

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—

非会員 前野 隆 司 (慶応義塾大学)

Tactile Sensation of Humans –Mechanical Dynamics, Analogy and Illusion—

Takashi Maeno (Keio University)

Topics on tactile sensation of humans are described from the mechanical, analogical and illusional points of view. First, tactile sensation of human finger is described from a physiological and mechanical point of view. It is shown that there are four types of mechanoreceptors and they share frequency band of stimulus. It is also shown that three mechanical non-linearity of skin are important for transforming stimulus at the surface of the skin to the mechanoreceptors. They are non-linearity due to material property, large deformation and contact. Next, analogy and sensor fusion among tactile, visual and auditory sensation are focused on in relation to an illusion. It is shown that tactile sense is detected by transforming space information to vibration information whereas visual sense detects space information directly. Analogy of different sensation is also discussed including stroboscopic motion, phantom sensation and masking. At last, sensor fusion among different sensation is described.

キーワード：触覚，指，力学的非線形，アナロジー，錯覚

Keywords: tactile sensation, finger of human, mechanical non-linearity, analogy, illusion

1. はじめに

「この文章は嘘である」という文章は本当か嘘か、といった自己言及文の問題は自己矛盾を含んでいて面白い⁽¹⁾。自己言及性は認知科学や物理学のホットな話題であるが、ヒトの触覚も、自己言及的な感覚である点がこれらと同様面白い。視覚や聴覚が基本的には外界に存在する物理現象を視覚・聴覚受容器によって検出する感覚であるのに対し、触覚は、触った対象物の接触力や温度を直接検出するのではなく、自分自身の皮膚の変形や熱伝導という非線形変換を介して自己を計測する感覚だからである。つまり、対象物の表面がつるつるか、ざらざらかを知覚する際には、皮下に埋め込まれた触覚受容器では、皮膚表面の接触力分布や温度分布といった外界の物理量ではなく、皮膚がどのように動的に変形したか、どのような温度になっているかという自己の状態を実は検出しているのである。このため、触感を知覚する際に、多種類の触覚受容器では力学的に変換されたどのような情報を検出しているのか？その後の神経系ではどのような処理が施されているのか？といった問いに対する答えは、内部観測が困難である上、個人差の影響が顕著である（たとえば皮膚の弾性率は加齢とともに数 10 倍も変化する⁽²⁾）がゆえに、視覚や聴覚ほどには明らかにされていない。さらに、皮膚に接

触した対象物の形状や弾性分布、こりやしこりのような対象物内部弾性分布、「つるつる」「ざらざら」といった触感などの情報は、指や手のひらを能動的に動かす機械的運動を伴わなければ検出できないという点からも自己言及的である。これらの点が、力学を扱う機械工学の研究者である私が触覚のとりこになっている理由である。電気電子工学やセンサ工学に携わる方々にもこの面白さを味わっていただきたいと思い、本稿では、ヒトの触覚についての生理学的・力学的知見と、視覚や聴覚とのアナロジー、錯覚、感覚統合という視点からの独断的解説を試みたい。

2. 生理学的知見

ヒトの無毛皮膚部の皮下には主に 4 つの触覚受容器があり、低周波／高周波刺激に応答する SA/FA、受容野が狭い／広い I 型／II 型に分類されることが広く知られている⁽³⁾⁽⁴⁾ (図 1)。刺激強度受容型、速度受容型、加速度受容型といった分類も行われるが、周波数応答波形 (図 2) を見ると、要するにダイナミックレンジを無理して広く取るのではなく、時間・空間周波数帯域を補完しながらセンシングするために、たまたまそのような応答波形を呈しているに過ぎない⁽⁴⁾と考えるように思う。SA I は静的なひずみから低周波まで (空間的には高周波) を分担し、FA II は高周波 (空間的には低周波)

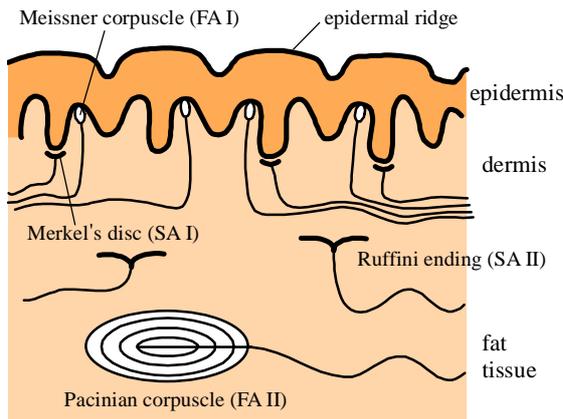


図1 皮下の触覚受容器
Fig.1 Tactile receptors incorporated in the skin

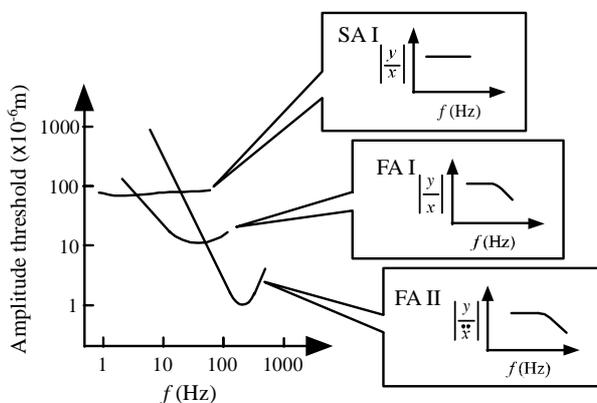


図2 振動刺激に対する触覚受容器の閾値⁽⁴⁾
Fig.2 Thresholds of tactile receptors for vibratory stimulus

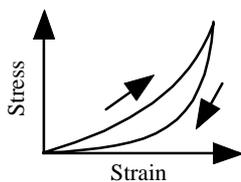


図3 皮膚の材料非線形
Fig.3 Non-linearity of material of skin

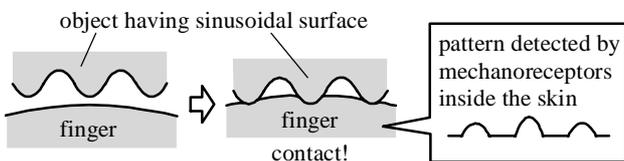


図4 接触による非線形変換
Fig.4 Non-linear transformation due to contact

を分担している、というように。

皮下に配置された無数のマイクロセンサのメカニズムを解明すれば、Science や Nature の読者に情報提供できるに違いないが、残念ながら、SAI がひずみセンサ、FAI が速度センサ、FA II が加速度センサであるのはどのような原理による

のか、という点は今のところ不明である。このような特性のセンサをヒトは進化的に最も獲得しやすかったのであろうから、これらのセンサの仕組みが解明されれば、マイクロセンサの研究者にも大いにヒントになると思われるのだが。

3. 力学的非線形変換

生理学の研究者は、触覚受容器を取り出してきてその特性を理解した時点で満足しがちだが、触覚は自己（皮膚変形）検出感覚である以上、皮膚の特性を理解しなければ触覚メカニズムの理解という意味では片手落ちである。機械工学的観点から見てみると、粘弾性体の構造物である皮膚は、構造力学における3つの非線形性、すなわち、材料非線形、幾何学的非線形、接触による非線形に関わっていることがわかる。材料非線形とは、弾性や粘性の非線形特性である。例えば、皮膚の応力-ひずみ関係を計測してみると、ゴムと同様に(応力)/(ひずみ)が応力の増加とともに増加する特性を示すばかりでなく、負荷時と除荷時のカーブが、例えばシリコンゴムのようなエラストマーよりもはるかに大きなヒステリシスを示す(図3)。また、皮膚は容易に大変形するので、大変形に伴う形状変化と内部応力変化も応力-ひずみ関係を非線形化する要因である(幾何学的非線形)。さらに、接触による非線形も極めて大きい。すなわち、図4のように皮膚に正弦波状の物体が接触したとすると、正弦波の凸部のみが皮膚に接触する結果、皮下に分布する触覚受容器の位置でのひずみ分布は図4右図のように半波の正弦波状となる。この波形をフーリエ変換してみれば明らかのように、本来の空間周波数の整数倍の高調波が伝達されていることになる。時間周波数についても同様であり、触感を得るために指を対象物上で滑らせる動的触察を行うとき、対象物表面形状の履歴はそのまま触覚受容器に伝えられるのではなく、接触を介して周波数変換されるのである。以上のように、皮膚では、接触した物体の情報、材料非線形、幾何学的非線形、接触による非線形という非線形変換を介して触覚受容器に伝わるため、空間周波数も時間周波数も大きく変化する。さらに、上記の3つの非線形変換を無視し皮膚を線形材料とみなしたとしても、皮膚表面に接触した対象物による刺激はそのまま皮下の触覚受容器には伝わらない点にも注意が必要である。なぜなら、皮膚は連続体であるので、深部に行くほど物理情報が鈍る、空間周波数フィルタとなっている⁽⁵⁾からである。筆者らは、皮膚の構造を有限要素法により詳細にモデル化し、3つの非線形変換のうち接触による非線形のみを考慮して、平板状あるいは凹凸状物体と接触する指の変形と触覚受容器応答について解析した⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。指紋や指紋直下の構造が触感検出感度向上のために重要であることや、それぞれの触覚受容器が応力集中の発生する箇所に適切に配置されていることなど、皮膚を介して4種の触覚受容器に伝達される情報が解析されているので参照されたい。ヒトの触覚に学ぶ触覚センサや、ヒトに触感を呈示する触覚ディスプレイを具現化する際には、以上のような、皮膚の連続体としての特性や非線形変

換特性を考慮することがきわめて重要であると考えられる。

4. アナロジー・錯覚・感覚統合

ナイフで鉛筆を削れることや、鉛筆で一定の太さの線を描けることが、昔の技術者にとっては必須技能の一部であった。しかし、現在の学生はキーボードとマウスを使えば図面を描ける。日本の工場から熟練技能者は減り、日本が技能オリンピックで入賞することは難しくなった。熟練技能者の代表選手である外科医も最近ではロボット手術により技能の習熟から開放されつつある。五感のうち、現代人が視覚に頼る割合は7割とも9割とも言われており、手先の器用さや、器用さのための触覚センシングは、時代とともに重要でなくなりつつあるように思える。乳幼児の知育玩具は脳皮質の多くの部分を占める体性感覚野を今も鍛えようとしているようだが、現代の大人にとって、触覚は視覚や聴覚ほどに重要ではないようである。しかも、触覚の呈示は、皮膚による非線形変換を介するがゆえに、テレビやスピーカよりもはるかに困難に思える。このため、触覚ディスプレイが複雑極まりないものであったとしたら、その高価な機械は誰にも利用されないであろう。だからこそ、触覚のセンシングと呈示を行う際には、視覚や聴覚との類似と相違を把握し、いかにしてヒトの触覚をだませるシンプルな機械を作るか、という視点を意識する必要がある。必要最小限の情報に圧縮された触覚情報入出力を行うマンマシンインタフェースを具現化することによって、視覚ディスプレイの進歩とともに現代人が失ってきた器用さを取り戻せるのではないかと、そして、VR、レイグジスタンス、感覚代行といった文脈の中から、新たな知育や創造が生れるのではないかと思うのである。

このため、本節では、まず、ヒトの視覚・聴覚・触覚の類似点と相違点についての私見を述べる。つぎに、視覚・聴覚・触覚における錯覚の類似・相違という視点および感覚統合という視点から、触覚を「だます」ということについて述べる。

まず、触覚と視覚の類似について述べる際に忘れてはならないのは、Johnson らによる衝撃的な測定結果⁹⁾である。Johnson らは、サルに体性感覚野に電極を刺し、指腹部における3種(SAI, FAI(RA), FAII(PC))の触覚受容器上の皮膚に対して呈示したアルファベットの凸状パターン(突起0.5mm, 文字サイズ約6.5mm)が脳皮質の体性感覚野に投影されていることを示した。SAIからの信号を再構成することにより、アルファベットのA, B, C...がきれいに再現されている様子が視覚的にアピールされていて美しい。また、FAI(RA)およびFAII(PC)は速度および加速度受容器であるため、アルファベットの凹凸そのものではなく微分値(エッジ)を検出していることも示されている。これらの結果を見ると、Johnson らが自ら述べているように、文字のパターンを脳に伝えるにはSAIが重要であり、触覚は視覚と同様に空間パターンを脳に投影する感覚であるように思える。しかし、この実験は、皮膚または脳にマトリクス上に配置された触覚受容器群または神経細胞群の空間発火パターンをそ

のまま記録したのではなく、単一の受容単位上の皮膚に対してアルファベットを左右、上下にスキャンした結果としての時刻歴波形を論文紙面上で空間的に再構成して視覚的に示しているに過ぎない。(Johnsonの結果から示唆されることは、むしろ、皮膚の非線形変換を介しても、SAIやFAIにはステップ状刺激がかなり精度よく伝達されているという点であると言うべきであろう。)

つまり、触覚は、対象物表面の「つるつる」「ざらざら」といった空間パターンを直接パターンとして検出するのではなく、動的触察というスキャン行為を介して凹凸分布を時刻歴波形に変換して検出する装置なのである。こうする理由は、視覚と触覚の時空間分解能を比較してみると明らかである。すなわち、視覚の空間分解能は視野角にして1/60度(目から50cm離れた位置で0.145mm)と精細だが、時間分解能は(空間周波数や光量にもよるが)ざっと数10Hzしかない。つまり、テレビは1秒に50枚の画像を呈示すればヒトの視覚をだますために十分である。これに対し、触覚の空間分解能(2つの点への刺激を2つの刺激と感じうる2点弁別閾値)は指腹部のSAIやFAIで約1.5mmと思いのほか粗い。一方、周波数帯域は広く、FAIは15~20 μ m程度の振動刺激に対し100Hz程度まで、FAIIはサブミクロンレベルの振動刺激に対し数100Hz程度まで応答する¹⁰⁾。このため、触覚受容器が検出できる空間周波数は、実際の「ざらざら」な表面の空間周波数よりもはるかに低い。にもかかわらず、対象物表面の微細な粗さ感をヒトが検出できるのは、指をスキャンする動的触察により、空間パターンを時刻歴振動パターンとして知覚するからに他ならない。

また、Johnsonは、SAIがアルファベットのパターンを視覚的に再現しているから、SAIがパターン認識のために重要であると述べている。確かに、視覚についての日常体験を振り返ってみると、視覚受容器は彩度と明度のパターンを直接脳で再現しているように思える。しかし、実際には、視神経で視覚パターンを処理する際には、側抑制による空間微分処理が行われている。この現象は、マッハバンド錯視など、様々な錯視として知られている¹⁰⁾。つまり、明暗の境界ではエッジが強調されており、ヒトが認知する画像は、日常体験には反して、明暗のパターンだけではなく、これに明暗の空間微分が重畳されたような情報なのである。このような視点から触覚を見ると、速度受容器と側抑制が機能的にアナログカルである。つまり、Johnsonの実験結果に示されているように、FAIでは、凹凸の空間分布のエッジを、時刻歴分布の時間微分(速度)に代替して検出している。これは側抑制と類似したエッジ強調に他ならない。触覚パターン知覚の際には、SAIによるパターンのみならず、FAIによるエッジ強調が重要な役割を果たしていると考えられるべきであろう。

さて、先ほど、触覚の2点弁別閾値は2つの点への刺激を識別しうる最小距離であると述べた。では、ヒトは2点弁別閾値以下の情報を検出できないと考えるべきであろうか? この点については、聴覚と触覚の比較が示唆を与える。ヒト

の可聴周波数は 20Hz から 20kHz 程度であるといわれるが、20kHz 以上の音をカットすると耳のいい人には音が違って聞こえる。つまり、人が音を音として知覚できる周波数は 20kHz までだが、20kHz 以上の周波数の音波も、聴覚受容器で検出され、脳内において何らかの形で情報処理されていると考えられる。同様に、ヒト指腹部の 2 点弁別閾値は約 1.5mm であるけれども、これよりも空間周波数の高い刺激は全く検出できないのではなく、2 点と意識上で感じ得ないだけであって、何らかの触覚情報として検出され何らかの形で利用されている可能性は否定できないことに注意が必要であると思う。

続いて、視覚と触覚における錯覚のひとつである仮現運動について述べたい。視覚における仮現運動とは、少し離れた 2 つの光点を交互に点滅させると、1 個の光点が往復運動するように見えるという、映画や電光掲示板でなじみの現象である。皮膚上の 2 点を交互に連続して刺激する際にも、小さなものはねるような、あるいはくすぐるような動きが感じられることがある⁽¹¹⁾。触覚における仮現運動である。いずれの仮現運動においても、呈示時間と呈示時間間隔には比例関係がある。ただし、視覚では 2 つの刺激の間にインターバルがあってもよいが、触覚の場合は 2 つの刺激に重なりがある場合にのみ仮現運動が知覚されるという。視覚も触覚も、離散的な刺激を連続と感じさせることにより知覚を「だませる」という点で一致している。テレビのように高精彩な触覚ディスプレイを作成するのは現状では技術的に困難だが、触覚の仮現運動を適切に利用すれば、電光掲示板並みにある程度絞り込んだ触覚情報を呈示することは容易なのではないかと思う。仮現運動の他にも、聴覚における音源定位の触覚版ともいわれるファントム・センセーション（皮膚上の 2 点を振動刺激素子によって同時または短い時間間隔で刺激すると、2 つの刺激の中間地点への 1 つの触振動であるかのように知覚される現象）や、視覚・触覚に生じるマスキング（ある刺激によって、他の場所への別の刺激についての感覚が低下したり喪失したりする現象）といった興味深い現象が知られている⁽¹⁰⁾。このような、他の感覚と触覚における錯覚をその特性に合わせて利用するアナロジーの視点が、触覚のセンシングと呈示のために有効であると思う。

最後に、触覚と他の感覚の統合について述べたい。例えば、視覚と聴覚の統合の例として、音刺激の方向がずれている場合に音が光の方向から聞こえてくるように知覚される現象がある⁽¹²⁾。触覚と温度の場合も同様であり、手のひらに振動刺激と温刺激を与えると、条件によっては温刺激が振動刺激の部位で知覚されることがある⁽¹²⁾。また、触覚による材料知覚の際に、皮膚表面の温度変化の役割が重要であることが明らかにされている⁽¹²⁾。これらより、触覚呈示の際には、温度情報との統合を考慮することが重要であると考えられる。

また、視覚と触覚の統合に関しても様々な知見が得られている。和氣ら⁽¹¹⁾は、正方形が長方形に見えるような特殊なレンズを被験者にかけて正方形の物体を触らせると、被験者は長方形であるように感じ、目を閉じた瞬間につかんでい

る物が正方形に変形したように感じることを示した。Lederman ら⁽¹⁴⁾は、視覚と触覚に異なる粗さのサンドペーパーを知覚させる実験を行い、被験者は視覚刺激と触覚刺激のちょうど中間的な粗さのサンドペーパーであるかのように感じることを示した。Srinivassan ら⁽¹¹⁾は、視覚と触覚により物体のやわらかさを検出させると、視覚から得られた位置情報の方が体性感覚による位置情報よりも優位であることを示した。これらの結果は、視覚情報により触覚をある程度「だませる」ことを示唆している。触覚呈示の際には、視覚などの他の情報との適切な融合が有効であるといえよう。

なお、感覚統合の際には、触覚と聴覚は知覚時刻がほぼ一致しているのに対し、視覚は約 30ms 遅れる⁽¹²⁾ことにも留意する必要がある。

5. おわりに

本稿では、ヒトの触覚についての生理学的・力学的知見と、視覚や聴覚とのアナロジー・錯覚・感覚統合という視点（触点？）からの解説を試みた。もちろん本稿であげた例は数多く行われている研究のほんの一部分に過ぎないが、触覚の研究が生理学・バイオメカニクス・VR・感覚代行といった様々な分野で行われており、アナロジー・錯覚・感覚統合という視点に立てば実用的・工学的な触覚センシングと呈示の道がもうすぐ開けそうな黎明期にあることを感じていただけたなら幸いである。

文 献

- (1) ジェスパー・ホフマイヤー：生命記号論，青土社，1999。
- (2) 浅野，鈴木，尾股：“皮膚の力学的特性とその測定法”，日本バイオレオロジー学会誌，Vol. 6, No. 3, pp. 109-117, 1992。
- (3) 岩村：“ヒト触覚受容器の構造と特性”，日本ロボット学会誌，Vol. 2, No. 5, pp. 438-444, 1984。
- (4) 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，Vol. 18, No. 6, pp. 1001-1004, 2000。
- (5) 篠田：“選択刺激法による触感の呈示”，電気学会センサシステム応用研究会資料，SSA-97-2, pp. 7-12, 1997。
- (6) 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。
- (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。
- (8) 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。
- (9) J. R. Phillips, K. O. Johnson and S. S. Hsiao: “Spatial Pattern Representation and Transformation in Monkey Somatosensory Cortex”, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 85, pp. 1317-1321, 1988。

- (10) 大山他編: 新編感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房, 1994.
- (11) 和氣: “視覚の世界・触覚の世界”, 科学, Vol. 65, No. 6, pp. 378-388, 1995.
- (12) 伊福部: “生体工学を基礎とする人工現実感—感覚代行研究を例にとって—”, テレビジョン学会誌 Vol. 46, No. 6, pp. 718-726, 1992.
- (13) 伊福部: “材料知覚における皮膚表面の温度変化の役割”, 第 7 回生体・生理シンポジウム, pp. 97-100, 1992.
- (14) S. J. Lederman and S. G. Abott: “Texture Perception: Studies on Intersensory Organization using a Discrepancy Paradigm and Visual Versus Textual Psychophysics,” J. Experimental Psychology: Human Perception and Performance, Vol. 7, pp. 902-915, 1981.
- (15) M. A. Srinivassan et.al.: “The Impact of Visual Information on the Haptic Perception of Stiffness in Virtual Environments, Proc. ASME Dynamic System and Control Div., Vol. 58, pp. 555-559, 1996.

前 野 隆 司



1984 年 3 月東京工業大学卒業, 1986 年 3 月東京工業大学修士課程修了。キヤノン(株)勤務を経て, 1995 年慶応義塾大学機械工学科専任講師, 現在同大学助教授。博士(工学)。主としてアクチュエータ, センサ, ロボット, バーチャルリアリティーに関する研究に従事。