善することがないことを実験的・経験的に確かめることができる。

### 高品位な皮膚感覚提示のカギとなる錯触覚研究

皮膚が接触している面の大局的な凹凸情報よりももっと細かい情報(生地感・質感といったテクスチャ感覚)を提示する手法を検討する基礎研究も、盛んに行われつつある。目の細かさの異なるサンドペーパーをさわって、その粗さを答えるものや<sup>(10)</sup>、与えられた124種類の生地を被験者が自由に分類して、その分類結果とそれぞれの生地の物理特性(柔らかさや粗さなど)とを照らしあわせて人間にとって重要な触覚要素を探る研究<sup>(11)</sup>などが行われている。

その中でも、錯触覚によって生じる生地感の研

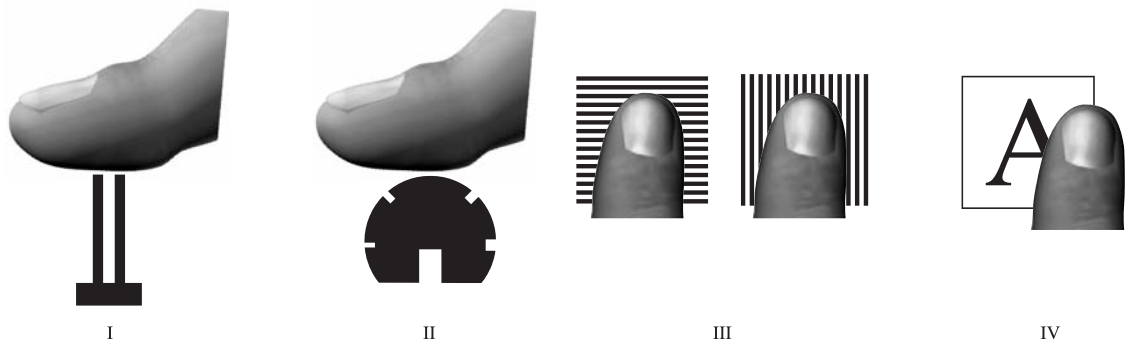


図2——Johnsonらが提案した指の解像度の計測手法(文献(6)より再構成)。I: 2点弁別閾の測定(刺激点が1点か2点か)、II: 連続した面上に溝の有無を判別、III: 溝の向きを判別、IV: 金属表面に彫られたアルファベット文字を判別。

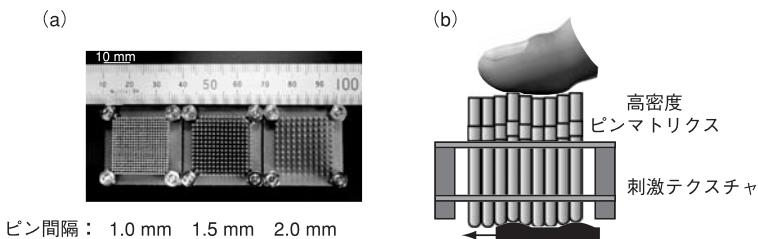


図3——筆者らが提案した指の解像度の計測手法。(a)ピン間隔の異なるピンマトリクスの例、(b)ピンマトリクスを用いた触覚提示手法。

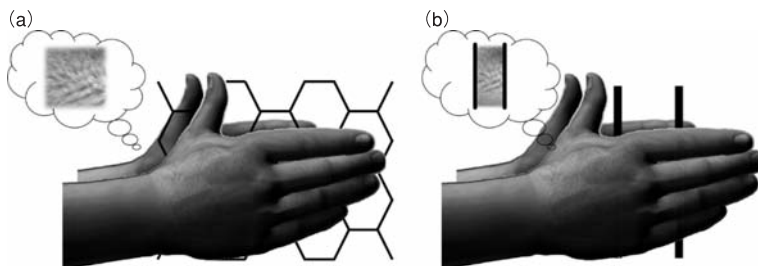


図4——ベルベットイリュージョンの模式図(文献(12)から再構成)。(a)テニスラケットのガット上の鉄線を両手で挟んで手を動かすと、手と手の間にベルベットのような柔らかい布感覚を得る。(b)2つの鉄線だけでも同様の錯覚は生じ、かつベルベット布感覚の境界を明瞭に感じることができる。

究は筆者にとって興味深い。ひとつの好例はベルベット錯覚という古典的な触覚の錯覚である。この錯覚では、テニスのガットのようなものを両手で挟んで同時に手を動かすことで、本来ならば手のひらそのものの感覚がするはずであるにもかかわらず、両手の間に、毛の短いフェルト生地、もしくはベルベットが挟まっているかのような感覚を得ることができる(図4、興味をもった読者は、東京・お台場にある Sony ExploraScience で同様のデモンストレーションが展示されているので、ぜひ一度足を運んでみるとよいと思う)。これはガットの形をしている必要はなく、2本の線状刺激が挟んだ手の中で相対的に動いていさえすればよい<sup>(12)</sup>。この錯覚の興味深い点は、手のひらに置かれた鉄線が移動するという非常に単純な刺激と手のひらもつ柔らかさ・温度を同時に

感じることで、毛状感覚というまったく異なる質感を生起させる点である。この例は、時代の最先端技術を駆使した非常に高精細・高密度な触覚ディスプレイでなくとも、単純な機構で生地感覚のような微妙なテクスチャ感覚を生じさせる可能性を示している。触覚再現を工学的に考える上で非常に示唆に富んだ例である。

### 全身に張り巡らされた触覚の役割: 閾下の触覚と快適性

上述の議論は、皮膚感覚といえども、おおよそ指先や手の皮膚感覚についてのみ論じてきた。しかしながら、皮膚感覚は指先だけでなく、全身に存在する皮膚そのものが感受しているとされる(本特集の傳田氏の解説参照)。皮膚の面積は成人

で1.6~1.8 m<sup>2</sup>を占めているとの知見から<sup>(10)</sup>、相対的に考えて、手や指先よりも全身の皮膚からの感覚情報のほうが情報量として膨大であるはずである。本稿の冒頭にて、パーティ会場で持っているグラスを落とさずに立ちながら会話を楽しむ、という例を引用したが、これらの動作はほぼ無意識に制御されている。把持物体がすべりそうになるのを指先で察知し<sup>(11)</sup>、体が倒れそうになればそれを回避するように体の姿勢をコントロールし、自らがどのような表情で話しているのかを感じる。これは1例に過ぎず、おそらくわれわれが気づかないところで、さまざまな制御が感覚情報をもとに行われているのだろう。そうしてみると、上述のような動作を行うために感覚情報のすべてを大脳(とくに触覚をつかさどる体性感覚野)が一元的に処理して、その上でフィードバック制御しているとは、考えにくい。これを鑑みると、皮膚感覚情報は分散・自律的に情報処理され、処理後の特に重要な情報のみが中枢神経系に送られている可能性が浮上してくる(コラム参照)。

もし、皮膚感覚の処理が分散・自律的に行われていると仮定すると、外部刺激に皮膚がどのよう

に応答するのかを局所的に調べるだけで、その皮膚感覚の情報処理メカニズムが明らかになる可能性がある。この仮定が正しいならば、与えられた刺激の「快・不快感」を皮膚科学の手法を用いて定量的に評価できるようになるかもしれない。なぜなら、皮膚感覚は快・不快感との結びつきが強いからである<sup>(13)</sup>。さらに想像を膨らませると、官能評価のような閾上の感覚ではなく、先に述べたような閾下の微弱な感覚量に対しても評価指標を作り出せるかもしれない。

この評価指標が担う役割を工学的応用の見地から考えてみる。すると、皮膚感覚の情報処理メカニズムをうまく利用して(または「だまして」)、たとえ安価な生地であっても、快適な感覚を生じさせる処理技術(たとえば、木綿の生地でもサテンや絹の生地感を与える、など)が確立できるだろう。加えて、人間が意識しないような微弱な刺激でも、知らず知らずのうちにある特定の皮膚感覚を無意識のうちに求めていると仮定し、そのような刺激の存在が示されれば、人間を「ある特定の行動に誘導するような」皮膚感覚を作り出せるかもしれない。その結果、たとえば操作者がまっ

#### 皮膚感覚情報の分散・自律的処理仮説の背景

このような考えが提出される背景を、視覚とのアナロジーを使って説明する。視覚においては、2つの眼球より検出された情報を処理して、外界情報を再構成するだけで相当の計算負荷がかかっており、処理を行う部位(領野)の数は30に上るとい<sup>(14)</sup>。これだけの領野を使ったとしても、その情報処理は完全とは言えず、外界の物理的な特性とは異なった知覚(いわゆる錯視現象)が多数報告されている。加えて、「盲視」とよばれる症例では、「光点を提示して何か見えましたか?」という問いに対してまったく答えられない患者であっても、なぜかその位置は正しく指し示すことができるという<sup>(14)</sup>。この現象が意味することは、たとえ意識されていなくとも、該当する情報を担当する脳の部位において分散処理されていて、外界を把握するために利用される情報が存在するこ

とである。

一方、触覚においては、これまで報告されている錯覚現象は非常に少ない。これは、体中に張り巡らされた触覚情報を中枢神経系が一元的に処理しているのではないがゆえに、触覚の錯覚の例はあまり多くないのではないかと考えられる(もちろん、触覚があまりにも当たり前の感覚であるため、人々が注意を払っていないだけ、という可能性も少なからず残されているが)。また、触覚情報の分散処理を裏付ける知見を筆者は見つけることができなかったが、類似した工学的試みは既に行われ始めている。篠田らは、皮膚と同様に柔軟性をもちかつ感覚情報を検出できるようなシートを作成し、ロボットに「皮膚感覚」をもたせようと試みている<sup>(15)</sup>。これら実質的に等価な皮膚の開発および実際の使用を通して、ロボットの応用範囲を拡げるだけでなく、皮膚感覚の情報処理機構も明らかになる可能性がある。

たく未知な道具を使う場面において、特別な指示なしでも正しい操作方法を伝える教示手法が開発しうる。このような応用例は、皮膚感覚を応用した1つの未来像として多くの研究者が今後提案してゆくことになるだろう。

### 皮膚感覚研究による「触発」の期待

日本語には「触発」という言葉がある。広辞苑第五版によると「感情・衝動・意欲などを誘起すること」とある。何らかの刺激で通常は心が動くことに対して使われる言葉であるが、いにしえの人は触る、触られるといった接触を通して意識的・無意識的に何かが変わることを経験的に知っていたのかもしれない。触覚・皮膚感覚研究の発展が、科学的な興味のみならず工学応用・医学応用など様々な研究分野を、まさに「触発」してゆくことを筆者は期待している。

### 文献

- (1) 前野隆司: 脳はなぜ「心」を作ったのか, 筑摩書房(2004)
- (2) オリバー・サックス, 高見幸郎・金沢泰子訳: 妻

- を帽子とまちがえた男, 晶文社(1992); 原著(1970)
- (3) G. Robles-De-La-Torre: IEEE Multimedia, Vol. 13, No. 3, 24(2006)
  - (4) 下條信輔: サプリミナル・マインド——潜在的人間観のゆくえ, 中公新書(1996)
  - (5) 篠田裕之: 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 6, 767(2000)
  - (6) K. O. Johnson & J. R. Phillips: Journal of Neurophysiology, Vol. 46, No. 6, 1177(1970)
  - (7) L. A. Jones & S. J. Lederman: Human Hand Function, Oxford University Press(2006)
  - (8) 岩村吉晃: タッチ, 医学書院(2001)
  - (9) M. Nakatani et al.: Tactile Sensation with High-Density Pin-Matrix, in Proc. of ACM the 2nd symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization(2005)p. 169
  - (10) 東山篤規ほか: 触覚と痛み, プレーン出版(2000)
  - (11) W. M. Bergmann Tiest & A. M. L. Kappers: Acta Psychologica, Vol. 121, No. 1,(2006)
  - (12) H. Mochiyama et al.: Haptic Illusions induced by Moving Line Stimuli, in Proc. of World Haptics(2005)
  - (13) きごこち科学研究会: <http://www.kigokochi.com/index1.html>(2006. 10. 21 現在)
  - (14) V. S. ラマチャドラン, 山下篤子訳: 脳の中の幽霊ふたたび, 角川書店(2005)
  - (15) 篠田裕之: 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 4, 385(2002)