

人の触知覚とシステム応用

池田 篤 俊*

* 近畿大学 大阪府東大阪市小若江 3-4-1
 * KINDAI University, 3-4-1 Kowakae, Higashiosaka, Osaka, Japan
 * E-mail: ikeda@emat.kindai.ac.jp

キーワード：触覚 (haptic sense), 知覚 (perception), センシング (sensing).
 JL 0008/23/6208-0453 ©2023 SICE

1. はじめに

触覚は、人がもつ感覚として視覚・聴覚・味覚・嗅覚とともに五感としてよく知られており、われわれは古くから自らの感覚について思考を巡らせ、研究を積み重ねてきている。哲学者として知られるアリストテレスは「感覚と感覚運動について」(De Anima) という著作の中で、触覚を含む五感について詳細な考察を行っている^(注1)。著書の中で、視覚・聴覚・味覚・嗅覚に続く第5の感覚は皮膚に存在するとされており、“肉体的なものによって引き起こされ、掌や指のような身体部位を介して働く。このような触覚によって、物体の硬さや柔らかさ、滑らかさや粗さ、温かさや冷たさ、重さや軽さが知覚される。”と書かれている。一般的に使われる昔ながらの“触覚”とは、現在の生理学では体性感覚と呼ばれており、皮膚感覚（あるいは表在感覚）と深部感覚とをまとめたものとして扱われている（図1）^(注2)。これらは、刺激を受容する組織である受容器やその配置が異なっていることは当然ながら、神経情報の伝達経路や脳における情報処理部位も異なっていることが知られている^{1), 2)}。生理学や脳科学の発展に伴って、さまざまな触覚の機械的特性や認知特性が明らかになってきているが、一方で刺激の需要から情報処理までに関わる組織が多いことから、未解明な部分も多く残されているのが触覚研究の特徴であるといえる³⁾。

本稿は、人の触知覚について狭義の触覚を中心に、生理学的特徴からロボットにおける応用までを簡単に紹介する。生理学における狭義の触覚（以下、「触覚」）は、皮膚に与えられた比較的軽い力学的刺激に対する感覚を意

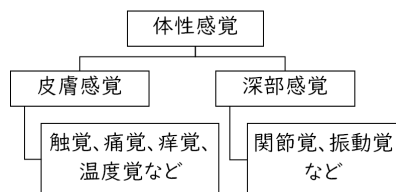


図1 体性感覚の分類と触覚の位置付け

(注1) 著書の中で“Haphe”という単語が用いられており、これが“haptic”という英単語の語源である。

(注2) 広義の触覚の定義では、内臓感覚を含むこともある。

味しており、工学的な研究においても同様の意味合いで使われることが多い。しかしながら、物体操作やテクスチャ情報の認識などの日常生活によく表われるタスクにおいては、触覚に加えてほかの皮膚感覚や深部感覚が少なからず影響を及ぼしており、完全に切り分けて議論することは困難であるといえる。触覚は全身に存在する感覚であるが、人の器用さに主に関わる指（無毛皮膚）を中心として触覚の特徴について整理し、関連研究を紹介する。

2. 皮膚の触覚受容器と体性感覚野

人の皮膚は、表皮・真皮・皮下組織の3層で構成されており、内部に配置されているさまざまな触覚受容器が受ける刺激の組み合わせによって皮膚感覚を得ている（図2）。指先には指紋と呼ばれる独特の凹凸（高さ約0.1mm、幅約0.3~0.5mm）が存在し、胎児のときに形成されたパターンは一生変わらない。触覚の知覚において重要となるのは、マイスナー小体（長さ約150μm、直径約40~70μm）、メルケル細胞（直径約7μm、厚さ約1μm）、ルフィニ終末（長さ約0.5~2mm、直径約0.2mm）、パチニ小体（長さ約0.5~1.5mm、直径約0.7mm）の4種類の触覚受容器である。これらの受容器は皮膚の変形刺激に対して異なる反応を示し、表1に示すように刺激に対する順応（なれ）の速い・遅いおよび範囲（以下、

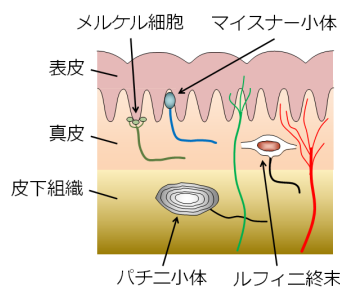


図2 触覚受容器の種類と配置

表1 触覚受容器の機械的特性による分類

		順応	
		速い	遅い
範囲	狭い	FAI マイスナー小体	SAI メルケル細胞
	広い	FAII パチニ小体	SAII ルフィニ終末

「受容野」の狭い・広いに違いがあることが報告されている⁴⁾。順応の速い受容器は刺激の変化のみに反応し、順応に遅い受容器は静的な刺激にも反応することが知られている。これら4種類の触覚受容器は、それぞれの受容器の特性に合わせて皮膚の変形刺激を最大限に受容することができる場所に配置されている⁵⁾。受容器の構造として明確な構造をもたない自由神経終末は、温度感覚や痛覚などを伝える役割をもっている。さらに体毛の根本部分には、自由神経終末に似た神経が絡みついており体毛部分を含めたセンサ構造となっている^(注3)。人を含む生物は、これらの構造を再生し続けることが可能であり、摩耗などによる劣化を回避することができる。皮膚や触覚受容器の再生は可能であるものの、加齢による触覚への影響は避けられないといえる⁶⁾。このような再生機能は有益であるが、ロボットなどの機械システムでは真似することが非常に難しい生物特有の機能である。触覚受容器の分布は、部位によって密度に違いがあることが明らかになっている。ドイツの生理学者であるWeberは、重さや圧の識別、刺激の定位、空間分解能である2点識別閾の部位ごとの違いについて、最初に報告した研究者である⁷⁾。その後、Weinsteinによって追試が行われており、Weberの発見が正しいことが示されている⁸⁾。これらの結果から、触覚の知覚において手先の感度はほかの部位の感度に比べて優れており、特に空間分解能が指において非常に優れている(ほかの部位の数倍は細かく識別することが可能)ことが明らかとなった。触覚における人の手指の優れた特性は、人の手指の掌側に多数の機械的受容ユニット(1つの神経とそれにつながる1つないしは複数の触覚受容器)が存在するという報告からも確認できる⁹⁾。前述のとおり、触覚受容器はそれぞれが非常に小さいため、指先などにおける高密度な実装を可能にしているといえる。現在の技術では、人と同程度の小型触覚センサを柔軟構造物に高密度に配置することは難しいが、人の構造を理解することで触覚センサ開発につながると期待される。

触覚受容器から得られた刺激は、後索路と呼ばれる伝導路を通り脳に送られ、体性感覚野にて情報処理が行われる。受容器から脳までは、刺激を伝える途中で1次から3次までのニューロンの交代があり、入力同士や脳からの興奮性あるいは抑制性の干渉が起こる。このような神経伝導路の仕組みは、触覚の錯覚や幻肢などに関係している。触覚に関する脳科学は、19世紀に発展し、感覚中枢と運動中枢に相互作用があることが発見され、触覚を始めとする体性感覚は随意運動の生成に影響を与えていることなどが明らかになっている。前述のように触覚受容器は全身に配置されており、ほかの感覚に比べても非常に多くの刺激が脳に送られるため、それだけの情報

(注3) 動物の洞毛(ヒゲ)はより多くの神経が繋がっている高感度センサである。

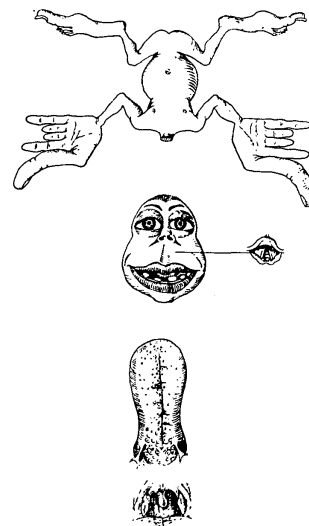


図3 PenfieldとBoldreyによって描かれたホムンクルス(文献10)より転載)

処理を行うための計算的リソース(脳の部位)が必要になる。Penfieldは、てんかん患者の脳手術時に電気刺激を用いた実験を行い、脳の部位と感覚および運動の関係を調べ、体部位再現地図として表わしている¹⁰⁾。図3に示すこの地図は、Penfield's homunculusと呼ばれており、人の実際の各部位の大きさとは異なる比率で描かれている。顔や手が大きく描かれており、特に唇や舌、指の部分が実際の部位に比べて大きく描かれており、脳の広いエリアが情報処理に使われていることを示している。手指から得られる膨大な触覚情報を利用してさまざまな物体を把持したり道具を操ったりを可能とする器用さの理解にはさまざまなアプローチが必要であるといえる。

3. 物体把持における触覚

物体把持は手指の基本的な機能の1つであり、触覚情報によるフィードバックや触覚を中心としたさまざまな感覚に基づく予測(把持戦略)が重要¹²⁾となる動作である。特に人は、拇指をほかの四指に対して対抗させたり平行させたりすることでさまざまな把持形態を実現することが可能である¹³⁾。本稿は、精密把持の1つである示指と拇指を対抗させて物体把持を行う「つまみ動作」を例として触覚の役割について紹介する。

つまみ動作の接触面に着目すると、指先は曲面形状をもっているため球状弾性体(指先)と剛体(把持対象物)の接触と見なすことができる。このような接触は、Hertzの理論¹⁴⁾に基づいて接触面の法線方向圧力分布を計算することが可能となる。Hertz理論によるモデリングは、実際の人の指と把持対象物との接触においても定性的に一致する結果が得られており、有用な方法であることが確認されている¹⁵⁾。法線方向の圧力分布は、接触面の中心部において大きく、周辺部に向かって減少する傾向を示す。接触面における摩擦係数が一定であると仮定すると、

法線力が小さい周辺部の摩擦円錐も小さくなるため、滑りやすい状況となる。よって物体をもち上げる際にかかるせん断方向の荷重によって、接触面の周辺部分から滑りが発生することとなる。このような局地的な滑りは初期滑り (Incipient slip, 図4) と呼ばれる。初期滑りは法線方向の圧力分布が一定でない場合、すなわち接触面が曲面の場合にどのような部位でも起こりうる現象である。筆者らは、円筒形の計測デバイスを作成して掌全体を用いた握力把持においても、指先と同様に各接触面において初期滑りが発生すること (図5) を報告している¹⁶⁾。

初期滑りは人の把持力制御においても重要であるとされており、Johansson らはつまみ動作による物体把持において人は初期滑りを知覚し、初期滑りを一定の状態に制御していることを報告している¹⁷⁾。触覚による初期滑りの知覚は、接触面の摩擦係数を推定していることと同じであると考えられることができる。よって、人の把持戦略とは、ある摩擦係数の接触面に対して負荷力がかかった場合に、摩擦円錐内で指と対象物が相対的に滑り始めないように一定の余裕を保つように把持力を制御することであるといえる。この把持戦略のメリットは、接触面の摩擦係数が未知であっても成り立つという点であり、ロ

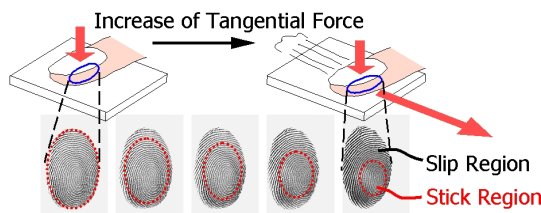


図4 示指の初期滑り状態における接触面変形の例

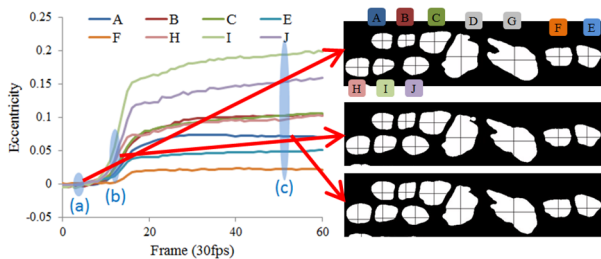


図5 掌全体を使った把持における初期滑り計測の例

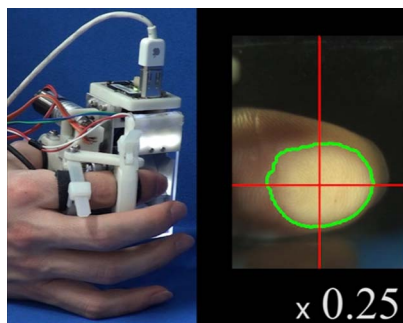


図6 重量・摩擦呈示デバイスの外観と接触面計測のようす

ットシステムにおける有用性も報告されている¹⁸⁾。

人が摩擦係数を初期滑りから推定していると仮定すると、初期滑りである皮膚変形を制御するデバイスを作成することで、摩擦係数の知覚を制御することが可能になると考えられる¹⁹⁾。栗田らは、示指と拇指に固定する重量・摩擦の呈示デバイス (図6) を作成し、モータによって指先に触れているプレート部を引っ張ることで実際のデバイスとは異なる重量と摩擦を提示している。事前に、複数の重量および摩擦係数の条件において接触面の変形をモデリングしておき、呈示デバイスをもち上げる際に動作に合わせて接触面が目標の変形状態となるようにモータを制御する。呈示デバイスを用いた被験者実験によって、使用者は重量と摩擦係数の違いを感じることが確認された。触覚への刺激のみが変化し、深部感覚への刺激が変化しない場合でも重量などの感覚が変化することは、小型の触覚デバイス開発に有用な知見であるといえる²⁰⁾。

4. 指腹部変形の計測とモデリング

触覚は外部からの力学的刺激による皮膚変形によって励起され、対象物との接触面における変形とその時間変化は把持力制御においても重要な役割を果たしていることを紹介した。接触面の変形は、カメラや静電容量センサなどを用いることで詳細な計測が可能である¹⁵⁾、²¹⁾。しかしながら、対象物にセンサを搭載する方法では対象物の素材や形状が限られてしまい、計測条件が限られてしまうという問題がある。そこで、指先側面の変形 (ひずみゲージ²²⁾、磁気センサ²³⁾、近接センサ²⁴⁾) や爪の状態 (近赤外線²⁵⁾、画像²⁶⁾) を計測し、接触面における力や滑りを推定する手法が提案されている。これらの計測手法の利点は、対象物に制約がなく接触面がセンサで覆われないため、自然な触動作を計測できる点である。指先側面の変形や爪の状態から接触力や滑りを推定するため、機械学習的アプローチ (重回帰モデルや NN モデルなど) や制御工学で利用されている伝達関数モデルを使う方法などが提案されている。

図7は、筆者らが開発した指先側面を計測するためのウェアラブルセンサデバイスである²⁷⁾。指先側面の変形計測は、物体との接触時に指の変形が最も顕著に表われ

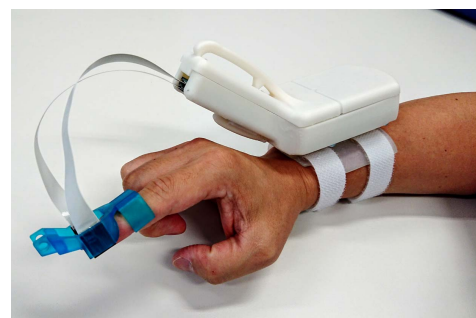


図7 MEMS センサを用いた指腹部変形計測デバイス

る (S/N 比が最も良くなる) 部位に配置された 2 つの MEMS6 軸力センサによって行われる。あらかじめ別のキャリブレーション装置を用いて、指先力および滑りと MEMS センサの出力との関係を伝達関数でモデリングしておくことで、指先力と滑りを推定することができる。伝達関数モデルの利点は、力学的な解析が可能である点であり、個人の指の機械特性を解明するための手がかりとなる。製造、医療、美容、芸術などの各分野における熟練者の技能解析やスキル獲得のためのラーニングシステムの構築などへの応用が期待できる。

5. おわりに

本稿は、触覚の定義と生理学的な特徴について整理し、それらが応用システムにどのように利用可能であるか、いくつかの研究例を示しながら解説を行った。本稿が、読者の触覚への興味を引き出し、応用技術の研究開発に取り組む研究者が増えるきっかけとなると幸いである。

(2023 年 6 月 14 日受付)

参考文献

- 1) A. Iggo: *Cutaneous Receptors*, 347/404 (1974)
- 2) P. B. C. Matthews: *Receptors in Muscles and Joints*, 421/453 (1974)
- 3) 岩村吉晃: タッチ, 神経心理学コレクション (2001)
- 4) R. S. Johansson and G. Westling: *Afferent Signals During Manipulative Tasks in Humans*, 25/48 (1991)
- 5) 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 C 編, **63**-607, 881/888 (1997)
- 6) A. Abdouni, M. Djaghloul, C. Thieulin, R. Vargiolu, C. Pailler-Mattei, and H. Zahouani: Biophysical Properties of the Human Finger for Touch Comprehension: Influences of Ageing and Gender, *Royal Society Open Science*, **4**-8, 170321 (2017)
- 7) M. Grunwald and M. John: *German pioneers of research into human haptic perception*, 15/39 (2008)
- 8) S. Weinstein: Intensive and Extensive Aspects of Tactile Sensitivity as a Function of Body Part, Sex and Laterality, *The skin senses*, 195/222 (1968)
- 9) R. S. Johansson and A. B. Vallbo: Tactile Sensibility in the Human Hand: Relative and Absolute Densities of Four Types of Mechanoreceptive Units in Glabrous Skin, *The Journal of Physiology*, **286**-1, 283/300 (1979)
- 10) W. Penfield and E. Boldrey: Somatic Motor and Sensory Representation in the Cerebral Cortex of Man as Studied by Electrical Stimulation, *Brain*, **60**-4, 389/443 (1937)
- 11) G. D. Schott: Penfield's Homunculus: A Note on Cerebral Cartography, *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, **56**-4, 329/333 (1993)
- 12) J. R. Flanagan, M. C. Bowman, and R. S. Johansson: Control Strategies in Object Manipulation Tasks, *Current Opinion in Neurobiology*, **16**-6, 650/659 (2006)
- 13) M. R. Cutkosky: On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **5**-3, 269/279 (1989)
- 14) (一社) 日本トライボロジー学会編: トライボロジーハンドブック (2001)
- 15) 多田, 柴田, 今井, 小笠原: 人の把持力制御メカニズム研究のための指先変形と把持/負荷力の同時計測装置の開発, 電子情報通

- 信学会論文誌 D, **84**-6, 1033/1044 (2001)
- 16) 池田, 武藤, 高松, 小笠原: 初期滑り分布計測に基づく把握動作の解析 (触覚と力覚 (2)), ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2012, 1A2/B02 (2012)
- 17) R. 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, *Experimental brain research*, **56**-3, 550/564 (1984)
- 18) J. Ueda, A. Ikeda, and T. Ogasawara: Grip-force Control of an Elastic Object by Vision-based Slip-margin Feedback during the Incipient Slip, *IEEE Transactions on Robotics*, **21**-6, 1139/1147 (2005)
- 19) 栗田, 米澤, 池田, 小笠原: 指先接触面の滑り量制御による重量・摩擦呈示デバイス, 日本ロボット学会誌, **30**-2, 205/212 (2012)
- 20) K. Minamizawa, S. Fukamachi, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi: Gravity Grabber: Wearable Haptic Display to Present Virtual Mass Sensation, In *ACM SIGGRAPH 2007 Emerging Technologies*, 8-es (2007)
- 21) Y. Kurita, A. Ikeda, J. Ueda, and T. Ogasawara: A Fingerprint Pointing Device Utilizing the Deformation of the Fingertip during the Incipient Slip, *IEEE Transactions on Robotics*, **21**-5, 801/811 (2005)
- 22) M. Nakatani, T. Kawasoe, K. Shiojima, K. Koketsu, S. Kinoshita, and J. Wada: Wearable Contact Force Sensor System Based on Fingerpad Deformation, In *2011 IEEE World Haptics Conference*, 323/328 (2011)
- 23) H. Kristanto, P. Sathe, A. Schmitz, T. P. Tomo, S. Somlor, and S. Sugano: A Wearable Three-Axis Tactile Sensor for Human Fingertips, *IEEE Robotics and Automation Letters*, **3**-4, 4313/4320 (2018)
- 24) A. Saito, W. Kuno, W. Kawai, N. Miyata, and Y. Sugiura: Estimation of Fingertip Contact Force by Measuring Skin Deformation and Posture with Photo-reflective Sensors, In *Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019*, 1/6 (2019)
- 25) S. A. Mascaro and H. H. Asada: Photoplethysmograph Fingernail Sensors for Measuring Finger Forces without Haptic Obstruction, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **17**-5, 698/708 (2001)
- 26) N. Fallahinia and S. A. Mascaro: The Effect of Contact Surface Curvature on The Accuracy of Fingernail Imaging for Tactile Force Measurement, In *2020 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, 760/766 (2020)
- 27) 池田, 齋藤, 李, 川副: 6 軸力/トルクセンサを用いた指腹部変形に基づく指先力計測, 第 19 回 SICE システムインテグレーション部会講演会, 1D2-12 (2018)

[著者紹介]

いけ だ まつ とし
池田 篤 俊 君 (正会員)



2004 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。2004~2007 年ヤマハ発動機 IM カンパニー勤務。2010 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。博士 (工学)。日本学術振興会特別研究員 (PD) を経て, 2011~2014 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教。2015 年近畿大学理工学部講師, 2023 年同准教授となり, 現在に至る。人の触覚計測とモデリングおよび運動計測とその応用システムについて研究を行う。