

触覚の多様性と人工触覚の難しさ

大日方五郎
名古屋産業科学研究所

Abstract

Although the most of the functions of the human upper body can be performed by robotic technologies which are already developed, the hand and finger functions cannot be achieved by artificial alternatives, particularly concerning the dexterous manipulation. One of the reasons is the lack of tactile sensors like the ones observed in the human fingertip. The purpose of this paper is to describe a vision-based tactile sensor, and evaluate it under several conditions of contact. The resolution performance of the developed vision-based sensor for measuring contact force and contact moment is shown based on preliminary experiments. Moreover, the results of these experiments show the potential of the proposed sensor for evaluating adhesive surfaces.

1. はじめに

触覚は五感のうち最も原始的な感覚と言われており、外界を感知する基本機能として生物の生存に不可欠である[1]。触覚という機能を実現している組織、器官は、さまざまなものが知られており、多様な物理刺激を接触することにより取得している。ヒトの触覚機能の検査では、筆やピン、指定した温度の水（お湯）を入れた試験管などを皮膚にあてる検査が行われ、接触の有無、接触圧力覚、温度覚、痛さ覚などが調べられる。閉眼で物体に触り、それが何かを推測させる検査も行われる。振動を感じる機能も触覚器官の役割であり、聴覚が捉える音波の振動を触覚も捉えていることが知られている。これは聴覚との協働により音楽会などでの臨場感を生み出すことに寄与している。一方、工学的な計測の視点から触覚を見ると、接触の有無、温度、圧力、振動、鋭度（シャープさ）などの異なる物理量に対応しており、人工物で触覚を創ろうとすれば、その多様性に直面することになる。圧力や温度などを計測することができるセンサは開発済みであ

り、複数のセンサを組み合わせて用いることにより、容易に触覚に対応する人工物センサを実現できるとの考えもあろう。しかし、ヒトにおいて触覚機能がどのようにその行動に寄与しているかという観点から考えると別な問題が生じる。触覚を活用するヒトの行動において、匠の技などで、触覚が重要であることは認識されているが、それはほとんどが暗黙知と呼ばれるもので、理論や定量化に基づく予測といった工学的な再現や人工物として実現することは難しい[2]。触覚情報を表す言葉は、その意味がはっきりしない割には、多様で豊かである。すなわち「オノマトペ」である。日本語は豊富なオノマトペを有するといわれており、触覚に関するものとして、「べとべと」、「ぬるぬる」、「すべすべ」、「がさがさ」など多くの例を挙げることができる。このように表現される触覚情報がどのように手、足の動作の制御に活用されているかは不明であり、単に定量化ができていないというだけではなく、これらのオノマトペを工学的に扱う方法が見当たらず、ここに焦点を当てた研究も少ない[3]。

ヒトの手が行っている作業をロボットで置き換えることを考える。対象物を見つけ、そこまで手を伸ばし、把持動作を開始して、接触を確認して、滑り落とさない把持力で持ち上げる。この簡単な動作をロボットで置き換えようとして、デジタルカメラ、多軸力覚センサと連携しているロボットマニピュレータを用意すれば容易に達成できると考えるのは早計である。ヒトは触覚によって、滑り落とさずかつ過大にならない把持力で対象物を把持して持ち上げることができる。ここでは、対象物と指先の間「滑りやすさ」を検出できる触覚の機能が役割を果たす[4], [5]。

本報告では、触覚にまつわる以下の二つの事項について説明し、触覚を人工物として実現しようとする際の難しさを明らかにする。

- ・触覚情報の多様さに対応した触覚センサの可能性
- ・触覚に関するオノマトペの定量化への挑戦

2章では、力学的特性と同時に温度を測定できる触覚センサについて、その構成と測定例を示す。3章では、触覚に関するオノマトペの研究を紹介し、その定量化の可能性について説明する。

2. 滑りやすさを含む力学的特性と温度を同時計測できる触覚センサ

2.1 触覚センサの構造

図1に触覚センサの構造を示す。このセンサの要素は、半球の形状を持つ樹脂製の接触部（以降タッチパッドと呼ぶ）、タッチパッド内面を観測するためのデジタルカメラ、タッチパッド内面を照らすLEDである。タッチパッドは弾性変形できるように樹脂製の材料が用いられている。また、タッチパッドのカメラ側には変形しにくい透明な樹脂製の平板が裏打ちされており、タッチパッドの変形がカメラ側に食い込むようなことは生じないようにしている。デジタルカメラはUSB UVCクラスのカメラを使用しており、ほとんどのPCへ特別なソフトを用意することなく接続可能であ

る。センサの外観を図2に示す。タッチパッドの表面膜は黒色をしており、遮光して外光の影響をなくしている。表面膜内面にはマーカを印字する。このマーカの移動をカメラで観測するため半球状タッチパッドに充填する樹脂材料は透明または半透明である必要がある。弾力のある膜またはドームに流体を充填する構造も可能である[6], [7]。

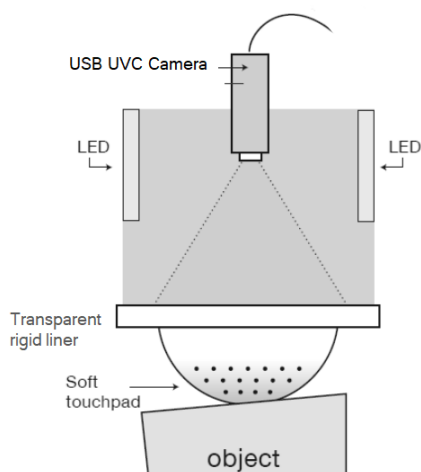


図1 センサの構造



図2 センサの外観

2.2 力と温度の同時測定

ヒトの触覚が柔らかな皮膚組織内に埋め込まれ、検出する情報が多様であることに対応して、センサが取得できる情報を多様化することを考える。前節で説明したセンサでは、デジタルのカラーカメラを検出のデバイスとしている。したがって、検出しようとする情報を色や模様に変換できれば、センサの構造に変更を加えることなく取得できる情報を増やすことができる。温度変化を色の変化に変換できる材料として示温ゴムが知られている。これは、温度変化に応じて色が変わる顔料を含んだゴムであり、本触覚センサのタッチパッドの表面膜として使用できる[8]。

触覚センサで力を計測する方法としては、タッチパッドの表面膜の内側に印字されたマーカの位置を検出して、それを作用している力に変換して推定する。マーカの変位とタッチパッドに作用した力の関係をあらかじめ把握できれば、PC内にその関係を入れ込んでおいて推定に使用することができる。変形した形状から作用力を推定する問題は、タッチパッドを構成する弾性体についての有限要素法、境界要素法における境界値を推定する逆問題となっており、適切化手法を適用しながらより一般的に解を求めることができる。しかし、この方法のすべてを数値計算法としてプログラムに埋め込むことには難しさを伴う。そこで、以下のような仮定を置いて力を計測する簡便な方法を適用する。

「対象物の表面の曲率がセンサ球面の曲率より十分に小さく、対象物との接触

がタッチパッド半球の頂点付近で生じる。」

この仮定が成立している場合、接触力が大きくなるに従い、その接触面積が増大し、接触力はタッチパッド表面の変形から推定できる。

2.3 色に基づく温度の推定

図3に温度変化による示温ゴムの色の変化の例を示す。これらの写真は、示温ゴムに黒色の小円形のマーカを印字したゴムを観察したもので、画像処理によるマーカ検出後にマーカを赤まるで囲み、緑色でマーカの番号を印字したものである。各写真の背景の色が温度により変化している。

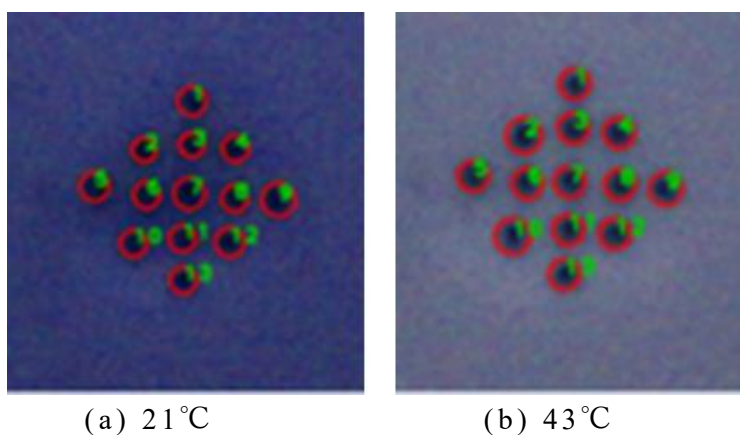


図3 示温ゴムの色変化とマーカの検出

重要な点として、背景色の変化があっても黒円のマーカの検出に成功していることである。この示温ゴムでは24°Cから40°Cの温度範囲の測定を狙

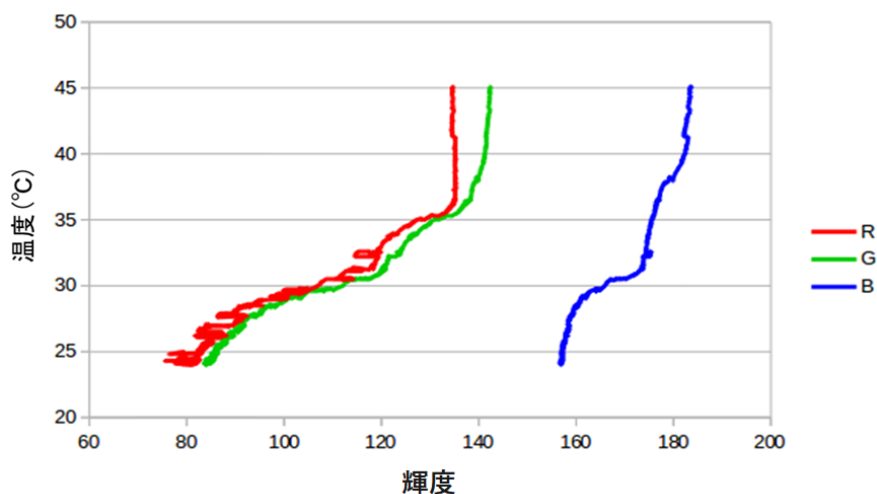


図4 示温ゴムの3原色輝度変化と温度との関係

ったもので、この温度範囲における色の変化をデジタルカメラで検出した RGB の原色の輝度で表わしたグラフを図 4 に示す。赤色 (R) 輝度の温度に対する変化が単調ではないことは興味深い、緑色 (G) と青色 (B) は温度に対して線形性はないが単調に変化しており、緑と青の輝度変化を観測すれば、温度の測定ができることが明らかになった。また緑と青では、緑の方が大きな感度を確保できることがわかる。黒色の小円マーカークの位置を画像処理によって把握できれば、その情報から接触力を推定できることは我々のグループが多くの論文で示してきたことである。したがって、背景色の変化で温度を推定し、マーカークの位置から接触力を同時に推定することが触覚センサの構造で実現できることがわかる。黒色マーカークの位置検出を力の推定に結びつけることについては 3.1 節で説明する。

3. 触覚におけるオノマトペ研究と触覚定量化の試み

3.1 触覚センサにおける力計測の方法

実用化を目指して作成したセンサのカメラ画像の例を図 5 に示す。(a)は

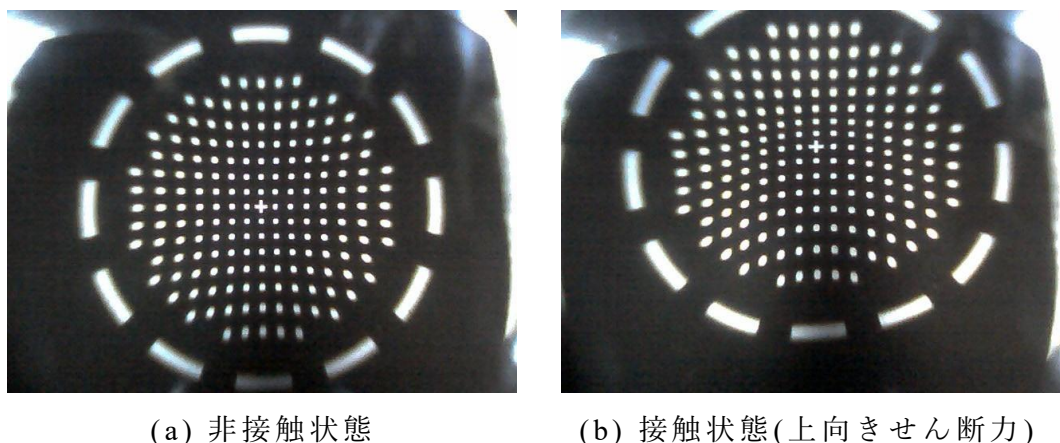


図 5 タッチパッド画像例

非接触状態であり、(b)は接触して、接触面に上向きのせん断力が作用した状態の画像である (使用したカメラの分解能は 640×480 ピクセル)。このように接触により生じるタッチパッドの変形をドットマーカークの 2 次元変位から推定できれば、作用した力の推定にそれを用いることができる。接触中心点周りのドット間の距離は、タッチパッドが対象面に押し付けられたときにカメラに近づくので、これをドットマーカークの中心点変位より検出すると押し付け方向の力を推定することができる。図 6 はそれを整理した例である。横軸は接触中心点周りの 10 個の線分の長さの増分であり、単位はカメラ画素の単位：ピクセルであり、縦軸は校正用の計測器より得た押し付け力 (単位は gf) である。これらの関係は非線形ではあるが単調で

あり、3次の多項式で近似できるのでその式も図中に示した。

接触面のせん断方向の力は接触点付近のマーカーの2次元変位から、力の大きさと方向を推定できる。同様に接触中心点周りの回転モーメントは、接触中心付近のマーカーとその周辺のマーカーの回転角度から推定できる。このようにして、タッチパッド内面に印字したマーカーの変位を検出することにより、接触力（3次元）と接触回転モーメントを推定することができる[4], [7], [9]。以上の推定は、センサのタッチパッドが対象面との間でマクロな滑りを起こさない場合である。滑りが起きている場合には、動摩擦や局所的な滑りやすさの違いなどの影響で接触面は複雑な挙動をすることになり、力の計測などは難しくなるが、その挙動はやはりタッチパッド内面の複数のドットマーカーの動的な変位により観測できる。本稿では、これ以上この点については触れないが、次節で述べる触り心地の解析では重要なポイントの一つである。

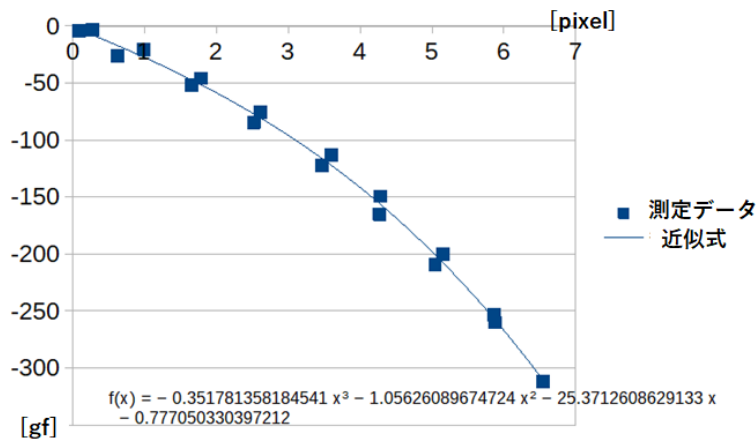


図7 押し付け力の推定例

3.2 触覚オノマトペによる触り心地の分類

本節では、「触り心地」の定量的な扱いを可能とする触覚オノマトペについての先行研究を紹介する。早川らは擬音語・擬態語の中から触覚にかかわる42語を選定し、これらのオノマトペに対し、表面を構成する凸凹についての大きさ感、指と対象物間の摩擦感、指と対象物間の粘性感という触覚の印象に関する3つの軸を設定し、それらに対して5段階の主観評価を行った。被験者20名に紙、布、ゴム、樹脂、皮など16種類の素材に触れてもらい、触感覚を評価してもらった実験を行った[3]。評価結果に主成分分析を適用して、第一主成分と第二主成分を求めてそれらを直交する軸として2次元マップ上にオノマトペの言葉をプロットした結果を図8に示す（見やすいようにプロットする言葉を減らして示した）。著者らはこの2次元マップ上には、以下の言葉で説明可能な3つの軸があるように解釈できると主張している。第一主成分である横軸は左から右に向けて「乾」から「湿」への軸、左下から右上への斜め軸は「硬」から「柔」への軸、左上から右

下への斜め軸は「粗」から「滑」への軸となっている。図中にこれらを示す漢字を記載している。しかしながら、「硬」から「柔」への軸は、力学的な剛性として定義できる量であり、左上から右下への「粗」から「滑」の軸は、幾何学的な滑らかさの定義（例えば、平均曲率や最大曲率など）を用いることができるように思われる。また、「乾」から「湿」への軸は、素材表面の保湿性で捉えることができる可能性がある[10]。このように考えてくると図8の重要性は、2次元の尺度でオノマトペの言葉を位置づけることができるという結果にあるのではないかと思われる。匠の技における触覚の役割が暗黙知としてしかとらえることができなさとされており、触覚にまつわるオノマトペだけでは匠の技を表現できないことを示している。ここで必要なことは定量化なのか、または触覚を表すための尺度が不足しているのかについては、さらに研究が必要に思われる。

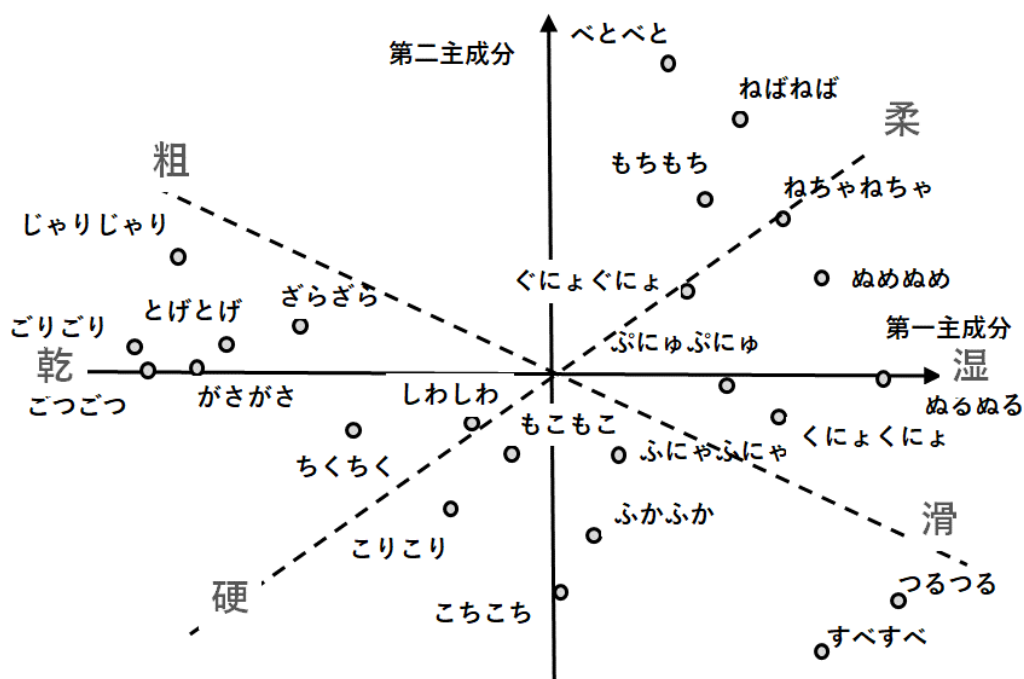


図8 触覚オノマトペ分布図（文献[1]より、一部省略改変）

3.3 触覚の定量化の可能性1（粘着性の定量化）

触覚の多様性に関して、前節では触り心地について述べた。前章では、温度と力の同時測定について述べた。前節の早川らの触り心地の評価に温度や熱の尺度が入っていなかったことについて、論文では「温度を連想可能な触覚オノマトペが限られていたため本分類手法では使用しなかった」との記述がある。しかし、「快・不快」や「良・不良」などが問題になる場合には、オノマトペにも「暖かさ」や「冷たさ」が関与してくることは明らかであり、対象物の温度や熱伝導率が尺度の候補となるが、ここでは温度や熱にかかわる尺度は除いて考えてみる。

触覚オノマトペから、力学的な剛性の尺度と幾何学的な滑らかさの尺度

が必要であることを述べたが、図1の構造のセンサでは、これに加えて「粘りけ（粘着性）」の評価が可能である。図9は評価の原理を示したものである。粘着性のある面にセンサのタッチパッドを押し付けて、まずその押し付けた力 F_i と接触面積 S_b を測定しておく（触覚センサだけで推定可能）、押し付けていた力を弱めていき、力 F がゼロになり、向きを変えて引っ張り力（引きはがす力）になるように変化させ、粘着している面積 S がゼロになるまで測定する。

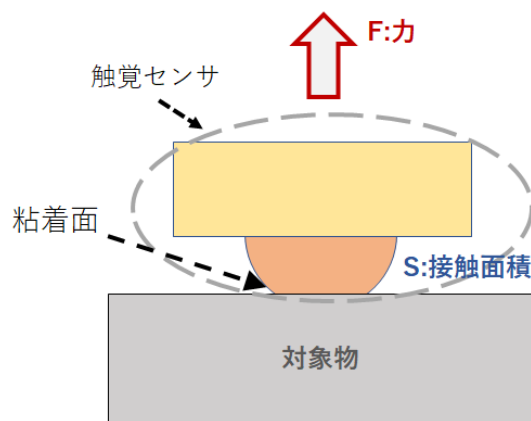


図9 粘着性の評価方法

その測定例を図10に示す。縦軸が接触面積で横軸が力である。また、この評価で使用した触覚センサの表面膜は合成ゴム SBR であった。図中には、初期押し付け力 F_i 、初期接触面積 S_b 、接触力がゼロになったときの接触面積、最大引きはがし力の時の接触面積 S_e 、完全にはがれる直前の引きはがし力 F_p をそれぞれの記号で示している。また赤の点線の矢印で過程が進行する方向を示している。

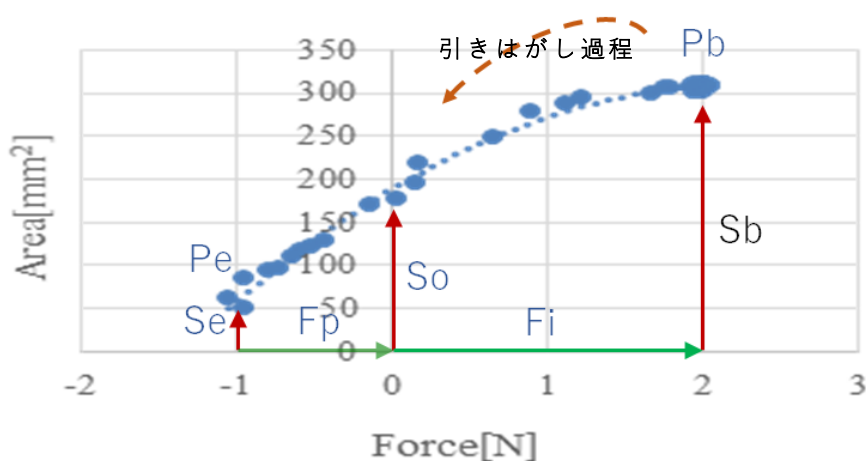


図10 粘着性評価のための引きはがし過程

この仮定を特徴づける量として、初期押し付け力に対するはがれる直前の

力 $|F_p/F_i|$ と初期接触面積に対する作用力がゼロとなったときの接触面積 $|S_o/S_b|$ を定義して粘着性の評価に用いる。これらの評価値を初期押し付け力の関数としてプロットしたものを示す。図1 1が吸着ゲル付きのポリウレタンに対する結果である。この図から作用力がゼロになっても初期接着

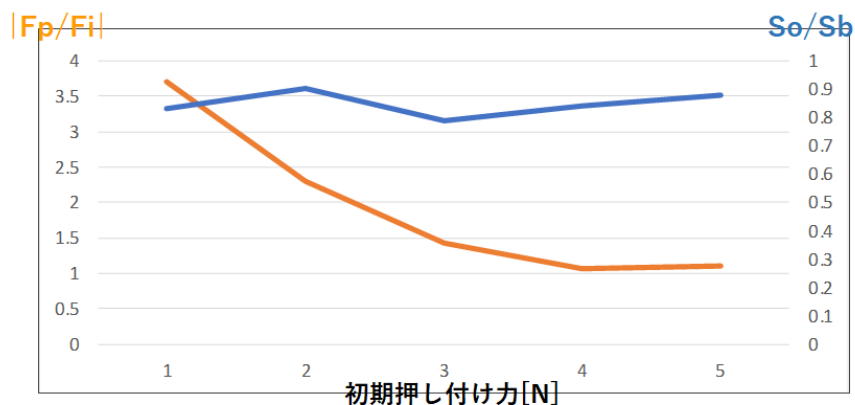


図 1 1 粘着性の評価（吸着ゲル付きポリウレタン）

面積の8割以上がまだ接着しており（図中青線で右縦軸尺度）、引きはがすためには初期押し付け力より強い力が必要（図中橙線で左縦軸尺度）であることがわかる。これに対し、図1 2はポリエチレンと無機吸着剤のついた合成ゴムが対象面であり、作用力がゼロになったときには接着面積が初期接着面積の5割以下になり（図中青線で右縦軸尺度）、初期押し付け力より小さな粘着力しかなく（図中橙線で左縦軸尺度）容易にはがれることがわかる。これらの図からの意味を把握すると粘着面の特徴づけができていくことがわかる[9]。

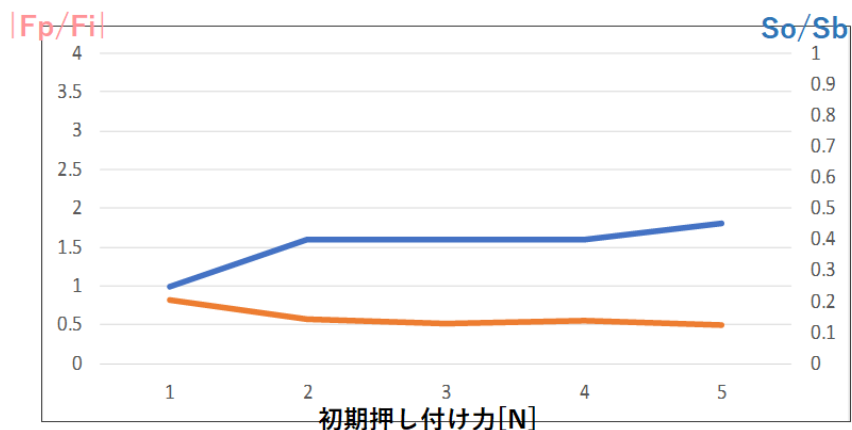


図 1 2 粘着性の評価（ポリエチレンと無機吸着剤のついた合成ゴム）

以上で説明した評価法は、触覚センサで力と接触面積が同時に測れることとタッチパッドが柔らかいため可能となった粘着面の評価法である。また、図8で示したオノマトペ地図では、その第一象限を定量的に表して

いるとも言えそうである。

3.4 触覚の定量化の可能性 2（剛性の定量化）

本センサのタッチパッドは、弾性変形するため力に対しばねのように動作する。その変形と反力の関係は線形ではないが、単調な関係であることは予想できる。したがって、ばね秤のように変位から力の推定を行うことができる。しかし、ここで考える問題は図 1 3 のようなものであるが、ばねと異なるのは、接触子の形状と対象物と接触子自身がともに弾性体であることである。接触子が剛体であり、被接触体が均一な弾性体である場合には、この 2 次元問題はうまく正規化の方法があり (Herzian Theory)、センサとして広い条件に対応した力推定法が存在する [11]。しかし、接触子も弾性体の場合には、双方の弾性率の違いによって互いの変形は大きく変化する可能性があり、有限要素法などを用いた数値計算法を適用する以外にはよい方法がないように思われる。しかし、対象物表面が接触前は平面であるなどの仮定を設けることができれば、センサである接触子の弾性はあらかじめ把握できるので、較正試験などによって測定が可能となるのではないかと考えている。

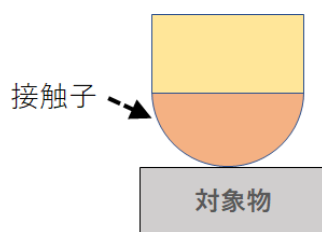


図 1 3 弾性体への接触と剛性の推定

3.5 保湿性評価の可能性

触覚オノマトペについての研究を紹介した 3.2 節では第一主成分の軸が「乾・湿」を表しているのではないかという解釈を紹介した。一方、化粧品の開発などでは、ヒトの皮膚の状態を評価するために「保湿性」ということが取り上げられ、その定量的な評価法などが提案されてきている [10]。この報告で取り上げているカメラの画像処理をベースにした触覚センサでは、この保湿性の定量評価も可能性があるが、これは今後の課題としたい。

4. おわりに

触覚が捉えている情報の多様性について説明した。また、柔らかな接触部の変形をカメラで捉える方式のセンサを用いて多様な触覚情報の一部を同時に捉える可能性について、具体的に示した。2 章では力と温度の同時計測が可能である触覚センサについて、その原理を与えた。これは、センサの表面膜に温度に応じて色を変える機能性膜を使用したものであった。他の触覚情報についても、センサの表面膜に他の機能性材料を用いること

によって、力学的な情報に加えて他の触覚情報を同時に計測・推定できる可能性がある。3章では、触感を表すオノマトペについての研究を紹介し、触覚の多様性を言葉で表現するアプローチがあることを紹介した。オノマトペ解析によれば、触覚が捉えている情報には「乾・湿」、「硬・柔」、「粗・滑」の3軸があるとの解釈があるが、このうち「粗・滑」を粘着性と捉えることができれば、それは接触面積と作用力の2次元で定量化が可能であることを3.3節で示した。また、「硬・柔」は材料の持つ剛性として捉えることができ、それを触覚センサで推定できる可能性があることを3.4節で説明した。最後に残った「乾・湿」については、ヒトの皮膚の評価に関する研究が行われるようになり、評価の定量化が議論されるようになり、この研究の進展に応じて定量化の可能性があるとに言及した。

謝辞 本研究の一部は科学技術振興機構 A-STEP 機能検証フェーズ（グラント番号:JPMJTM19YH）の援助で行われた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] Chun-Chun Cheng, ほか, 皮膚で触覚が生まれる仕組みの一端を解明, 理化学研究所 ホームページ: Home> 研究成果 (プレスリリース)> 研究成果 (プレスリリース) 2018.
- [2] 綿貫, VR 技術を用いたものづくり基盤技術・技能における暗黙知および身体値の獲得, 人工知能学会誌, 22-4, pp.480-490, 2007.
- [3] 早川, 松井, 渡邊, オノマトペを利用した触り心地の分類手法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 15-3, pp.487-490, 2010.
- [4] G. Obinata, N. Moriyama, Vision-based Tactile Sensor Using Transparent Elastic Fingertip for Dexterous Handling, 36th International Symposium on Robotics, Tokyo Japan, 2005.
- [5] Y. Ito, Y. Kim, G. Obinata, Robust Slippage Degree Estimation Based on Reference Update of Vision-Based Tactile Sensor, IEEE Sensors Journal, 11-9, pp.2037-2047, 2011.
- [6] Y. Ito, Y. Kim, C. Nagai, G. Obinata, Vision-Based Tactile Sensing and Shape Estimation Using a Fluid-Type Touchpad, IEEE Trans. Automation Science and Engineering, 7-2, pp.259-274, 2012.
- [7] G. Otsuka, G. Obinata, et.al, Design and Characterization of a Plug-in Device for Tactile Sensing, ICCINCO 2018, Porto Portuguese, 1, pp.488-493, 2018.
- [8] 武内, 示温材料の現状と将来, 色材, 51, pp.371-378, 1978.
- [9] Y. Ito, Y. Kim, G. Obinata, Acquisition of Contact Force and Slippage Using a Vision-Based Tactile Sensor with a Fluid-Type Touchpad for the Dexterous Handling of Robots, Advances in Robotics and Automation, 3-1, pp.1-9, 2014.

[10] N K Veijgen, E van der Heide, M A Masen, A multivariable model for predicting the frictional behaviour and hydration of the human skin, *Skin research and technology*, 19-3, pp.330-338, 2019.

[11] H. Kim, et.al, Estimating Deformed Surface Displacement from Contact Pressure Distribution, *IEEE Trans. Robotics*, 1-8, pp.99-106, 2017.