

「触る」ということ

—ヒトとロボットの触覚—

慶應義塾大学理工学部機械工学科

白土 寛和, 前野 隆司

1. はじめに

ヒトの触覚の役割は、大きく2つに分類できる。ひとつめは、任意の物体を滑り落とすことなく適切な把持力で把持するフィードバック制御のためのセンサ情報の取得である。ここでの情報は、ヒト指腹部表面の固着・滑り分布であると考えられる[1]。ふたつめは、「つるつる」「ざらざら」といった対象物表面の質感、「こり」「しこり」のような対象物の内部の弾性分布、対象物の弾性といった対象物の状態の知覚である。これらの情報の取得は、ヒトが様々な把持・操作・認知を行うために必要不可欠である。また、これらの原理や機構を明らかにすることは、ロボットやVR (Virtual Reality) などの人工物開発のためにも有用である。例えば、ロボットハンドにおいて、ロボットフィンガ・対象物間の局所的な滑り状態や静止摩擦係数をセンシングできれば、重量や摩擦係数が未知の物体の把持力制御が可能になる。また、実素材の材質感をヒトに仮想呈示することができれば、VRにおける操作感や臨場感の向上が可能になる。

以上のように、触覚の原理と機構を解明し利用

することは、理学的・工学的に有効である。そこで、本稿では、まず、ヒトの指腹部における皮膚と触覚受容器の構造と機能について概説した後に、筆者らが特に興味を持っている指紋の役割にスポットライトを当てる。さらに、前述した触覚の2つの役割のうち主なもの、すなわち、把持のためのセンシングと質感のセンシングについての最近の研究動向を述べる。

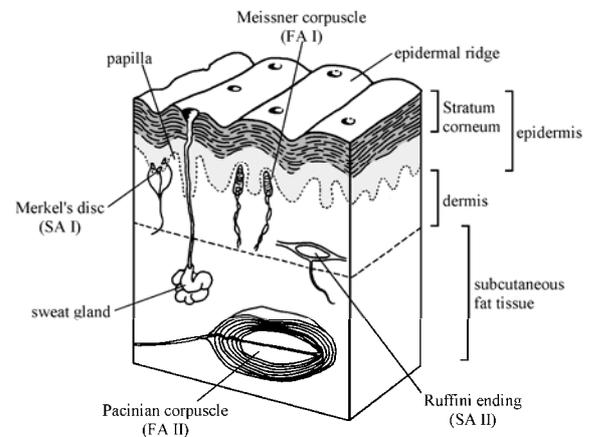


図1 指腹部組織と触覚受容器[2]

表1 触覚受容器の種類と大きさ[2]

name of receptors	type	receptive field	adaptation	size
Meissner corpuscle	FA I	small	fast	L=20-150 μ m, D=40-70 μ m
Merkel's discs	SA I	small	slow	D=7 μ m, T=1 μ m
Pacinian corpuscle	FA II (PC)	large	very fast	L=0.3-1.5mm, D=0.2-0.7mm
Ruffini endings	SA II	large	slow	L=0.5-2mm, D=0.2mm

(L:length, D:diameter, T:thickness)

2. 皮膚と触覚受容器の構造と機能

ヒトの皮膚は、大変形し対象物の形状に倣うことによって安定な物体把持を担う一方、接触した対象物表面の微細な材質の違いを知覚するための機能も担っている。このように、互いに独立した機能の両立が可能なのは、指腹部表面の指紋、皮膚組織の形状や材質特性、触覚受容器の配置箇所や幾何学的構造が進化により適切に設計されているからに他ならない。図1に皮膚構造と触覚受容器の配置を、表1に大きさと特性を示す。

図1に示したように、皮膚組織は表面から表皮(epidermis)、真皮(dermis)、皮下組織(subcutaneous fat tissue)と呼ばれる3層の粘弾性体から成る。表皮、真皮、皮下組織の縦弾性係数は、変位が十分に小さいとき、それぞれ約 $1.4 \times 10^5 \text{Pa}$ 、 $8.0 \times 10^4 \text{Pa}$ 、 $3.4 \times 10^4 \text{Pa}$ である[3]。すなわち、表面から順に剛性が低くなっていく。これらの粘弾性体の剛性は強い非線形性を有し、ヒステリシスによって最大で50%程度の差が生じる[4]。この材質構成によって、皮膚はエッジ形状に倣ったり、器用な作業を行ったりすることができるのである。

皮膚表面から約0.7mmの深さにある表皮と真皮の境界面は平面ではなく、真皮乳頭(papilla)と呼ばれる突起群によって凹凸面になっている。表皮から見て凹部にマイスナー小体(Meissner corpuscle)、凸部にメルケル小体(Merkel's discs)という呼ばれる触覚受容器が存在する。筆者らは、各受容器が配置されている箇所、この凹凸に起因する応力集中が生じることを有限要素法を用いて解明した[3]。また指腹部に対して垂直力と横ずれ力をそれぞれ与えた場合、凹部と凸部でひずみエネルギーの発生量が異なることを明らかにした。

また、真皮の深部にはパチニ小体(Pacinian corpuscle)とルフィニ終末(Ruffini endings)が存在する。これらはいずれも皮膚表面から2mm以上深部に存在する。

これら4種の触覚受容器は、応答特性および受容野の広さによって、FA/SA、I型/II型に分類される(表1)[5]。FAはfast adapting, SAはslowly

adaptingの略であり、それぞれ、応答の速い受容器、遅い受容器という意味である。FA、SAの後のI/IIはそれぞれ受容野が狭い/広いことを意味する。受容野とは、ある触覚受容ユニット(1本の神経線維につながった触覚受容器群)が刺激を検出できる皮膚の範囲のことである。皮膚表面の浅い箇所が存在するマイスナー小体とメルケル小体はタイプIに属し、受容野は明確である。一方、深部に存在するパチニ小体とルフィニ終末はタイプIIに属しており、受容野境界は不鮮明である。

各受容器は分類されたタイプに応じて固有の時間応答特性を持つ[6][7]。図2に、皮膚表面に振動刺激を与えた場合の振動検出閾値を模式的に示す。表2には、各受容器の機械刺激特性を示す[8]。振動検出閾値とは、加えた振動の振幅がそれ以上であれば触覚受容器がインパルスを発射できる、最小振動振幅である。図2より、メルケル小体は振動検出閾値がほぼ一定であることがわかる。一方、マイスナー小体は数10[Hz]で最高感

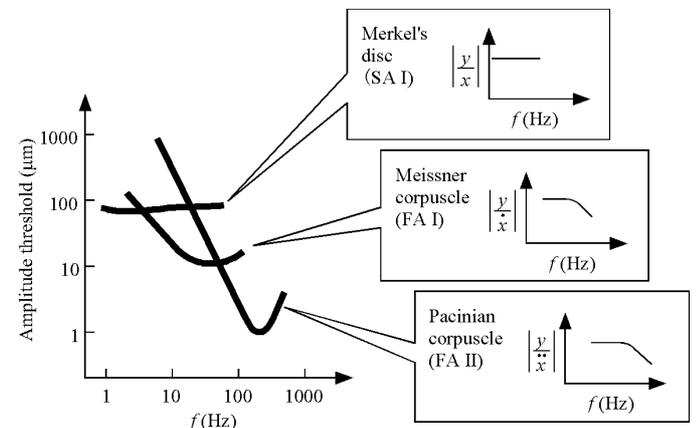


図2 触覚受容器の振動検出閾値曲線[2]

表2 各受容器と機械刺激入力の関係([8]を改変)

name of receptors	Response
Meissner corpuscle	Velocity
Merkel's discs	Displacement
Pacinian corpuscle	Acceleration
Ruffini endings	displacement or velocity

度に達し、それ以下の周波数では振動速度振幅の閾値がほぼ一定になる。(速度振幅は周波数と変位振幅の積と比例するため)。パチニ小体は200[Hz]付近で最高感度に達し、数100[Hz]以下の周波数において振動加速度振幅の閾値がほぼ一定になる。(加速度振幅は周波数の2乗と変位振幅の積に比例するため) [2].

次に触覚受容器の構造とその機能について解説する。各受容器の構造と空間的応答性の間に関係性があることが奈良らによって示唆されている[11][12]. 図3および図4にマイスナー小体および

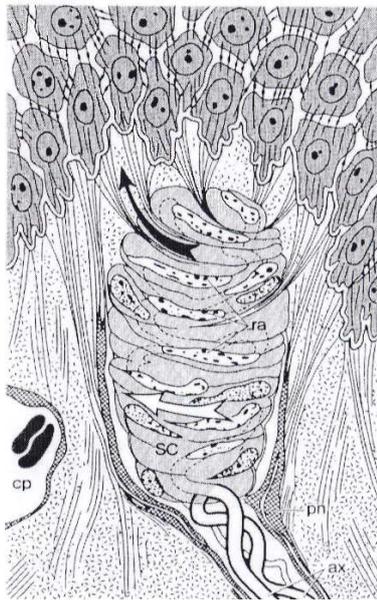


図3 マイスナー小体の構造([9]を改変)

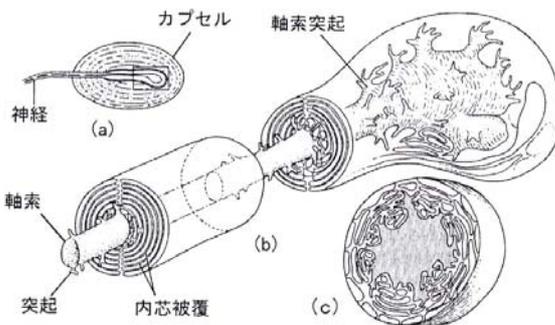


図4 パチニ小体の構造([10]を改変)

びパチニ小体の構造をそれぞれ示す。マイスナー小体は神経終末がらせん状に巻かれた楕円形をしている。らせん状構造は全体のせん断変形を神経線維の表面における伸縮変形に変換する。またせん断共振周波数は縦共振周波数の1/10程度の低い値である。マイスナー小体が100[Hz]以下の振動を検出していることを考慮すると、マイスナー小体はらせん構造をすることで皮膚中の横ずれ力を選択的に検出していると言える。パチニ小体の構造は棍棒状の内芯をラメラと呼ばれる同心円状薄いカプセルが20~70層にわたって取り囲んでいる。このラメラ構造は最低次振動モードの振動のみを中心部に伝えるため、単純変形の刺激のみを内芯に伝えるフィルターの働きをしていると考えられる。狭義のメルケル細胞と軸索終末の複合体であるメルケル小体や紡錘形のルフィニ終末については、その構造と機能の関係はまだ解明されていない。

以上のように、ヒトは、機能の分化された触覚受容器によって皮膚の様々な変形を検出している。検出された情報は、脊髄や脳で処理された後に、意識下・無意識下の様々な処理のために利用されていると考えられる。

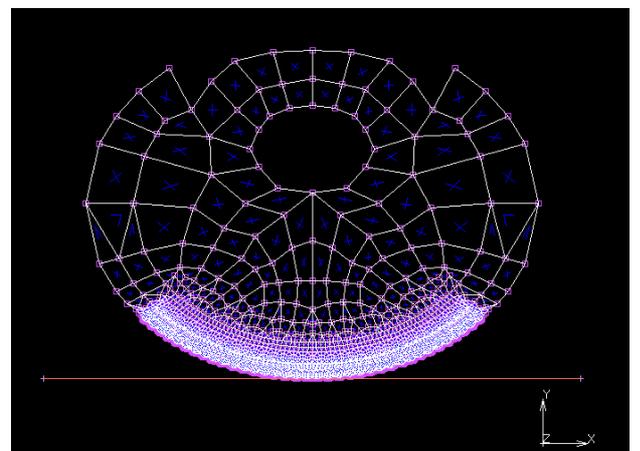


図5 ヒト指腹部の有限要素モデル

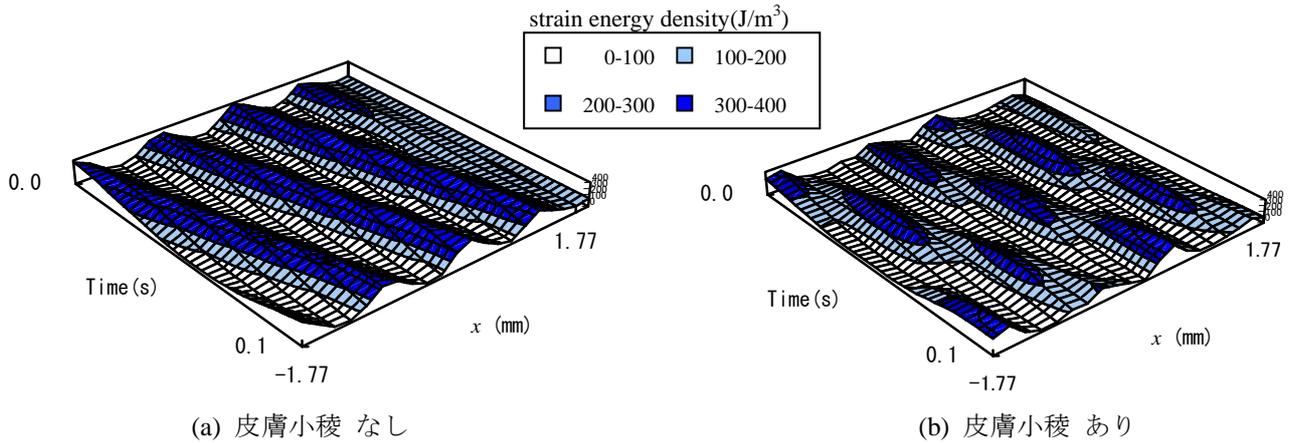


図6 マイスナー小体位置におけるひずみエネルギーの空間分布[13]

3. 指紋の役割

指紋 (epidermal ridge) は高さ約 0.1[mm], 幅約 0.3 ~0.5[mm], 断面が台形状の小稜であり, 凸部には汗口がある. また 1つの指紋の直下に 2列に並んでマイスナー小体が配置されている. このため, 指紋は触覚に深く関わっていると考えられる. ところが, 指紋に関する研究・開発を調査してみると, 紋様が個人唯一のものであることを利用したセキュリティシステムの個人識別や犯罪捜査に関するものと, 皮膚科における表皮の発達と病理に関するものが大半であり, 触覚・脳神経科学に関わる研究はほとんど見られない. このため, 筆者らは, 指紋が触覚受容機構に及ぼす影響についての研究を行った.

筆者らは, 凹凸面を有する物体と指の動的接触状態を有限要素法により解析した[13]. 有限要素モデルを図 5, 解析結果を図 6 に示す. 解析の結果, 指紋はマイスナー小体の受容感度を向上させていることがわかった. 図 6 に示したように, 指紋がある場合, マイスナー小体近傍のひずみエネルギーは時空間平面内において複数の極大値を持つ. これは対象面と指との接触面積が一定にはならず, 指紋の凸部と対象面の凸部が接触する際の接触力が大きくなり, 指紋直下に整然と配置されているマイスナー小体にその影響が及ぶからである. また, 凹凸面と指腹部との接触解析を行った結果, 波長の短い凹凸面に対するマイスナー

小体のひずみエネルギーの変化が大きかった. これより, マイスナー小体は細かい凹凸形状の検出に関与していることがわかった. 以上より, 指紋は表面凹凸の知覚のために重要な役割を果たしているといえる.

また, 指紋は, 物体の把持にも重要な役割を果たしている. Vaughan らはヒトの把持力制御においてマイスナー小体が重要な働きを担っていることを示した[14][15]. 特に, 物体を滑り落とす直前にマイスナー小体のインパルス発射頻度が増加することから, マイスナー小体は滑りの予兆を検出することを示している.

筆者らは, ヒトが指腹部で物体を把持する場合の指紋の役割について, 以下のような仮説を提唱している[16]. 図 7(a)のように, 指紋に対して法線力を加えた場合には, 指紋直下に 2列に配置されたマイスナー小体近傍において, ほぼ同じ大きさの圧縮変形が生じ, 応力の差はほぼ 0 である.

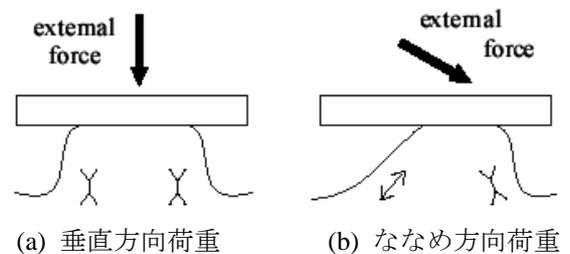


図7 荷重方向における指紋内部の変形[16]

一方、指紋に対し接線力も加わった場合には、指紋は図 7(b)のようにせん断変形し、2つのマイスナー小体近傍において引張と圧縮という異なる変形が生じ、応力差が生じる。ここでマイスナー小体が速度検出受容器であることを考慮すると、マイスナー小体は指紋のせん断変形の変化という動的な現象を検出していると考えられる。また、マイスナー小体は、受容野が狭く、指紋 1~2 本程度の範囲しか受容することができない。これらより、マイスナー小体は、指で物体を持ち上げる際に、接触面端部に局所すべりが生じた状態を、指紋のせん断変形が開放される現象によって検出しているのではないかと考えられる。この仮説はヒトの指紋に対しては検証されていないが、筆者らは、シリコンゴム製の指紋を有する人工皮膚を作成し、この仮説によれば、重量や摩擦係数が未知の物体の把持力制御が可能であることを示した（把持力の制御については次節で詳説する）。

なお、筆者らは指紋の 2 次元パターンの意味には言及していないが、指紋の紋様が指腹部の摩擦異方性に関与しているという報告もある[17][18]. 指紋は、身近でありながら、まだ未知の部分も多い身体器官であるということが出来る。

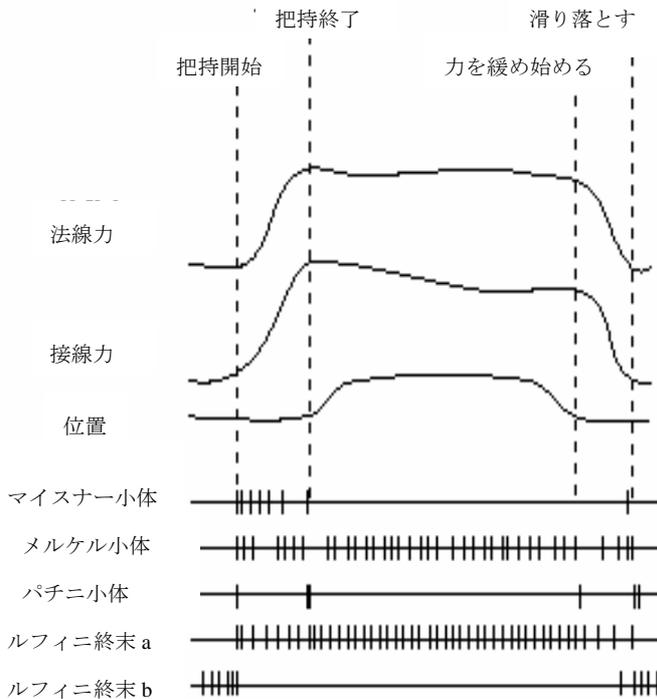


図 8 把持動作中の機械受容器応答([19]を改変)

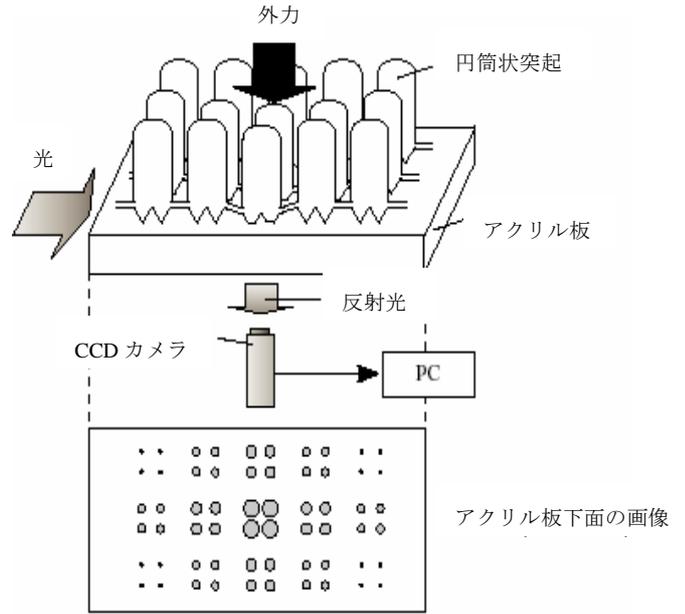


図 9 大岡らの 3 軸触覚センサ([21]を改変)

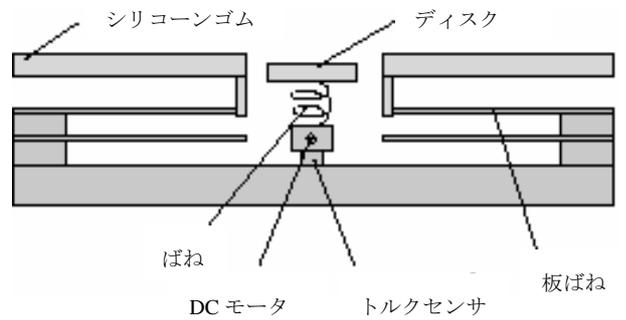


図 10 山田らの摩擦係数検出装置([22]を改変)

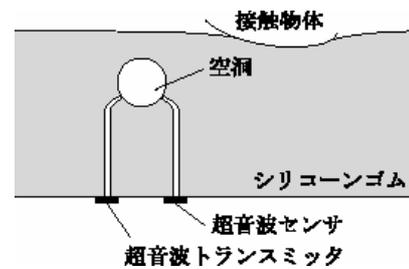


図 11 篠田らの摩擦係数センサ([24]を改変)

4. 把持のメカニズム

1章で述べたように、触覚が深く関与するのは、把持力の制御と、接触対象物の状態知覚である。本節では前者について述べる。

Johansson らはヒトが物体を把持した際および物体を滑り落とした際の各触覚受容器の応答を計測した[19]。図 8 にその結果を示す。マイスナー小体は、物体を把持し始めたときと滑り落とす直前で興奮していることがわかる。マイスナー小体は、FA I タイプであることから、把持し始めたときや滑り落としたときの微小な皮膚変形の変化を検出していると考えられる。すなわち、ヒトは、この初期局所滑りをマイスナー小体で検出し、この情報を用いて筋の出力をフィードバック制御することによって、未知物体を安定して把持することができると考えられる。

また、ロボットに触覚を持たせて把持力を制御する研究も盛んに行われている。今後、物体を自在にハンドリングする自律ロボットを実現するためには、自律的に任意の物体に対する把持力を制御できる能力が不可欠だからである。

筆者らは、Johansson の考え方を応用したロボット用の触覚センサの開発を行っている。まず、表面に曲率を持った弾性フィンガの内部に複数のひずみゲージを埋め込み、ひずみゲージの出力パターンからフィンガ表面の固着・滑り分布を推定することに基づく把持力制御法を提案した[20]。この方法は、従来の手法とは異なり、ヒトの把持力制御に学んだ手法であるため、物体を安定的に把持することができる。また、筆者らは、弾性フィンガ表面に指紋状の凹凸をも持たせた弾性ロボットフィンガも開発している。フィンガ内部にはマイスナー小体と同様、1つの小稜に2つずつ、ひずみゲージを配置した。製作したフィンガを用いて実験した結果、フィンガと把持物体間の初期局所滑りを検出することに成功した。今後はヒト指腹部サイズへの小型化や検出した初期局所滑り情報からの制御法を確立していくことで、ロボットが未知物体を安定して把持できると考えている[16]。

一方、把持力制御のために摩擦係数を検出するという手法も、ロボット用の触覚センサでは広く用いられている。

大岡らは図 9 に示すような分布力センサを開発した[21]。このセンサは、分布した円錐状突起部上面に加えられた法線力と接線力をそれぞれ独立に検出できる。したがって把持物体が滑り落ちる瞬間の各値を検出することによって、静止摩擦係数を検出することができる。構造は以下の通りである。1つの円錐状突起の裏面には4つの小型突起が配置されている。力が加えられると裏面の各突起がアクリル板に接触し、その接触面の大きさを CCD カメラで観察することによって、法線力と接線力を検出する。

山田らは、回転ディスクを用いた摩擦係数センサを製作するとともに実際にロボットハンドに搭載し、本センサを用いれば物体把持を実現できることを確認した[22]。図 10 に示すように、小型回転ディスクとトルクセンサをバネを介して接続している。これは装置を物体に十分押しつけた後、接触中央の小型ディスクを回転させ、押しつけ力と回転トルクから静止摩擦係数を検出する手法である。しかしディスク回転の際物体表面を傷つけてしまう問題がある。山田らはこの問題を解決するためにせん断力センサを開発している[23]。ただし、大岡らのセンサと同様、わずかな量だけ物体を滑り落とさなければ静止摩擦係数を検出することができないため、その際に物体を破損させてしまう可能性がある。

篠田らは図 11 に示すような弾性体内の空洞に超音波を入射し、その際の共鳴を利用して接触力を検出する装置を提案した[24]。この手法は法線方向の押し込みを与えるだけで静止摩擦係数を検出することができるため、物体を破損させることなく把持することができる。川村らは曲面状の弾性体を用いることによって、法線方向の押し込みのみによって静止摩擦係数を検出する手法を提案した[25]。

以上に述べたように、人の把持力制御に関しては Johansson らによる先駆的な研究が有名である。

一方、人工の触覚センサによる把持力制御や摩擦係数検出の研究は、ロボット工学の分野で近年盛んに行われている。ヒトと人工物についての研究が、ともに刺激を受けつつ発展して行くことを期待したい。

5. 質感検出メカニズム

対象物表面の質感、対象物の内部の弾性分布、対象物表面の弾性といった対象物の状態の知覚は、触覚の最も興味深い機能であるといえよう。これらを解明することは、対象物の表面状態を自律的に検出するロボット用の触覚センサや、遠隔地・バーチャル空間の対象物表面状態をヒトに呈示する触覚ディスプレイ開発のために重要である。本稿では、おもに「つつつ」「ざらざら」といった質感を例に、ヒトの質感知覚機構の研究状況と、触覚センサ・触覚ディスプレイの開発状況について説明する。

ヒトによる材質感知覚は、対象物の表面凹凸や粘弾性、熱伝導性といった物理量をそれぞれセンシングし、脳内で分析・統合することによって行われていると考えられる。ヒトは、センシングの際、「なぞる」という動的触察（アクティブタッチ）をすることによって、表面凹凸や硬軟、摩擦を、受動的な触運動である「押し付け」によって材質の冷温感を認知していると考えられる[26]。

また材質判別は表面温度が深く関与し、それに表面凹凸パターンや粘弾性が寄与しているという知見もある[27]。また、舘らは色の3原色をモデルにした触原色の存在を模索している。視覚の場合、RGBの波長別に反応する3種の錐体細胞の発火が組み合わせられることによって、ヒトは多様な色相を知覚する。触覚においても、各受容器別の反応が複合されることで多様な触感を知覚しているのではないかと考察している[28]。筆者らは、皮膚表面に対して接線方向振動刺激の振幅や周波数と粗さ感との関係を調べ、マイスナー小体が強く反応する刺激に対し粗さ感が増すことや視覚情報が粗さ感に大きく影響を与えることを明らかにした[29]。しかし、ヒトの「触感」につい

での研究は未だ黎明期にあり、学問体系としての確立のためにはさらなる研究が必要である。

一方、工学分野において、触感の検出システム（触覚センサ）と仮想呈示システム（触覚ディスプレイ）の開発が盛んに行われている。作成された様々な触覚ディスプレイを用いれば、ヒトの触感知覚特性を計測でき、計測された結果はヒトの「触感」解明のための重要なデータとなる。このため、これらの研究は、人工物開発という工学的側面と、ヒト触覚の解明という理学的側面の両面から有効な方法であると考えられる。本稿では現在開発されている触覚センサ・触覚ディスプレイの代表例を紹介する。

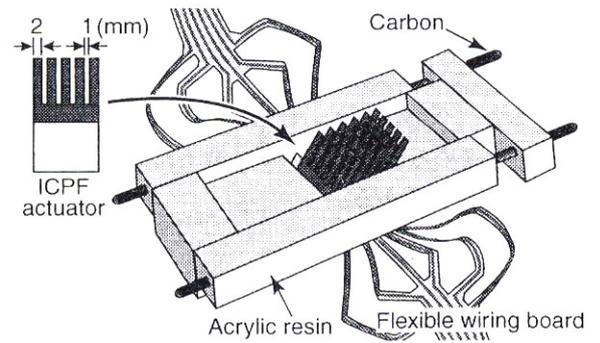


図12 昆陽らの触感ディスプレイ([32]を改変)

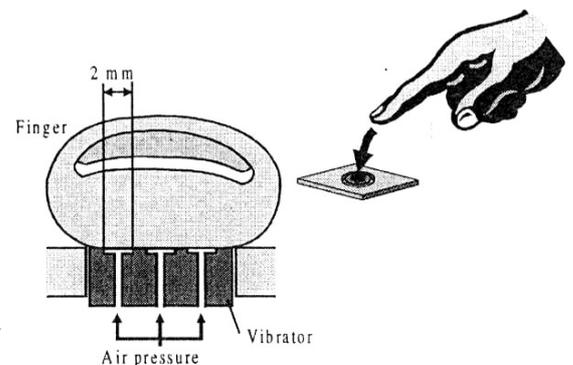


図13 浅村らの触感ディスプレイ([33]を改変)

触感センサを用いた材質判別の例として、坂口が製作した触運動動作と複数センサ情報を統合したシステムがある[30]。温度センサ、振動センサ、摩擦センサなどを搭載したセンサヘッドで対象物をなぞることによって、金属や木材、高分子材料や紙質などをほぼ判別できている。また、ヒトの触感計測の例として、田中らは PVDF フィルムを用いたセンサの出力電圧の平均値と分散値、パワースペクトルの分布比によって布地の触感評価を行っている[31]。一方、様々な原理のアクチュエータと機構に基づき、皮膚に材質刺激を呈示するための触感ディスプレイを製作する試みが行われている。

昆陽らは、柔軟性や高速応答性を備えた ICPF アクチュエータを用いた触感ディスプレイを提案した[32]。構造を図 12 に示す。2mm×5mm の ICPF アクチュエータを 45 度傾けて数十本配置し、高周波と低周波の合成波を用いて加振することによって、皮膚表面に対して垂直方向の振動刺激と水平方向の圧刺激を同時に与えることを可能にしている。この装置を用いた呈示実験では、被験者に単振動とは異なる触感を与えることができています。

浅村らは、図 13 に示すように穴の開いた振動子とその穴の中の空気圧を制御する機構によって、ブラシで軽く撫でられたような触感を呈示した[33]。素子の振動で表層・深層の両受容器を刺激し、空気圧で表層の受容器のみを選択的に刺激する方法である。池井らはピン駆動機構のディスプレイを製作した[34]。この装置は 2 次元に配列された 50 本の振動ピンの振幅を制御し、皮膚表面への圧刺激を変化させることによって材質感を呈示する方法である。

機械刺激ではなく電気刺激によって触感を呈示する方法も模索されている。梶本らは触原色の考えに基づき触覚受容器を個別に刺激する電気触覚ディスプレイを提案している[35]。受容器の配置深さと軸索方向に注目し、アレー電極で深度を選択的に刺激することによって受容器を個別に発火させる。この個別刺激の組み合わせによって

多様な触感を生み出そうという方法である。

以上の例の他にも様々なメカニズムを用いた触感ディスプレイが開発されている[36][37]。しかし、残念ながら、実素材の材質感をリアルに検出または惹起する装置の開発には至っていない。今後の研究課題としては、刺激方法の改良、新規アクチュエータの開発、粘弾性や熱伝導性の複合呈示や視覚情報との統合が挙げられる。ただし、なによりも急務なのは、ヒトの「触感」知覚機構を明らかにし、ヒトに何を呈示すればいいのかを明確化することであろう。なにしろ、触覚ではまだ、刺激の因子が視覚や聴覚のように明確化されていないのであるから。

6. おわりに

ヒトの触覚受容メカニズムについての最近の知見と、最近提案された触覚センサ・触覚ディスプレイについて概説した。今や全人類を滅ぼすことができるほど大きな力をもった最新の科学技術を持ってしても、ほんのヒトの指先の触覚受容メカニズムを超えられないのは、工学者としてなんと歯がゆい限りである。触覚の解明と人工的ハンドリングのためには、認知心理学、脳神経科学、ロボティクスなど、学際的な知見の結集が不可欠であることを痛感する。

「触る」ということ。それは、目に映るものだけでなく時に映らないものまでを、より深く知り、確かめ、解き明かすことであるといえよう。

参考文献

- [1] 広光, 前野: “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
- [2] 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.772-775, 2000
- [3] 前野, 小林, 山崎: “ヒト指腹部構造と触覚受容器位置と力学的関係”, 日本機械学会論文集, C 編, vol.63, no.607, pp. 881-888, 1997
- [4] 韓, 入口, 川村: “人間の手指の組織の剛性解析と人工指との比較”, 日本ロボット学会誌, vol.17, no.8,

- pp.1141-1148, 1999
- [5] 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.438-444，1948
- [6] W. H. Talbot, I. Darian-Smith, H. H. Kornhuber and V. B. Mountcastle：“The Sense of Flutter-Vibration: Comparison of the human Capability with Response Patterns of Mechanoreceptive Afferents from the Monkey Hand”，*J. Neurophysiology*, 31, pp. 301-335, 1968
- [7] A. W. Freeman and K. O. Johnson：“A Model Accounting for Effects of Vibratory Amplitude on Responses of Cutaneous Mechanoreceptors in Macaque Monkey”，*J. Physiol.*323, pp. 43-64, 1982.
- [8] R.S.J.et al.：“Tactile Afferent Signals in the Control of Precision Grip”，M.Jeanneod ed, *Attention and Performance*, vol.13, pp. 677-713, 1990
- [9] A.K.H and D.M.von：“Morphology of cutaneous receptors. In A.Iggo(Ed.)”，*Handbook of sensory physiology*, vol.2, pp.3-28, 1973
- [10] Spenser.P.S. and Schaumburg.H.H：“An ultrastructural study of the inner core of the Paccinian corpuscle”，*Jornal of Neurocytology*, vol.2, pp.217-235, 1973
- [11] 奈良，前田，安藤，館：“パチニ小体の連成共振系モデル層状ラメラ構造のモードフィルタリング機能”，第15回生体・生理シンポジウム論文集，pp.403-406，2000
- [12] 奈良，前田，安藤，館：“皮膚の直行変形量に関する考察—マイスナー小体，パチニ小体が検出する皮膚変形量について—”，第15回生体・生理シンポジウム論文集，pp.407-410，2000
- [13] 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3報，凹凸を有する面と指の接触解析)”，*日本機械学論文集*，C編，vol.65，no.636，pp.3321-3327，1999
- [14] V.G. Macefield, C.Hager-Ross, and R.S.Johansson：“Control of grip force during restraint of an object held between finger and thumb : responses of cutaneous afferents from the digits”，*Exp.Brain Researches*, vol.108, pp.155-171, 1996
- [15] V.G. Macefield and R.S.Johansson：“Control of grip force during restraint of an object held between finger and thumb : responses of muscle and joint afferents from the digits”，*Exp.Brain Researches*, vol.108, pp.172-184, 1996
- [16] 山田，前野，山田：“指紋状凹凸内部の分布触覚情報検出に基づく把持力制御用弾性フィンガの設計”，*日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集*，pp.1A1.C9(1)-1A1.C9(2)，2001
- [17] 嶋田，韓，川村：“人間の手指の摩擦特性の解析”，*計測自動制御学会論文集*，vol. 32, no. 12, pp. 1581-1587, 1995.
- [18] 笹田，井上：“手指の摩擦異方性に対する指紋の役割”，*日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集*，pp.391-392，2001
- [19] R.S.J.et al.：“Signals in Tactile Afferents from the Fingers Eliciting Adaptive Motor Responses during Precision Grip”，*Exp.Brain Res.*, vol.66, pp.141-154, 1987
- [20] 前野，広光，河合：“曲面状弾性フィンガの固着・滑り分布推定に基づく把持力の制御”，*日本ロボット学会誌*，vol.19，no.1，pp.91-99，2000
- [21] 大岡：“圧力分布とせん断力の同時計測を可能とする三軸触覚センサ”，*日本機械学会誌*，vol.104，no.991，pp.372-373，2001
- [22] 山田，土田，今井，香西：“把持力制御のための静摩擦係数センサ”，*電気学会論文集*，C編，vol.112，no.12，pp.743-748，1992
- [23] 山田，三田，藤田，土田，今井：“把持力制御のための静摩擦係数のアクティブ・センシング”，*計測自動制御学会論文集*，vol.30，no.10，pp.1188-1194，1994
- [24] H.Shinoda, K.Matsumoto and S.Ando：“Acoustic Resonant Tensor Cell for Tactile Sensing”，in *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3087-3092, 1997
- [25] 川村，前野：“曲面状弾性フィンガの内部ひずみを用いた摩擦係数検出法”，第2回日本機械学会機素潤滑設計部門講演論文集，pp.171-172，2002
- [26] 西松，長野，前田，上條，鳥羽，石沢：“能動的運動による材質判別評価について”，*感性工学研究論文集*，vol.1，no.1，pp.39-44，2001
- [27] 井野，清水，細江，高橋，泉，伊福部：“材質知覚

- における皮膚温度の温度変化の役割—触覚トレイグ
ジスタンスに関する基礎研究”，第7回生体・生理シ
ンポジウム，pp.97-100，1992
- [28] 舘：“バーチャルリアリティにおける触覚の役割”，
電気学会論文誌E，vol.122，no.10，pp.461-464，2002
- [29] N.Tatara, M.Mouri and T.Maeno：“Method for
Eliciting Tactile Sensation using Vibrating Stimuli in
Tangential Direction : Effect of Frequency, Amplitude and
Wavelength of Vibrating Stimuli on Roughness
Perception”，Proc. 33rd International Symposium on
Robotics, 055_p70, 2002
- [30] 坂口：“能動的感覚統合による触知覚認識システム”，
計測自動制御学会論文集，vol.31，no.8，pp.1217-1226，
1995
- [31] 田中，我妻，石丸，長南：“触覚感性計測（布の触
感計測）”，日本機械学会2000年度年次大会講演論文集，
pp.155-157，2000
- [32] 昆陽，田所，高森，小黒，徳田：“高分子ゲルアク
チュエータを用いた布の手触り感覚を呈示する触感
ディスプレイ”，日本バーチャルリアリティ学会論文
集，vol.6，no.4，pp.323-328，2001
- [33] 浅村，横山，篠田：“選択刺激素子による触感ディ
スプレイ”，第37回計測自動制御学会学術講演会予稿
集，no.2，pp.687-688，1998
- [34] 池井，山田，石塚，福田：“Texture Display2 の設計
と基礎的評価”，日本バーチャルリアリティ学会第5
回論文集，pp.247-250，2000
- [35] 梶本，川上，前田，舘：“皮膚感覚神経を選択的に
刺激する電気触覚ディスプレイ”，電子情報学会誌，
J84-D-II，no.1，pp.120-128，2001
- [36] 飛驒，石井，山本，樋口：“摩擦力制御を用いた触
感ディスプレイの研究”第14回「電磁力関連のダイ
ナミックス」シンポジウム，pp.155-158，2002
- [37] 奈良，高崎，前田，樋口，舘：“弾性表面波を用い
た触感ディスプレイ”，日本バーチャルリアリティ学
会第5回論文集，pp.303-306，2000