

(全6回)

触覚技術入門 ～触覚インタフェースの可能性～ 開講にあたって

編集幹事 加藤直人

VR (仮想現実) やAR (拡張現実) の普及に伴って、その差別化戦略として「触覚」が注目されています。エンタテインメントの展示会では、触覚の展示に長蛇の列をなしているのはよく見る光景ではないでしょうか。やはり、「触る」ということで、これまでにないリアルな体験が期待できます。

このような状況をうけ、会誌では「触覚技術」に関する講座を開始します。本講座では、触覚の認識メカニズムという基礎から、さまざまな応用技術に至るまで幅広い内容を解説します。解説はそれぞれの分野をリードされている専門家の皆様をお願いいたしました。ご多忙の中、ご執筆を引き受けていただきました皆様には、この場を借りて深く感謝申し上げます。

本講座が触覚技術理解の一助になればと思います。1年間の講座となりますが、なにとぞよろしくお願いいたします。

予定目次

(第1回) 触覚認識のメカニズム	半田拓也氏 (NHK), 篠田裕之氏 (東京大学)
(第2回) 触覚センサ	田中由浩氏 (名古屋工業大学)
(第3回) 触覚ディスプレイ	牧野泰才氏 (東京大学)
(第4回) 触覚技術のユーザインタフェースへの応用	佐藤克成氏 (奈良女子大学)
(第5回) メディアにおける触覚技術	高橋正樹氏 (NHK)
(第6回) 触覚技術の展望	半田拓也氏 (NHK), 篠田裕之氏 (東京大学)

触覚の認識メカニズム

正会員 半田拓也[†], 篠田裕之^{††}

1. まえがき

「〇〇を体感せよ!」というキャッチコピーが以前にも増して目や耳に飛び込んでくるようになった。すでに映画館やアミューズメントパークでは、最新技術による映像と音響に加え、揺れや風なども体感できるコンテンツやアトラクションが人気を得ている。また、次世代のメディアとして期待されるAR/VR(Augmented Reality/Virtual Reality)やユーザインタフェース(UI)の分野では、触覚技術のさらなる進展が注目されている。実際、2019年7月に東京で開催された触覚に関する最大の国際会議IEEE World Haptics Conference (WHC 2019)は、デモセッションも非常に充実しており大盛況であった。もちろん論文や動画で内容を把握することはできるが、特に触覚ディスプレイに関する研究成果の真価は、触って確かめたいところである。

現状の情報メディアでは、例えば、手触りの質感が非常に重要な商品を、テレビショッピングやネット通販で購入するのにリスクが伴う。慎重を期するなら見本帳やサンプルを先に取り寄せるのが賢明であろう。では将来、触覚技術が現在の視覚技術や聴覚技術と同等以上のクオリティになったらどうであろうか。あるいは、どのレベルに達すれば実用的だと言えるであろうか。

本稿は、講座「触覚技術入門」の第1回として、主に映像情報メディアに関する技術者・研究者を対象に、今後の触覚技術の可能性を考える上で必要と思われる基本的な触覚の認識メカニズムについて概要を説明する。

2. 触覚とは

視覚、聴覚、味覚、嗅覚、平衡感覚以外の、分化した特定の感覚器官をもたない感覚を体性感覚という(表1)。このうち、皮膚で感じる感覚を皮膚感覚、骨格筋、腱、関節で感じる感覚を深部感覚という¹⁾。皮膚感覚は、触れてい

表1 体性感覚の分類

体性感覚 触覚 (広義)	皮膚感覚	触覚 (狭義)
		温度感覚
		痛覚
	深部感覚 (固有感覚) (自己受容感覚)	位置感覚
		運動感覚
		力感覚

る対象の表面の粗さなどを知覚する狭義の触覚と、温度感覚、痛覚に分けられる。深部感覚は、固有感覚や自己受容感覚とも呼ばれ、自分の全身あるいは体の一部に関する位置の感覚、運動の感覚、力の感覚(抵抗や緊張)が含まれる²⁾。

皮膚感覚と深部感覚が一体となった運動をともなう知覚は、ハプティクス(触運動知覚)と呼ばれている。専門書では、皮膚感覚のことを触覚として狭義に扱う場合も多いが、研究分野としては、体性感覚での知覚を含めて広義の触覚またはハプティクスと呼んで広く扱う場合が多い。本稿では、特に断りのない限り、受動的な場合も含めて体性感覚による知覚を広く「触覚」と呼ぶことにする。また、一部の専門用語は、できるだけ誤解が生じないと思われる範囲で、平易な言葉に置き換えて説明する必要があることをご了承いただきたい。

3. 皮膚感覚

3.1 皮膚の機械受容器

図1は、ヒトの右手の模式図と各部の解剖学的な呼称の一部を示している。ヒトの手は、手首までを含めて21自由度の動きが可能であるとされる³⁾。図1に示した手のひら側は、足の裏などとともに無毛部とよばれており、全身の大部分を占める有毛部と比較して皮膚が厚く、指紋や掌紋がある。ここでは特に皮膚の無毛部の機械受容器について説明する。

図2は、ヒトの無毛部の皮膚の構造を示した模式図である⁴⁾。皮膚感覚の機械受容器は、表皮と真皮の境界から皮下組織にかけて分布しており、解剖学的には4種類が確認されている。最も表皮の近くに分布するマイスナー小体は、皮膚と対象物との間に「すべり」が生じたときによく発火することが知られている。メルケル細胞は、対象表面の凹凸、

† NHK 放送技術研究所

†† 東京大学

"Introduction to Haptic Technology: Exploring a methodology for human interface through the sense of touch (I): Haptic Recognition" by Takuya Handa (Science & Technology Research Laboratories, NHK, Tokyo) and Hiroyuki Shinoda (The University of Tokyo, Tokyo)

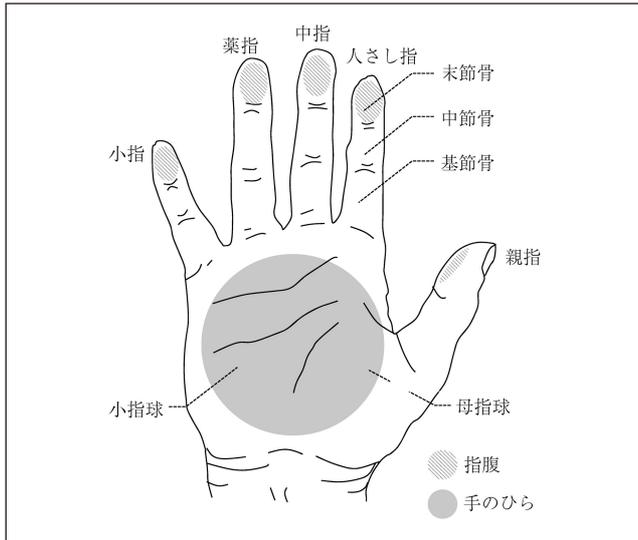


図1 ヒトの手の模式図と各部の呼称

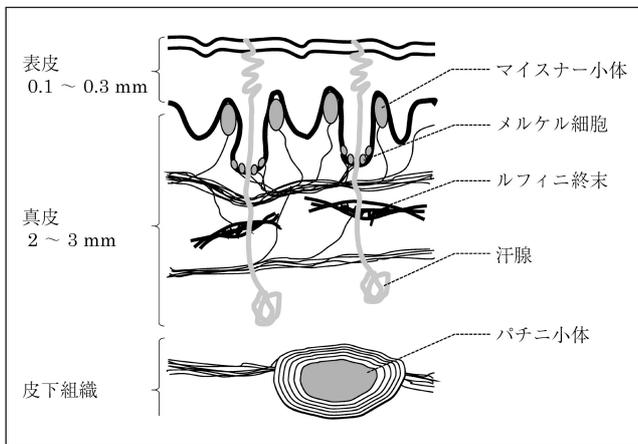


図2 ヒトの皮膚の構造(無毛部の断面図)(文献⁴⁾から引用)

エッジ、曲率、マクロなテクスチャなど、形状の知覚に関わるといわれている。ルフィニ終末は、皮膚のひっぱりによる剪断方向の伸びに反応すると考えられているが詳細はわかっていない。皮下組織にあるパチニ小体は、比較的高い周波数(200~500 Hz)の振動に反応することが知られており、メルケル細胞よりも細かいテクスチャを検出している⁵⁾⁶⁾。

ここで注目すべきは、皮膚の機械受容器が、皮膚表面に与えられる物理的な刺激を直接知覚するのではなく、あくまで皮膚の変形によって間接的に生じる機械的な刺激に対して反応するという点である。このことを端的に示す例として、一定口径以下の穴のあいた基板上に皮膚を接触させた状態で、穴を通して皮膚を吸引すると、あたかも棒状の物体で押されたかのような触覚が生じるという錯覚現象が報告されている⁷⁾。他にも、触覚ディスプレイの設計や触覚情報をメディアで扱う上で多くの示唆を与えるさまざまな触覚の錯覚が発見されている⁸⁾。

3.2 皮膚の受容野

機械受容器と連なる神経線維を一つの単位として機械受容ユニットと呼び、各受容ユニットに対応する皮膚の領域

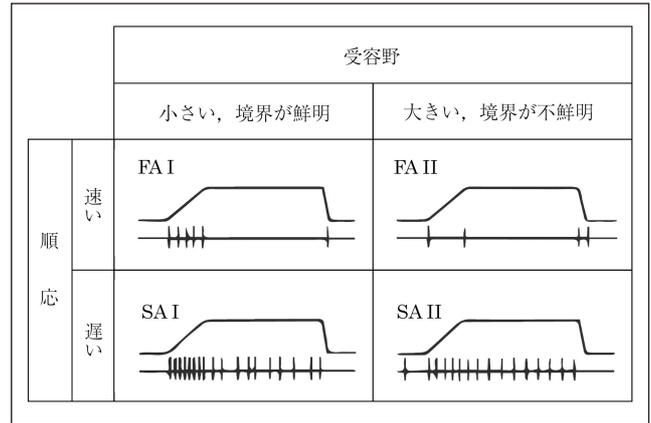


図3 機械受容ユニットの受容野の形態および神経発射特性による分類(文献⁴⁾を基に作成)

を受容野という¹⁾。つまり、皮膚のある受容野内に機械的な刺激を与えると、その機械受容ユニットの神経線維において神経発射が起きる。これまでに、受容野の形態(サイズ、境界の鮮明さ)と機械的刺激に対する神経発射の特性(順応の速さ)から、機械受容ユニットは4種に分類されている(図3)⁴⁾。

図3において、FA I(Fast Adapting type I)とSA I(Slowly Adapting type I)の受容野は直径数mm程度と小さく、境界が鮮明である。一方、FA IIとSA IIの受容野は比較的大きく、境界が不鮮明である。また、FA IとFA IIは刺激に対する順応が速く、刺激の変化にのみ応答するのに対し、SA IとSA IIは順応が遅く、刺激による皮膚の変形に対してはほぼ持続的に応答する¹⁾⁵⁾。図3には、台形波状に皮膚の押し込み変位を変化させた場合の、各受容ユニットの神経発射のパターンが示されており、これからFA Iは皮膚の押し込み速度に反応することがわかる。同様に、FA IIは押し込みの加速度成分に反応し、SA Iは皮膚変位そのものに加えて速度にも反応する²⁾⁵⁾。形態学的に同定されている3.1節で述べた4種の機械受容器と、各受容ユニットとの対応も明らかになってきており、FA Iがマイスナー小体、SA Iがメルケル細胞、FA IIがパチニ小体、SA IIがルフィニ終末とされている⁵⁾。

3.3 温度感覚、痛覚

温度感覚(温冷覚)は、ヒトの生存に大きく関わり、皮膚内部の温熱環境も含めて快感・不快感に影響する重要な感覚である。一般には、皮膚表面に与えた温度刺激に対する識別的な温感覚と冷感覚を意味する。温覚と冷覚は独立した感覚であることがわかっており、皮膚上において温覚または冷覚のみを生じる小領域が存在することに加えて、知覚する温度と順応の関係や、錯覚などの認知特性も明らかにされてきている⁵⁾。詳細は本講座の第4回で解説頂く予定であるので参照頂きたい。

痛覚は、やはりヒトが身を守るために欠かせない感覚であり、主に知覚に関わっているのは全身に分布する自由神経終末だと考えられている。痛覚を起こす刺激は組織を侵害する可能性があるため、関係する神経は侵害受容線維

(または侵害受容器)と呼ばれている⁵⁾。温度刺激によっても痛覚が生じることが知られており、皮膚侵害受容線維を生理学的に分類すると、機械的な侵害刺激に反応するもの(A δ 線維等)と、機械的な刺激に加えて化学的あるいは熱的な侵害刺激に反応するもの(C線維)があるとされている。興味深いことに、C線維は触覚刺激による心地よさにも関係することがわかってきており、触覚によるコミュニケーションにおいて重要な役割を果たしている可能性がある。

4. 深部感覚

深部感覚は、固有感覚や自己受容感覚とも呼ばれ、自分の全身あるいは体の一部に関する位置の感覚、運動の感覚、力の感覚(抵抗や緊張)が含まれる。図4に、ヒトの腕の内部構造の模式図を示す。ここでは文献²⁾⁵⁾に基づき、深部感覚に関係する骨格筋、腱、関節での知覚を中心に概要を説明する。

筋紡錘は、骨格筋の中に分布する一種の伸びセンサであり、筋の長さの変化の知覚に関係している。特に指などの細かい運動に関係する筋に多く存在する。ゴルジ腱器官は、骨格筋の両端の腱にある一種の張力センサであり、外力や筋自体の収縮で腱がひばられるときに反応する。筋紡錘とゴルジ腱器官は、いずれも振動刺激にも反応することが知られており、振動刺激を与えることで、関節の角度などを錯覚する現象が報告されている⁹⁾。関節受容器としては、関節をつつむ関節囊にルフィニ終末やパチニ小体が、靭帯にはゴルジ腱器官に似た器官が分布しており、関節の動きによって刺激される。その他、特に指の位置や動きの知覚に関しては、3章で述べた皮膚の機械受容器が少なからず関わっていることが知られている。

5. 触覚の認識

5.1 触覚による対象の物理特性の認識

ヒトは、接触対象の物理特性に応じた皮膚変形を、皮膚の構造と機械受容器の特性の絶妙な関係性によって知覚している⁶⁾¹⁰⁾¹¹⁾。ヒトが皮膚の機械変形から検出している情

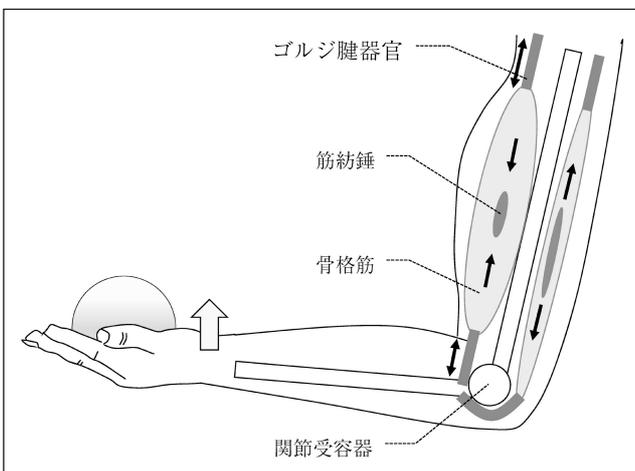


図4 ヒトの腕の内部構造の模式図

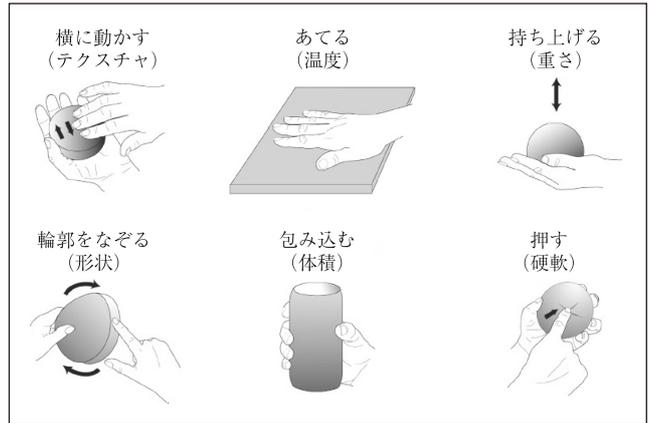


図5 対象の物理特性を知る際の代表的な触察行動(文献¹³⁾を基に作成)

報を言葉で列挙すると次のようになる。

- (1) 接触の場所、力とその方向
- (2) 面の曲率、面接触であるか線、点接触であるかの判別
- (3) 滑りと滑りの予知(滑りそうかどうか)、摩擦
- (4) 硬さ、柔らかさ
- (5) 粘性、粘着性
- (6) テクスチャ、布や毛布などの微細な構造
- (7) 皮膚変形の巨視的形状

文献¹²⁾では、これらの情報を完全にカバーする触覚センサとしての仕様(十分条件)が議論されており、ヒトの触覚は、応答特性の異なる複数の受容器と、皮膚の3次元構造を用いてこれらの情報を得ているものと考えられる。さらにヒトは、これらの触覚情報を得るために手を効果的に用いることが知られている。図5は、対象物体の物理的な特性を認識する際に、ヒトがする代表的な触察動作を示している¹³⁾。ぜひ手近な物を触って試してみたい。

5.2 触原色原理

JST(日本科学技術振興機構)のACCEL身体性メディアプロジェクト¹⁴⁾は、触覚を情報メディアで扱うための方法論として館らによる触原色原理を提案し、これに基づいたシステムを実装することで、触覚情報を取得、伝送/記録、提示できることを示した。この方法は、視覚における色情報の再現が物理空間のRGBを基底としているのと同じように、触覚においても接触対象の物理特性をすべて再現するのではなく、力(メルケル細胞・ルフィニ終末)、振動(マイスナー小体・パチニ小体)、温度(温覚・冷覚)を基底としてさまざまな触覚を再現することを目指している(図6)。触覚を扱う情報メディアを実現する上で実用的な考え方であり、テレイグジスタンス¹⁵⁾技術とあわせて5G(第5世代移動通信システム)の超低遅延を活用するアプリケーションとしても期待されている。

5.3 クロスモーダル知覚

クロスモーダル知覚とは、視覚、聴覚、味覚、嗅覚、平衡感覚、触覚(体性感覚)の感覚間の相互作用により、ある感覚が実際の入力とは異なって知覚される現象である。近年、特にAR/VR環境においてクロスモーダル知覚を活用

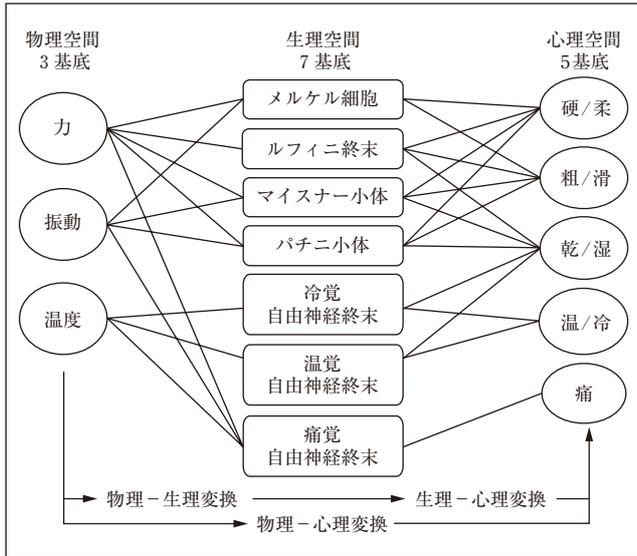


図6 館らによる触原色原理のモデル¹⁴⁾

した効果的な情報提示システム¹⁶⁾が多く提案がされており、注目されている。本稿で特に取り上げるべきは、視覚と触覚におけるクロスモーダル知覚であるが、その代表例とされているのがPseudo-haptics¹⁷⁾である。これは、文字通り擬似的に触覚を提示する手法であり、ユーザの身体動作を反映するポインタやアバターの視覚的な動きを実際の動きと適度に変えることで、ユーザに擬似的な触覚を知覚させることができる。特に深部感覚(位置感覚、運動感覚、力感覚)は、同時に提示される視覚情報による影響が大きいことが知られている。

6. むすび

講座「触覚技術入門」の第1回として、基本的なヒトの触覚の知覚と認識のメカニズムについて概要を紹介した。より専門的な内容や深い考察については専門書¹⁾⁵⁾等を参照頂きたい。一方、文献⁶⁾は「触感」を「触にまつわる主観的なクオリア」として触覚とはあえて区別して取り上げ、興味深い話題が親しみやすく書かれており参考になる。また、次回以降、触覚センサや触覚ディスプレイに関する研究開発の話題に関連し、触覚技術の可能性を考察するさまざまな観点からも、本稿では紹介できなかった認識メカニズムの新たな展開が議論されるであろう。

触覚情報は、視覚や聴覚に障害があるユーザへの感覚代行手段としても活用されてきた。これからのメディアに新たな可能性をもたらす触覚技術には、より多くの人を楽しめるユニバーサルなサービスの提供に貢献することも期待される。視覚を補う触覚情報という観点は、自動車を運転中の操作インタフェースや歩きスマホの問題などを、触覚技術で解決するアプローチにも有効であると考えられる。

最後に、本稿では詳しく取り上げなかったが、子供の成長過程におけるスキンシップの重要性など、触覚と心や感情には深いつながりがあると考えられている。冒頭で紹介した国際会議WHC 2019では、情動に直接働きかける触覚

をテーマとしたワークショップも開催された。さまざまなウェアラブルデバイスの普及により、日常生活において触覚刺激を提供することが可能になってきた今、よりエモーショナルな情報メディアが実現する可能性にも想像をめぐらしたい。

(2019年12月9日受付)

〔文 献〕

- 1) 下条誠, 前野隆司, 篠田裕之, 佐野明人編: “触覚認識メカニズムと応用技術-触覚センサ・触覚ディスプレイ”, S&T出版 (2014)
- 2) 東山篤規, 宮岡徹, 谷口俊治, 佐藤愛子: “触覚と痛み”, プレーン出版 (2000)
- 3) L.A. Jones and S.J. Lederman: "Human Hand Function", Oxford University Press (2006)
- 4) A.B. Vallbo and R.S. Johansson: "Properties of Cutaneous Mechanoreceptors in the Human Hand Related to Touch Sensation", Human Neurobiology, 3, pp.3-14 (1984)
- 5) 大山正, 今井省吾, 和気典二編: “新編感覚・知覚ハンドブック”, 誠信書房 (1994)
- 6) 仲谷正史, 寛康明, 白土寛和: “触感をつくる”, 岩波科学ライブラリー (2011)
- 7) Y. Makino, N. Asamura and H. Shinoda: "Multi Primitive Tactile Display Based on Suction Pressure Control", Proc. IEEE 12th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (Haptic Symposium 2004), pp.90-96 (2004)
- 8) 安藤英由樹, 渡邊淳司, 兩宮智浩, 前田太郎: “力触覚における錯覚とその応用”, 計測と制御, 47, pp.582-586 (2008)
- 9) J.R. Lackner: "Some proprioceptive influences on the perceptual representation of body shape and orientation", Brain, 111, 2, pp.281-297 (1988)
- 10) 篠田裕之: “器用な手の皮膚と触覚”, 日本ロボット学誌, 18, 6, pp.767-771 (2000)
- 11) 篠田裕之: “皮膚の力学的構造に隠れている知能”, システム制御情報学会誌, 46, 1, pp.28-34 (2002)
- 12) 篠田裕之: “人のように触れる”, 日本バーチャルリアリティ学誌, 12, 3, pp.150-155 (2007)
- 13) S.J. Lederman and R.L. Klatzky: "Hand movements: A window into haptic object recognition", Cognitive Psychology, 19, pp.342-368 (1987)
- 14) JST ACCEL触原色に立脚した身体性メディア技術の基盤構築と応用展開, https://www.jst.go.jp/kisoken/accel/research_project/ongoing/h26_05.html
- 15) S. Tachi: "Tele-existence (1) Design and Evaluation of a Visual Display with Sensation of Presence, Proc. of the 5th Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators (RomanSy 84)", 2451254, CISM-IToMM, Udine, Italy (1984)
- 16) 鳴海拓志: “Pseudo-haptics応用インタフェースの展望”, システム制御情報学誌, 61, 11, pp.462-468 (2017)
- 17) A. Lecuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard and P. Coiffet: "Pseudo-haptic feedback: Can isometric input devices simulate force feedback?", Proceedings IEEE Virtual Reality 2000 (2000)



半田 拓也 2001年, 電気通信大学大学院電子工学専攻修了。同年, NHK入局。岡山放送局を経て, 2005年より, 放送技術研究所。ユニバーサルサービス, 触覚インタフェース, AR/VRなどの研究に従事。正会員。



篠田 裕之 1988年, 東京大学工学部物理工学科卒業。1990年, 同大学院計数工学修士課程修了。同年, 同大学時助手。東京農工大学講師, 東京大学助教授を経て, 2012年より, 同大学教授。空中触覚提示を含むハプティクス, 2次元通信などの研究と教育に従事。博士(工学)。

触覚センサ

田中由浩[†]

1. まえがき

触覚は視聴覚ほどには情報化され利活用は進んでいない。視覚であれば三原色，聴覚であれば周波数，というように感覚の基底となる情報や方法論が充分に明らかにされていないからである。感覚の情報を可視化したり，編集や再生，伝送，ネットワークに組み込んだり，何かに利活用するためにはその情報を提示する技術もさることながら，情報を検出，デジタル化するセンサが必要になる。しかしながら，視覚のカメラ，聴覚のマイクのように，未だ標準的に人の触覚機能の代替となるようなセンサは開発されていない。本講座の第1回¹⁾において，広義の触覚は，視覚，聴覚，味覚，嗅覚，平衡感覚以外の，分化した特定の感覚器官をもたない感覚と紹介されているように，他の感覚器官はすべて頭部に集約され特定の場所にあるが，触覚は全身にかつ不均一にあり，その広さや情報処理の複雑さを考えると，まだまだ人の触覚機能の完全な代替は難しいかもしれない。しかし，人の触覚の知覚メカニズムの理解，ロボティクス，メカトロニクス，精密加工，情報処理の発展に伴い，多様な触覚センサが提案され，応用もされている。下条の調査²⁾によると，google scholarで「tactile sensor」を検索すると，論文や特許の数は年々増加し2000年頃から急速に伸びている（文献²⁾では，下条がスライドで触覚センサについて非常に丁寧にかつ整理されてまとめられているので，是非ご参照いただきたい）。

触覚は広義では，筋骨格，腱，関節で感じる身体の位置や力などの深部感覚も含むが，これらの計測については，モーションキャプチャや関節トルクセンサ，筋電センサなどが活用されている。一方，狭義の触覚である皮膚感覚は，皮膚表面で取得される力分布，振動，すべりなどに関わる感覚であり，さまざまな形態や活用が研究開発されている。本稿では，講座「触覚技術入門」の第2回として，皮膚感覚

を中心に触覚の情報取得に関する計測技術やその応用，人の知覚メカニズムにも少し触れながら，基本的な事項や最近の動向を概説する。

2. 触覚センサに求められる性能

私たちは皮膚を通して，接触力や位置，接触面積，力の分布，静止摩擦，動摩擦，局所すべり，振動，温度などさまざまな力学情報を取得している。ただし，これらの情報が直接私たちの触覚の感覚として意識に上るというよりは，これらの情報を元に，物体の操作や対象の識別がなされている。すなわち，触覚センサでも物理量を検出した後には何らかの信号処理が必要とされることが多い。本稿では特に，基となる力学情報を取得するための触覚センサに焦点を当てて概説を進めたい。

私たちの触覚センサを皮膚と捉えると，皮膚内部に分布する機械受容器はセンサ素子になる。機械受容器は全身の皮膚に分布し，私たちは全身で触覚を感じ取ることができるが，その感度は手指や唇は敏感であるが，背中や臀部は鈍く，機械受容器の分布，皮膚の力学特性も異なる。篠田は人と同等の性能を有する「完全な触覚センサ」に求められる十分条件を表1のようにまとめている³⁾。人の触覚の時空間特性や皮膚の力学的な観点からまとめられたものであり，十分条件ではあるものの，例えば，指先の触覚はこの仕様であり，人は大変優れた触覚センサを有し，同程度の性能を実現することは非常に難しい。

表1と関連して，触覚センサには実装上の課題がさまざま存在する。配置密度を高めようとすると，物理的には例えセンサの数を増やせたとしても各センサから信号を得る

表1 完全触覚センサの十分条件（文献³⁾を基に作成）

項目	内容
配置密度	表面でのサンプリング間隔が1 mm以下
空間分布	各計測点においての力の3次元ベクトルが計測可能
周波数応答	サンプリング周期が1 ms以下
ダイナミックレンジ	16bit以上（変位0.1 μm～数mm）
弾性特性	センサの弾性特性が皮膚と同等
摩擦特性	センサ表面の摩擦特性が皮膚と同等

[†]名古屋工業大学

"Introduction to Haptic Technology: Exploring a methodology for human interface through the sense of touch (2): Tactile Sensor and Applications" by Yoshihiro Tanaka (Nagoya Institute of Technology, Nagoya)

ための配線の数，自由曲面への配置の問題もある．電気的にはサンプリング周期，信号の計算コストの問題が生じる．また，高密度の実現のために小型化すると，ダイナミックレンジの問題が生じやすい（人の触覚のダイナミックレンジの広さに驚かされる）．さらに，触覚は対象との力学的相互作用に基づく感覚であり，基本的に接触を必要とする．したがって，度重なる接触，圧縮や引っ張り，擦れに対応する必要があり，柔軟性や伸縮性，耐摩耗性が求められる．

3. 触覚センサの原理

触覚センサの基本原理は，外部からの物理刺激により，(1) 何らかの弾性体（構造物含む）を変形させ，(2) その変形を電気信号に変換して，その外部刺激を計測するものである．(1)，(2)について多種多様な方法が提案されている．ヒトも皮膚に加えられた物理刺激により皮膚が変形し(1)，これを皮膚内部に分布する機械受容器が検知することで神経発火がおき(2)，感覚惹起につながっており，基本的には同様である．

3.1 触覚センサの変形部

単純な弾性体の圧縮を利用するものから，カンチレバーによる変異増幅や平行平板構造などで異方性を持たせて特定の方向の力に特化する，また材料を変更するなど，構造や材質の力学的な工夫によりさまざま存在する．人では皮膚および機械受容器が弾性体であり，例えば，指紋はすべりの検出や振動増強，特定の周波数の増強に寄与していたり⁴⁾，皮膚が力学的な空間フィルタの役割をしていたり⁵⁾など，人の皮膚の力学システムに学ぶことができる．なお，ヒステリシスや非線形性なども考慮すべきポイントである．

3.2 触覚センサの検出部

図1に触覚センサの変形部を検出する基本的な原理をいくつか示す．大きくは，図1(a)弾性体の変形を直接電気信号に変換するもの，図1(b)変形をさらに他の物理量で媒介しその物理量の変化を電気信号に変換する間接的な方法がある．

図1(a)は，歪みゲージや半導体（ピエゾ抵抗効果）⁶⁾，感圧導電性ゴム⁷⁾，接触抵抗（接触面積）⁸⁾，などの電気抵抗タイプ，誘電体の圧縮変形に基づく静電容量タイプ⁹⁾，圧電効果（応力による電荷発生）を利用するタイプ¹⁰⁾がある．これらはセンサを小型化や薄型化しやすく，感圧導電性ゴムや接触抵抗タイプ，静電容量タイプは大面積化もしやすい．

図1(b)は，光や音，磁場を用いる方法が提案されている．あえて媒介をさせるメリットはいくつかあるが，まず検出する変形部に電気配線を不要とする点がある．センサに柔軟性を与えやすい，取り替えを容易にできるなどの利点がある．各媒介の利用方法について以下に述べる．

光については，発光素子と受光素子を用いて弾性体内に光を加え弾性体の変形に伴う光量の変化を検出して外力を求める方法¹¹⁾や光導波路を弾性体につけ変形に伴う拡散光を

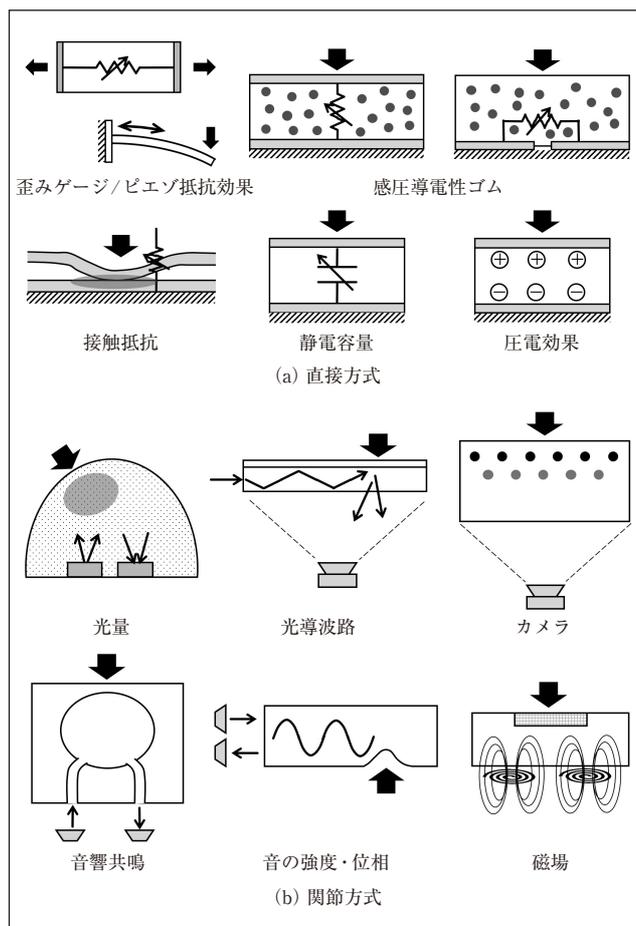


図1 触覚センサの変形の電気信号変換の基本原理

カメラで検出する方法¹²⁾，光源を必要としない方法では弾性体の変形をカメラで直接検出する方法¹³⁾が提案されている．特にカメラを用いる方法は，画像データとして一定領域の変形を一度に捉えることができることから，力の分布や方向を計測することができる点で優れている．GelForce¹³⁾では，透明ゲルの中に2層の点群マーカをつけてカメラで点群の移動を撮影することで，センサに加えられた力の分布と方向を求めることができる．欠点としては，カメラで撮影するため薄型化しにくい．

音も光と似ており，スピーカや超音波素子で音を弾性体内に用意した音響経路や空洞に加え，その変形から音の大きさや位相，共鳴周波数の変化をマイクなどで検出して外力や接触位置，多自由度の接触状態を求める^{14) 15)}．カメラのように多点検出は容易ではないが，音響経路をさまざまな形状に設計したり，遠く離れた面の外力を計測したり，設計の自由度が高い．

磁場については，磁性体を用いて弾性体内に磁場を作り，変形による磁場の変化を磁気センサで検出して力を求める方法である．複数点で磁場変化を検出することにより外力を3次元的に捉えることができる¹⁶⁾．薄型化は可能であるが，接触対象を含め環境に磁性体があると影響を受ける可

能性があり対応が必要である。

なお、光や音を用いる形式は、電気的安全性が求められる医療用センサに好適であり、内視鏡先端につけた弾性体の変形を内視鏡カメラでそのまま取得し外力を計測する方法¹⁷⁾や、長い鉗子の手元にマイクとスピーカを配置し鉗子内に音響経路を作り、鉗子先端の変形による音の変化から硬さ(接触面積と力の検出)を計測する方法¹⁸⁾など、さまざま提案されている。

4. 触覚センサの応用

私たちは触覚を通じて、繊細な物体操作を実現し、全身で接触を検知でき、対象の形状や材質を認識することができる。触覚センサの実装先には、ロボットやインタフェースがあり、応用目的は必ずしも一つではないが、触覚センサの研究開発事例として概ね人の触覚機能から三つに分類して特徴を議論できると考え、以下のような分類で研究動向や課題を述べる。

- (1) 物体の操作：指先の触覚センサ
- (2) 接触の検知：広い面積を覆う触覚センサ
- (3) 物体の識別：能動型触覚センサ

4.1 物体操作：指先の触覚センサ

私たちは物体を持つとき、指先あるいは手(時には腕も)を使い、適切に把持したり操作したりすることができる。このとき、触覚により多点の力のベクトル情報や局所滑りを検知し、対象を落とさない手指の姿勢制御や大きすぎず小さすぎない適切な把持力制御を行っている。したがって、例えばロボットアームが物体操作を行う際には、触覚センサは重要であり、物体操作するロボットアームの先のハンド、あるいは指先に触覚センサが実装される。

3軸の力センサが用いられるが、把持力調整には、全すべりを起こす前の局所すべりを検出する方法が有効である。そこで、小型化したセンサを表面に多数配置したり、3節で紹介した弾性体とカメラを用いたセンサを用いて力の3次元分布を計測する研究事例がある¹⁹⁾。さらに、局所すべりの検出に特化し感圧導電性ゴムの初期すべりにより発生する高周波信号を利用した研究事例²⁰⁾もある。なお、人の触覚とは離れるが、物体操作に有効な機能として、近接覚センサを指先に加える方法も提案されている。ロボットが物体を掴みに行く際に、物体と手指の間の様子はロボットに搭載された視覚用のカメラでは死角になるが、近接覚センサをロボットの手指につけることで、手指が物体に接触する少し前に物体との距離や形状を把握することができる。多点配置した触覚センサとフォトリフレクタを用いる方法²¹⁾やカメラを用いたセンサにおいて表面まで透明にしてカメラで力に加えて対象の画像も取得する方法²²⁾などが提案されている。

4.2 接触の検知：広い面積を覆う触覚センサ

いわゆる皮膚センサとして分類されるセンサである。特

に人とインタラクションを持つようなロボットや義手、人体への装着など伸縮性を必要とするインタフェースなどに応用が期待されている。皮膚センサには、薄さ、広い面積、自由曲面配置が求められる。上述したように、薄型化、大面積化は比較的多くの方法が考えられるが、これらと合わせて自由曲面配置の達成がやっかいな問題となる。対象の形状に合わせて、薄い触覚センサシートをツリー状などに切り取り貼り付ける方法²³⁾があるが、特に最近では、伸縮性に富む柔軟な触覚センサシートの研究開発が盛んである。検出原理は基本的には3節で述べた直接方式であるが、有機トランジスタ²⁴⁾、グラフェン²⁵⁾やカーボンナノチューブ²⁶⁾などの導電性材料を用いてシート状や伸びやすい構造にしたり、導電性繊維²⁷⁾を用いて布状にしたり、伸縮性をもたせている。これら新材料を用いた透明なセンサも提案されている。また、圧電材料溶液を表面にスプレーで塗布し、物体表面をセンサ化する研究事例もある²⁸⁾。なお、柔軟で伸縮性に富む皮膚センサは応用事例よりも、まだセンサ単体の開発事例が多く、今後の実装展開が期待される。

また、皮膚センサには、信号の取り扱い問題が残る。検出点が増えると、配線が増える問題、また高速サンプリングが維持できにくくなる問題が生じる。人の感度を考慮すると1ms以下のサンプリング周期が望ましく、安全性や制御の面からも空間分解能以上に重要な課題となる。多点の信号を得るためには、図2に示すように、図2(a)一つ一つのセンサ素子を読み取っていく方式、図2(b)マトリクス状にしてスキャンする方式、図2(c)モジュール化や無線方式、図2(d)センサシートの周囲に電極を多数配置し電

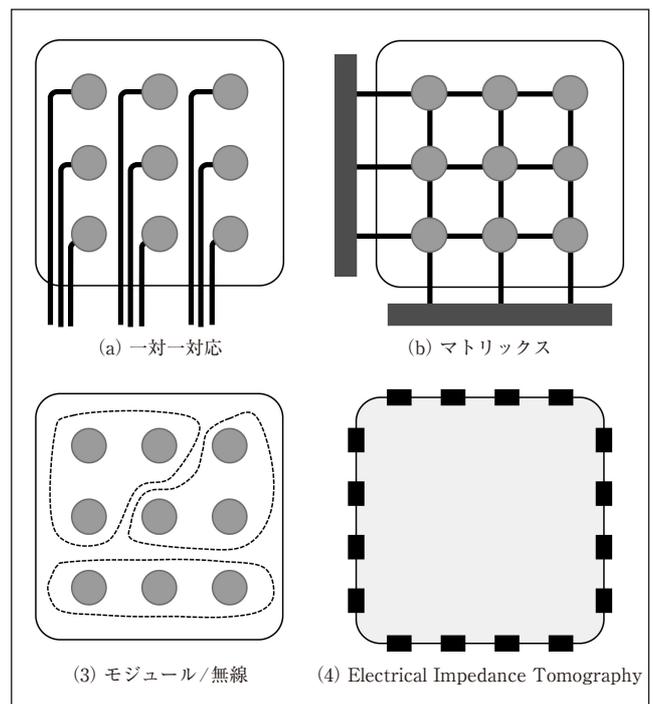


図2 複数センサ素子の取得方式

位分布 (Electrical Impedance Tomography) からシート状の圧力分布を求める方式²⁹⁾などがある。いずれにせよ、配線数、高速サンプリング、高空間分解能、そして低計算コストをすべて満たしていくことは難しく、用途に応じて検討が必要である。例えば、石川らは図2 (d) の方法でも、高速サンプリングと省配線を狙い、配線を感じ導電性ゴムシートに対し上下左右4本とし、荷重分布中心位置と総荷重の計測に特化したセンサを提案した³⁰⁾。星らは2枚の異なる硬さの発泡ウレタンを導電繊維3枚で挟み、静電容量の変化の違いを捉えることで、接触力と接触面積の計測を行う柔軟センサシートを提案した³¹⁾。

4.3 物体の識別：能動型触覚センサ

物体の識別を行うセンサはロボットアームの先端に取り付けられるなど、人と同様に能動的に使用される(センサ側ではなく対象側がステージで動かされるケースや、ハンドヘルド型やウェアラブル型など人がセンサを動かすケースもある)。人が触覚を通して行う物体の識別は多岐にわたる。岡本らは触覚的テクスチャの材質次元を解析した論文をサーベイし、摩擦、温度、硬さ、マクロな粗さとミクロな粗さの5次元にまとめられると報告している³²⁾。しかし、各々の知覚メカニズムは充分明らかではなく、対象の大きさや物理特性によっても変化することがあり、対象の識別を一つにまとめることは難しい。これは、私たちの触覚が一つのセンサではなく、身体に分布し、かつ触り方もさまざまであるためであると考えられる。対象を識別する触覚センサは識別・計測したい目的に応じて仕様は異なってくるだろう。

人のようにさまざまな対象を識別したいとなると、2節で述べたような極めてハイスペックな触覚センサが必要になる。高い空間分解能と力のベクトル検出、高周波の振動検出、さらには温度分布の計測も必要になる。識別結果の人との類似性を目指すのであれば、触覚センサの粘弾性や表面の摩擦特性、指紋などの人特有の皮膚構造も考慮する必要がある。4.1で紹介した多点の力検出センサに振動検出、温度検出を加えたようなセンサが必要になるであろう。指型センサBioTac³³⁾は導電性流体を満たし複数電極で力分布を読み取り、内部の圧力から振動を検出し、サーミスタにより温度変化も検出する。Haptic Scanner³⁴⁾は、3軸力センサと振動計測のためのマイクが内蔵され、表面に温度計測用にサーミスタが配置されている。振動については、特にパチニ小体が担当する高周波振動に対して、基本的に人の空間分解能が高くないため、複数のセンサ素子を高密度に配置する必要がなく、上記のいずれも一つの検出素子を用いている。このような指型のセンサがロボットアームの先端に取り付けられ、対象表面をなぞりセンサ信号から対象の識別が試みられている。また、触覚提示装置も必要になるが、取得した触覚情報を遠隔地に伝送する目的でも応用が期待されている。

なお対象の識別の際には、機械学習が使用されることが多い。近年の深層学習の発展に見られる性能の向上、取得される触覚データも時空間的に多いため、機械学習の活用が多いと推察される。4.1の物体操作においても、すべり検出や動作戦略のために機械学習が用いられている事例もある。また、視覚情報や他の情報とも統合してより複雑かつ大量のデータを扱ってロバスト性を上げられる可能性もある。

特定の対象情報の計測を目指す触覚センサもさまざま提案されている。特に硬さについては、医療福祉分野を対象として多くのセンサが提案されている。押し込み変位と力を計測するタイプもあるが、より皮膚感覚に即したセンサでは、硬さの異なる二つの弾性体を押し付けた時の相対的な力の差³⁵⁾や、応力分布から硬さを求めるものが提案されている。そのほかには、しっとりなどの人の感覚の計測を目指すセンサとして、人に類似した指紋を有する弾性体で対象表面をなぞり摩擦を計測するものがある³⁶⁾。これらは、対象情報が定まっていることから、必要と考えられる物理情報に特化したセンサを特に構造を工夫して設計している。

対象の識別は、人に似た性能を有する触覚センサとその情報をどのように解析するか信号処理の部分、さらには、触動作をどのように行うか、人の知覚メカニズムの解明と並行して研究開発が待たれるところである。

5. 力学的インタラクションを阻害しない触覚センサ

4節ではロボットあるいはインタフェースなどの物体に触覚センサを実装する方法を中心に解説をしてきたが、対象との力学的インタラクションを阻害しない触覚センサも提案されている。触覚は対象と皮膚との力学的相互作用に基づく感覚であり、その界面を変えずに情報を取得することは難しい。例えば、グローブタイプの触覚センサを開発したとしても、対象に触れるのは人の皮膚ではなく、グローブ表面になり摩擦も粘弾性も変わってくる。さらに人は感覚に基づく運動制御を行っており、自然な触覚を失ってしまえば、自然な運動も損なってしまう。

このような課題に対して、対象と人の皮膚との直接の接触に干渉せず、触覚情報を検出するセンサがいくつか開発されている。図3に原理を図示する。指先の押し付け力の計測では、押し付け力によって起こる爪の色の変化を検出する方法³⁷⁾や、指腹部の圧縮に応じて生じる指腹部の膨ら

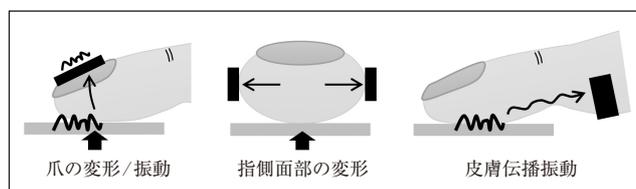


図3 指先の力学的インタラクションを阻害しない触覚センサ原理図

みを検出する方法³⁸⁾がある。振動の計測では、圧電素子を爪の上に置いて対象を触ったりなぞったりした際に爪で生じる振動を検出する方法³⁹⁾や、加速度センサや圧電素子を指先ではなく第2指腹部につけ、皮膚を伝播した振動を検出する方法がある⁴⁰⁾。爪の振動計測では、機械学習を用いて人の動作識別を行っている³⁹⁾。皮膚伝播振動は、指先の触覚との関連性も報告されており、センサ出力には、対象の情報に加え人の皮膚特性や運動が反映される。

触覚は皮膚を介して得られており、触覚は身体に依存する極めて主観的な情報である。対象が同じでも皮膚特性や運動によって対象との力学的インタラクションは異なり、皮膚上で生じる機械刺激は個々人で異なる。筆者はこのような主観的な触覚を情報化し、共有や活用する研究に取り組んでいる。皮膚伝播振動を取得するウェアラブル皮膚振動センサを用いて、粗さ感などを対象に個々人で異なる感覚の数値化⁴¹⁾や、さらに他者との触覚の共有の応用として、触覚センサが使用者の運動を阻害しないことから、触覚の共有に基づく人と人、人とロボットの協調作業⁴²⁾に取り組んでいる。

6. むすび

触覚センサと人の触覚の性能を比較すると、人の優れた性能が目立つ。しかし、伸縮性に優れるセンサや構造的・原理的に工夫したセンサ、人の触覚から一歩離れて目的に特化したセンサ、機械学習の発展など、触覚センサの研究開発も多様性を持って着実に進んでいる。人の触覚は機械ほど正確さや再現性には欠けるように筆者は思う。皮膚温度や乾燥状態などで私たちの触覚は日々変化する。触覚センサは単体ではなく、何かに実装されることで機能を生かすことができる。精度だけではなく、柔軟性やダイナミックレンジ、耐久性など、さまざまな評価軸で多様な触覚センサが開発され、適材適所に実装もより盛んになっていくことで、触覚の知覚メカニズムの研究や触覚提示技術の開発とも連動し、触覚がデジタル情報化され、触覚の新しい効果の発見や価値創造も広がると考える。多様な触覚センサの開発とさまざまなシーンでのますますの活用を期待したい。

(2020年4月2日受付)

〔文 献〕

- 1) 半田拓也, 篠田裕之: "触覚の認識メカニズム", 映情学誌, 74, 2, pp.338-341 (2020)
- 2) 下条誠: "触覚・近接覚センサ解説v2", SlideShare, <https://www.slideshare.net/makotoshimojo/ss-151495670> (2020年4月2日閲覧)
- 3) 篠田裕之: "人のように触れる", 日本バーチャルリアリティ学誌, 12, 3, pp.150-155 (2007)
- 4) J. Scheibert, S. Leurent, A. Prevost, G. Debregeas: "The role of fingerprints in the coding of tactile information probed with a biomimetic sensor", *Science*, 323, pp.1503-1506 (2009)
- 5) 篠田裕之: "皮膚の力学的構造に隠れている知能", システム/制御/情報, 46, 1, pp.28-34 (2002)
- 6) H. Yokoyama, T. Kanashima, M. Okuyama, T. Abe, H. Noma, T.

Azuma, M. Sohawa: "Active touch sensing by multi-axial force measurement using high-resolution tactile sensor with microcantilevers", *電気学論E (センサ・マイクロマシン部門誌)*, 134, 3, pp.58-63 (2014)

- 7) M. Shimojo, A. Namiki, M. Ishikawa, R. Makino, K. Mabuchi: "A tactile sensor sheet using pressure conductive rubber with electrical-wires stitched method", *IEEE Sensors Journal*, 4, 5, pp.589-596 (2004)
- 8) Z. Del Prete, L. Monteleone, R. Steindler: "A novel pressure array sensor based on contact resistance variation", *Metrological properties. Review of Scientific Instruments*, 72, 2, pp.1548-1553 (2001)
- 9) H. Nakamoto, H. Ootaka, M. Tada, I. Hirata, F. Kobayashi, F. Kojima: "Stretchable strain sensor based on areal change of carbon nanotube electrode", *IEEE Sensors Journal*, 15, 4, pp.2212-2218 (2015)
- 10) S. Sokhanvar, M. Packirisamy, J. Dargahi: "A multifunctional PVDF-based tactile sensor for minimally invasive surgery", *Smart Materials and Structures*, 16, pp.989-998 (2007)
- 11) 杉浦裕太, 笥豪太, ウィタナアヌシャ, 坂本大介, 杉本麻樹, 五十嵐健夫, 稲見昌彦: "FuwaFuwa:複数のフォトリフレクタモジュールを用いた柔軟物への接触検知手法", *日本バーチャルリアリティ学論*, 20, 3, pp.209-217 (2015)
- 12) 前川仁, 谷江和雄, 金子真, 鈴木夏夫, 堀口千代春, 菅原武雄: "半球面光導波路を用いた指先搭載型触覚センサの開発", 30, 5, pp.499-508 (1994)
- 13) K. Kamiyama, K. Vlack, T. Mizota, H. Kajimoto, N. Kawakami and S. Tachi: "Vision-based sensor for real-time measuring of surface traction fields", *IEEE Computer Graphics and Applications Magazine*, 25, 1, pp.68-67 (2005)
- 14) Y. Tanaka, T. Fukuda, M. Fujiwara, A. Sano: "Tactile sensor using acoustic reflection for lump detection in laparoscopic surgery", *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 10, 2, pp.183-193 (2015)
- 15) H. Shinoda, K. Matsumoto, S. Ando: "Acoustic resonant Tensor Cell for Tactile Sensing", *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3087-3092 (1997)
- 16) T. Kawasetsu, T. Horii, H. Ishihara, M. Asada: "Flexible tri-axis tactile sensor using spiral inductor and magnetorheological elastomer", *IEEE Sensors Journal*, 18, 14, 5834-5841 (2018)
- 17) A. Faragasso, J. Bimbo, A. Yamashita, H. Asama: "Disposable stiffness sensor for endoscopic examination", *Proceedings of Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp.4309-4312 (2018)
- 18) T. Fukuda, Y. Tanaka, M. Fujiwara, A. Sano: "Softness measurement by forceps-type tactile sensor using acoustic reflection", *Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.3791-3796 (2015)
- 19) M. Lambeta, P.W. Chou, S. Tian, B. Yang, B. Maloon, V. Rose Most, D. Stroud, R. Santos, A. Byagowi, G. Kammerer, D. Jayaraman, R. Calandra: "DIGIT: A novel design for a low-cost compact high-resolution tactile sensor with application to in-hand manipulation", *IEEE Robotics and Automation Letters* (2020)
- 20) S. Teshigawara, K. Tadakuma, A. Ming, M. Ishikawa, M. Shimojo: "High sensitivity initial slip sensor for dexterous grasp", *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.4867-4872 (2010)
- 21) K. Koyama, Y. Suzuki, A. Ming, M. Shimojo: "Integrated control of a multi-fingered hand and arm using proximity sensors on the fingertips", *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.4282-4288 (2016)
- 22) A. Yamaguchi, C.G. Atkeson: "Combining finger vision and optical tactile sensing: Reducing and handling errors while cutting vegetables", *Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp.1045-1051 (2016)
- 23) Y. Ohmura, Y. Kuniyoshi and A. Nagakubo: "Conformable and scalable tactile sensor skin for curved surfaces", *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*,

- pp.1348-1353 (2006)
- 24) M. Kaltenbrunner, T. Sekitani, J. Reeder, T. Yokota, K. Kuribara, T. Tokuhara, M. Drack, R. Schwödiauer, I. Graz, S.B. Gogonea, S. Bauer, T. Someya: "An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics", *Nature*, **499**, pp.458-463 (2013)
 - 25) S. Lim, D. Son, J. Kim, Y.B. Lee, J.-K. Song, S. Choi, D.J. Lee, J.H. Kim, M. Lee, T. Hyeon, D.-H. Kim: "Transparent and Stretchable Interactive Human Machine Interface Based on Patterned Graphene Heterostructures", *Advanced Functional Materials*, **25**, 3, pp.375-38 (2015)
 - 26) T. Yamada, Y. Hayamizu, Y. Yamamoto, Y. Yomogida, A. Izadi-Najafabadi, D.N. Futaba, K. Hata: "A stretchable carbon nanotube strain sensor for human-motion detection", *Nature Nanotechnology*, **6**, pp.296-301 (2011)
 - 27) J. Lee, H. Kwon, J. Seo, S. Shin, J.H. Koo, C. Pang, S. Son, J.H. Kim, Y.H. Jang, D.E. Kim, T. Lee: "Conductive fiber-based ultrasensitive textile pressure sensor for wearable electronics", *Advanced Materials*, **27**, pp.2433-2439 (2015)
 - 28) S. Kimura, K. Nakatsuma, Y. Ohshima, M. Tanabe, M. Kobayashi and I. Torigoe: "Fabrication and evaluation of an uniform piezoelectric film for a robot skin sensor", *Proceedings of the 2018 IEEE Sensors*, pp.1-4 (2018)
 - 29) D. Silvera-Tawil, D. Rye, M. Soleimani, M. Velonaki: "Electrical impedance tomography for artificial sensitive robotic skin", *A review, IEEE Sensors Journal*, **15**, 4, pp.2001-2016 (2015)
 - 30) 石川正俊, 下条誠: "感圧導電性ゴムを用いた2次元分布荷重の中心位置の測定方法", *計測自動制御学論文集*, **18**, 7, pp.730-735 (1982)
 - 31) 星貴之, 篠田裕之: "接触力と接触面積を計測する非線形触覚素子", *計測自動制御学論文集*, **42**, 7, pp.727-735 (2006)
 - 32) S. Okamoto, H. Nagano, Y. Yamada: "Psychophysical dimensions of tactile perception of textures", *IEEE Transactions on Haptics*, **6**, 1, pp.81-93 (2013)
 - 33) N. Wettels, V.J. Santos, R.S. Johansson, G.E. Loeb: "Biomimetic tactile sensor array", *Advanced Robotics*, **22**, pp.829-849 (2008)
 - 34) T. Kurogi, M. Nakayama, K. Sato, S. Kamuro, C.L. Fernando, M. Furukawa, K. Minamizawa, S. Tachi: "Haptic transmission system to recognize differences in surface textures of objects for telepresence", *Proceedings of the IEEE Virtual Reality*, pp.137-138 (2013)
 - 35) P. Peng, A. Sezen, R. Rajamani, A. Erdman: "Stiffness sensor for in-vivo tissue characterization measurement", *Proceedings of Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp.6640-6643 (2009)
 - 36) K. Kikigawa, R. Kuhara, J. Kwon, M. Sakamoto, R. Tsuchiya, N. Nagatani, Y. Nonomura: "Physical origin of a complicated tactile sensation: 'shittori feel'", *Royal Society Open Science*, **6**, 7, 190039 (2019)
 - 37) S.A. Mascaro, H.H. Asada: "Photoplethysmograph fingernail sensors for measuring finger forces without haptic obstruction", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **17**, pp.698-708 (2001)
 - 38) M. Nakatani, K. Shiojima, S. Kinoshita, T. Kawasoe, K. Koketsu, J. Wada: "Wearable contact force sensor system based on fingerpad deformation", *Proceedings of World Haptics Conference*, pp. 323-328 (2011)
 - 39) Y. Makino, T. Murao, T. Maeno: "Life log system based on tactile sound", *Proceedings of EuroHaptics 2010*, pp.292-297 (2010)
 - 40) Y. Tanaka, D.P. Nguyen, T. Fukuda, A. Sano: "Wearable skin vibration sensor using a PVDF film", *Proceedings of the 2015 IEEE World Haptics Conference*, pp.146-151 (2015)
 - 41) M. Natsume, Y. Tanaka, A.M. L. Kappers: "Individual differences in cognitive processing for roughness rating of fine and coarse textures", *PLOS ONE*, **14**, 1, e0211407 (2019)
 - 42) R. Ishida, L. Meli, Y. Tanaka, K. Minamizawa, D. Prattichizzo: "Sensory-motor augmentation of the robot with shared human perception", *Proceedings of the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.2596-2603 (2018)



たなか よしひろ
田中 由浩 2001年, 東北大学工学部機械電子工学科中退。2006年, 同大学大学院博士課程修了。同年より, 名古屋工業大学助手。特任助教などを経て, 2015年より, 同大学准教授。これまでに, JST さきがけ研究者, ユトレヒト大学客員助教, 藤田医科大学客員准教授などを兼任。触覚デバイス, 触覚デザイン, 主観的な触覚の共有や活用の研究などに従事。博士(工学)。

触覚ディスプレイ

牧野 泰才[†]

1. まえがき

触覚ディスプレイとは、触覚を介して情報を提示するデバイスのことを指す。最も身近な触覚ディスプレイは、スマートフォンに搭載の振動子である。人が操作入力をした際に、それを通知したり、着信を音の代わりに振動で伝えたり、といった形で利用されている。

近年のVRブームにより、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)内の映像に対して触覚を提示し、そのリアリティを向上させる、というのも有用な応用事例の1つとして注目されている。「夢かどうかを確かめるために頬をつねる」という事例からもわかるように、触覚は「そこにある」ことを実感するモダリティである。視聴覚情報がリッチになってきている近年のVRにおいて、リアリティ向上のためにいかに触覚を付与していくかは重要な課題の1つである。

本稿では、触覚ディスプレイ技術を概観する上で必要な触覚の基礎的な特性に触れた後に、現状の触覚ディスプレイの動向について述べる。

2. 皮膚感覚と深部感覚

五感の1つとしての触覚と言った場合、実は含まれる感覚は多い。大学院の講義などで学生に「触覚とはどういう感覚でしょう?」というクイズを出すことがある。その時の回答としては「振動」、「圧力」、「温度」といったものが多い。もちろんこれらは触覚の一部であり、皮膚表面で感じられる感覚であることから、皮膚感覚と呼ばれる。

一方、なかなか出てこないのが深部感覚と呼ばれる感覚である。これは、関節の姿勢やそこにかかるトルクを感じる感覚であり、例えば、手に持ったものの重さなどを感じるのに利用される。これ以外にも、痛覚や平衡感覚、内臓感覚なども触覚という括りで扱われる。ただし、「触覚ディスプレイ」といった場合には、主に「皮膚感覚」、「深部感覚」のことを対象にした感覚提示装置のことを指すことが多い。

触覚というと、指先を想像することが多いためか、皮膚感覚を想定しがちであるが、市販品として広く普及しているのは深部感覚を刺激するような「力覚ディスプレイ」と呼ばれるものである。その代表例としてPHANToMが知られる¹⁾。アーム機構の先にペン状の把持部があり、その姿勢を制御することで人に反力を提示するデバイスである。VR空間内のオブジェクトに触れたときのリアリティが向上するなど、多くの機会に利用されている。

本稿では、以降、深部感覚については取り扱わない。皮膚感覚、中でも振動や圧力に焦点を絞って研究動向を紹介する。

3. 触覚受容器の時空間特性²⁾

皮膚感覚は、皮膚内の触覚受容器や自由神経終末などによって知覚される感覚である。空間的には、指先が最も解像度が高く、異なる二点を押したときにそれを二点と感じられる「二点弁別閾」は2mm程度である。これに次いで同程度に感度が高いのが唇である。一方、背中になると7cm程度離れても二点とは感じられない。

指先のような無毛部について考えた場合、機械的な変形に感度を持つ4種類の触覚受容器が存在することが知られている。単一周波数の振動刺激を与えた場合の感度が調べられており、各受容器は特定の時間周波数帯域に感度を持つ。例えば、パチニ小体は200 Hz程度に高い感度を持ち、4つの中で最も小さな振動振幅で発火する受容器である。この周波数感度の上限は1000 Hz程度であることが知られている。

以上、視聴覚と比較してまとめれば、視覚に比べてかなり粗い空間的な解像度を持ち、聴覚の20 kHzに比べてかなり狭い受容周波数帯域を持つのが触覚と理解することができる(逆に言えば、視覚よりも高い時間解像度を持ち、聴覚よりも高い空間分解能を持つとも言える)。

4. 空間的な再構成のための触覚技術

対象の触覚情報を再現しようとした場合、空間的な凹凸をそのまま再現するというのが1つの手段である。図1に示すように、実現したい空間的なパターンを、離散的なピンの上下動で表現する。このような研究は多くなされてい

[†] 東京大学 大学院情報理工学系研究科

"Introduction to Haptic Technology: Exploring a methodology for human interface through the sense of touch (3): Haptic Display" by Yasutoshi Makino (The University of Tokyo, Tokyo)

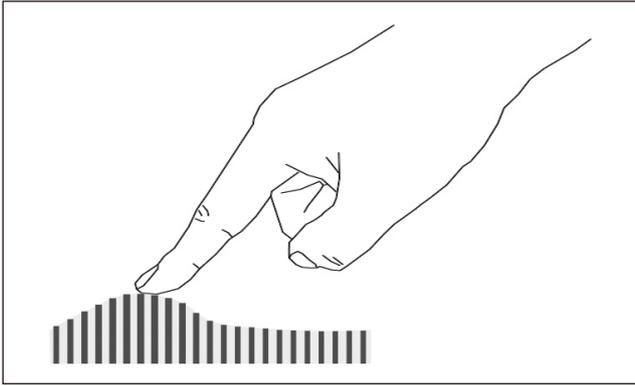


図1 ピンアレイの上下動による対象表面再現の模式図

る³⁾⁴⁾。指先の空間解像度が2mm程度であるため、それよりも高い空間密度でピンを配置し、駆動できれば良い。

視覚的なディスプレイでは、例えば、Retina Displayなどでは220 dpi程度を実現しており、充分高い密度で色点を配置することができている。一方触覚の場合には、高密度に細いピンを配置できたとしても、それを上下方向に駆動するために、個別にアクチュエータを配置する部分に困難が伴う。

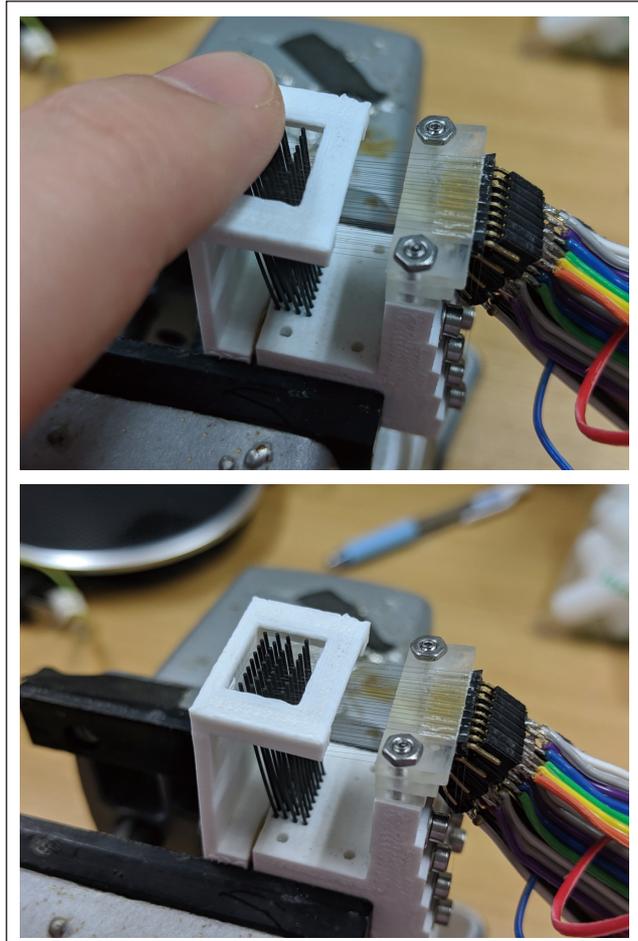
近年では、そのアクチュエータ配置の困難さを解消するために、ピンを水平方向に駆動する手法が提案されている⁵⁾。これは、ピンを皮膚に当たった状態で水平方向に変位させても、垂直方向の変位のように知覚されるという触覚の錯覚に基づいている。例えばKajimotoらは⁶⁾、ニクロム線に電流を流した際の熱膨張を利用してピンを水平方向に駆動するシステムを提案している(図2)。小さなアクチュエーション機構で実現されるため、軽量化に向く手法と言える。

5. 時間的な再構成によるリアルな触感提示

上記のような空間的な再現とは別に、時間的な振動波形を正確に再現することで、よりリアルな触感を再現するというのが、もう1つの方法である。

触覚受容器の時空間特性の項で触れたように、触覚受容器は200 Hz程度の振動に対して最も高い感度を持つ。以前の携帯電話のバイブレータでは、エネルギー効率のよい通知機能の実現のためにこの特性を利用し、主にこの帯域にピークを持つ振動子が利用されていた。このような、単一周波数の振動刺激は、そのオンオフにより記号的に触覚を利用する分には問題ないが、一方で単一の受容器のみが主に刺激されるため、リアルな触感の再現には向かない。

これに対して、周波数帯域の広い振動子を利用し、実際の振動をリアルに再現することで、リッチな触覚体験を実現する手法が提案されている。Virtual Rolling Stone⁷⁾では、棒を持ってその先端を上げたり下げたりすると、その角度に応じて、棒の中を仮想的なボールが転がるような振動が手元で再現される。このとき、実際にボールが移動しているわけではないにも関わらず、感覚としてはあたかもボール

図2 ニクロム線の膨張により水平方向にピンを駆動する触覚ディスプレイ⁶⁾(提供: 梶本裕之電気通信大学教授)

が移動し、棒の中の重心が変化しているように知覚される。

TECHTILE Toolkit⁸⁾では、広帯域の振動を再現可能な振動子と、コンタクトマイクのセットを利用することで同様の体験をさまざまな対象において実現できる。例えば、紙コップを2つ用意し、片方の紙コップAにマイクを、もう片方の紙コップBに振動子を貼り付け、Aで計測した振動をBで再現できるようにする。この状態で、紙コップAの中にビー玉を落とすと、その振動が離れた紙コップBに再現され、空の紙コップにあたかもビー玉が落ちてきたような感覚が得られる。これにおいても、やはり空の紙コップの質量は変化しないのにも関わらず、あたかもビー玉が入ってきたような、重量感の変化までが錯覚される。

このような、高品質の振動の再現は、近年では家庭用ゲーム機に応用されている。Nintendo Switchでは、HD振動という名前で紹介されており、1-2-スイッチ⁹⁾というソフトでは、完全に振動のみを利用したミニゲームなども実現されている。

Apple社のTapticEngineもこれに該当する。数年前のiPhoneからホームボタンがリアルなボタンではなく、感圧センサ+振動子に変更された。押し込んだ際の強さに応じ

て振動子がリアルな振動パターンで駆動されることで、あたかも本当にボタンを押し込みクリックしたかのような触感が得られる。

ここで示したリアルな振動パターンを提示する手法では、空間的な情報は再現されていない。それであるにも関わらず、棒の中をボールが移動したり、紙コップの中をビー玉が転がったりというように、移動感も知覚されることが確認されており、触知覚の特性の解明という観点から見ても、非常に興味深い手法である。

WorldHapticsという触覚の大きな国際会議が隔年で開催されているが、2019年の会議においても、振動を適切に再構成することでリアルな触感を提示するという研究がいくつか採択されており^{10) 11)}、今も注目を集める研究領域の1つと言える。

6. Surface Haptics

近年注目されている触覚研究の1つの分野にSurface Hapticsがある。これは、ガラス面などの表面上の摩擦を位置に応じて変化させることで、多様な触感を表現する手法である。スマートフォンなどタッチパネルデバイスでの触覚フィードバックを目的とした研究が多く、それらが広く普及したことと関係が深い。

この方法には大きく2つの手法が知られている。1つは超音波を用いて対象表面を高周波振動させ、スクイーズ膜効果により「摩擦を低減させる」方法である^{12) 13)}。もう1つは静電気力を利用し、指先を対象表面に吸着させることで「摩擦を増加させる」方法である^{14) 15)}。指先の位置に応じて摩擦の強度を変化させることで、ボタンのエッジ感やテクスチャ感といった多様な触覚が再現される。どちらもタッチパネル表面に実装するような形の研究が進んでおり、将来的にタッチパネル表面の触覚フィードバックに利用されることが期待されている。

超音波を用いた方法では、例えば、最初の状態が両面テープのような粘着面でも、そこに超音波を印加することで粘着性が低下する、というような研究も進んでいる¹⁶⁾。また近年では、この後紹介する空中超音波を利用して遠隔から対象表面を励振し(ただし対象は音響インピーダンスの低い発泡スチロールでのみ実現されている)、摩擦を低下させるというような手法も提案されている¹⁷⁾。

7. 超音波を利用した遠隔からの触覚提示

7.1 基本原理

一般的に触覚は、対象との距離が0の状態が生じる感覚である。一方、遠隔から空中に触覚を提示する手法というの提案されている。空気塊を飛ばして触覚を提示する手法や¹⁸⁾、レーザによる方法など¹⁹⁾、いくつかの手法が提案されているが、中でも特に超音波フェーズドアレイを利用した手法は^{20) 21)}、近年注目を集めている。筆者の所属する研

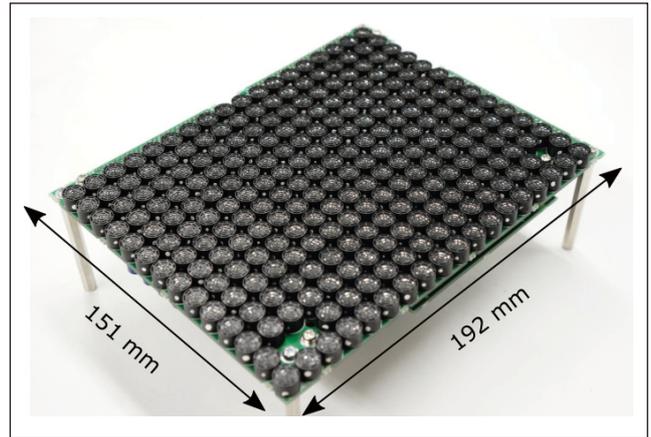


図3 超音波振動子アレイ外観

究室で開発が進められているため、以下少し詳しく述べる。

超音波は人の耳に聞こえない高い周波数で振動する音である。基本的には大気圧を基準として圧力が正負に振動するため、連続的に振動する超音波を皮膚に照射しても、その積分は0となり力は生じない。しかし、複数のトランスデューサを利用し、その位相を制御することで一点に高い音圧のポイントを生成すると、媒質となる空気非線形性により、音響放射圧という正圧が生成されることが知られている。これを利用し、何もない空中に触覚を提示する。図3に超音波触覚提示装置を示す。図に示すように、直径1cm程度の超音波トランスデューサがアレイ状に配置されている。各振動子の位相を制御することで、空間中に音圧の高い点を形成し、触覚を提示する。

このようなフェーズドアレイによる焦点は、光のレンズによる焦点とのアナロジーで考えることができる。小さな焦点を形成しようとした場合に開口の大きなレンズが必要となるように、超音波においても形成される焦点の直径は、アレイ面からの距離 r 、正方形形状開口の一辺の長さ L と波長 λ により決定されることが知られ、 $\frac{2r}{L}$ で与えられる²²⁾。このとき、250個程度のトランスデューサアレイを利用した場合には、1~2 gf程度の比較的弱い力が提示できることが確認されている。

このような遠隔での触覚提示による利点は、

- (1) ユーザが装置を装着することなく触覚を提示できる
- (2) 3次元的な任意の位置に触覚を提示できる
- (3) 人の対象への押下力に依存せず、一定の力を提示できる
- (4) 何にも触れないため、衛生面で優れる

などが挙げられる。特に(4)に関して、今年に入ってから新型コロナウイルス蔓延の影響で、物に触れずに何かを操作するという方法の需要が今後高くなることが想定される。そのような用途において、操作のフィードバックとして、何にも触れずに触覚を提示できるというのは1つ大きな利点となりうる。

7.2 変調による知覚強度の向上

これまでも触れたように、超音波焦点により提示できる力は数gf程度と小さい。この知覚的な強度を向上させるため、振幅変調 (AM) を利用した手法が利用されてきた。これは、受容器の時空間特性の項で触れたように、人の触覚受容器が200 Hz程度の振動に対して高い感度を持つことを利用したものである。

これに追加して、近年では空間的な変調方式により知覚強度が向上するという知見が得られ始めている²³⁾。TakahashiらによるLateral Modulation (LM) という手法では²⁴⁾、超音波の強度を一定に保ったまま、焦点を手のひら上で水平に高速移動させることで、その知覚強度が上がることが示されている。AMのときに比べ、LMでは振動の振幅が一定のまま位置が移動するため、時間的な平均振動強度は高くなってはいるが、知覚としてはそれだけでは説明できない程度に閾値が上がるなどが示されている。

同様の実験を水平に移動する振動体で実現しようとした場合には、各位置での垂直方向の押下力を一定に保ったまま水平移動させることが難しく、また皮膚表面での摩擦力の影響を切り分けられず、非常に難しい条件になることが考えられる。超音波を利用し、一定の力で摩擦を生じさせずに刺激をできるからこそ得られた新しい知見である。

7.3 立体映像との組み合わせによる触覚フィードバック

提示できる刺激の強度が低いため、超音波の刺激単体で何かりアルな触感を再現するというのには限界がある。一方で、空中映像と組み合わせ、3次元的に位置が一致した視触覚体験を実現すると、その触覚フィードバックの効果が非常に高い。

Haptomime²⁵⁾ というシステムでは、アスカネット社のASKA3D²⁶⁾ という特殊なミラーを利用し、空中に操作パネルを表示した状態で、その映像とのインタラクション時に触覚フィードバックを提示している。AR技術の進展と、それに伴うセンシング技術の発展により、HMDや3次元映像技術を利用した情報提示時に、空中ジェスチャで入力をするという手法は、今後多くなっていくと考えられる。このシステムはその時の触覚フィードバックの重要性を体感できるものである。

HaptoClone²⁷⁾ (図4) は、2枚のASKA3Dを利用し、隣接ブース内の物体を立体像として相互に再構成し、3次元的な視触覚体験を実現したものである。深度センサであるKinectを利用し、各ブース内の物体の3次元形状を計測し、隣接ブース内の同じ位置の物体と接触したときにそこに向かって超音波刺激を提示する。特殊なミラーであるASKA3Dを利用することで、遅延なく3次元像が再構成されるため、視覚体験としては非常にリアルな3次元体験が可能となる。一方、触覚については、何もない空中映像に触れたときに、それに同期して触感が生じるというのが、体験の質を向上させる。特に、指先で軽く撫でるような弱い感触に関して

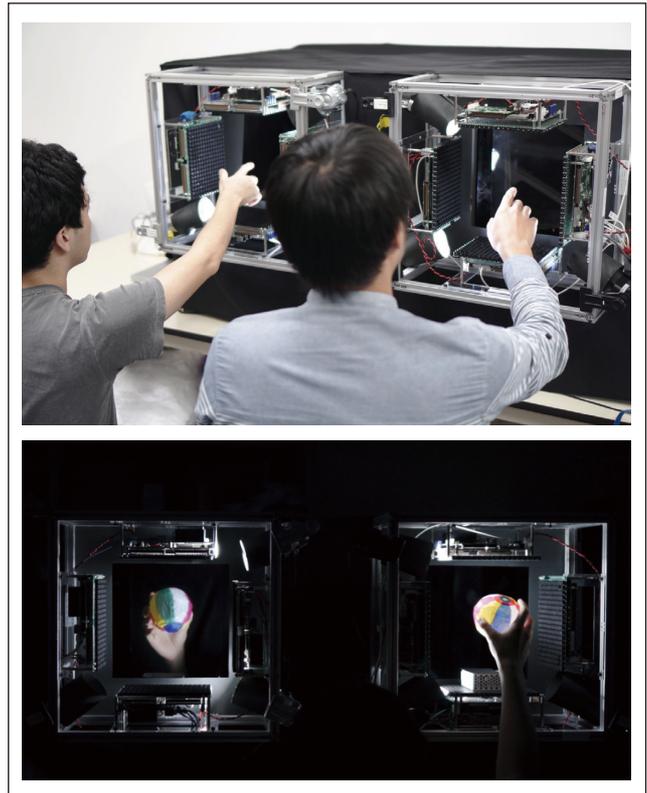


図4 HaptoCloneシステム

(上) 隣接するブース間で立体像とそれに触れた触感が再現される。
(下) 右のブースに入れた紙風船と手が、Aska3Dを介して左のブースで立体像として見える様子。

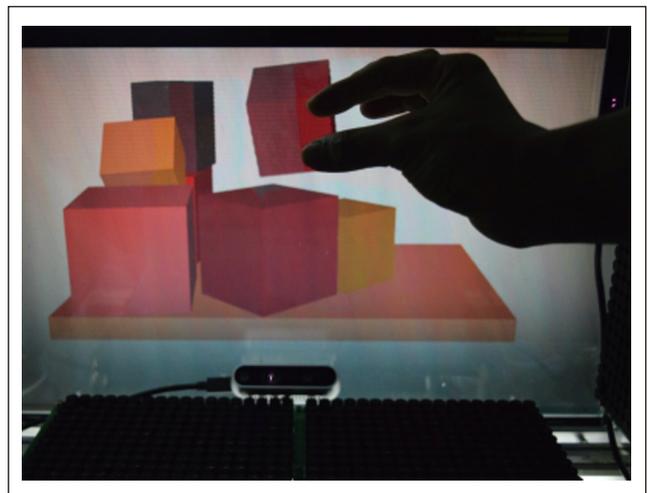


図5 裸眼立体ディスプレイと組み合わせ、つまみ上げ動作時に触感を提示する

は、リアリティ高く再現ができる。ただし、先述のように力が弱い場合、例えば、握手をするような強い力の表現が求められる体験ではそのリアリティは低下する。

Matsubayashi (図5) らの研究では²⁸⁾、裸眼立体ディスプレイと組み合わせ、3次元CG映像を自由にハンドリングできるような手法を提案している。この手法では、ワークスペースを取り囲むように深度センサ (RealSense) と超音波

フェーズドアレイを配置し、常に指腹に対して刺激が提示できるようになっている。立方体をつまみ上げるような動作に対して、母指と示指それぞれの指腹にその時の物体への押し込み深さに応じたフィードバックを返すなど、3次元CGオブジェクトとの触覚を伴うインタラクションが可能となっており、操作性の向上に触覚フィードバックが寄与することが確認されている。

以上のように、超音波を利用した遠隔からの触覚提示は、触覚の基礎特性の解明のためのツールとして、また3次元的情報入力時のサポートのような新しいインタフェースとして、その応用が期待される技術である。

8. Facebook社の触覚研究動向

本稿の最後に、Facebook社の触覚研究動向について触れる。特定の企業について触れるというのはやや不思議に感じられるかもしれないが、Facebook社の触覚研究分野におけるプレゼンスが、近年大きく上がっている。顕著だったのが2019年7月に開催された触覚の国際会議World Haptics Conference (WHC)²⁹⁾における採択数である。採択された論文の所属機関別順位で、Facebookは2位の東京大学の倍以上の採択数で1位であった。開催場所が東京であり、地元の東京大学から多くの研究が投稿されたことを考慮すると、圧倒的な採択数であったと言える。

これには理由がある。2017年4月に開催されたFacebook社のカンファレンスにて、同社の未来的なプロジェクトとして「脳でタイピング」、「皮膚で聞く」という2つが発表された³⁰⁾。これは、言葉を発さずに情報を伝え、それを認識できるようにするというものである。つまり、人への情報伝達の手段として皮膚を利用することが、同社の直近の目標となっていた。2019年のWHCでの発表数の増加は、これを受けての2年間の研究成果の発表だったと考えられる。

「皮膚で聞く」というテーマに対して、非常に理想的な状況を想像すると、皮膚に刺激を与え、点字の代替のように文字情報を伝達するというのが想像できる。しかし、WHCでの発表を見る限りでは、そのような記号的な情報の伝達については考慮されていないように感じられた。以下に、Facebook社が著者に含まれる論文からいくつか紹介する。

McIntyre³¹⁾らの研究では、二人の被験者に対して、お互いが見えない状態で、一人がもう一人に対して特定の情動(喜びや悲しみなど)を伝えるように前腕に触れ、そういった情動がどの程度伝達できるかを評価している。Hauser³²⁾らの研究では、そのような情動を伝えるように触れたときに、実際に手がどのように動作していたのかを、接触面積や接触速度、持続時間等を計測することで定量評価している。Hauser³³⁾らはまた、神経発火レベルでのリアクションについても調べている。

情報提示のデバイスという観点では、PezentらのTasbi³⁴⁾やYoungらのBellowband³⁵⁾など、駆動方式は異なるものの、どちらも手首に巻いて利用するタイプのデバイスが提案されている。モータや空圧駆動のバルーンの動かし方を変えることで、多様な自由度の触感を提示可能なデバイスとなっている。

以上の研究動向を踏まえると、「皮膚で聞く」を実現するために、①手首や前腕など、手指ではない部位に対して刺激を提示し、②刺激の仕方によって、喜びや悲しみのような情動を伝達する。というのを目指しており、③どのように触れると神経レベルでどのようなリアクションが起こり、結果としてどのような情動が生起されるか? という部分までを解明しようとしていることが見えてくる。

FacebookというSNSが「いいね」や「悲しいね」といったアイコンをクリックすることで簡便なコミュニケーションを実現していることを考えれば、それを触覚を介して伝えるという意味で、非常に理にかなった戦略であるように見受けられる。今後、触覚のインタフェース利用についてFacebook社がリードしていく可能性が高く、今後の展開に注視していきたい。

なお、文字情報を直接伝えるという手法についての発表はなかったため、そちらに対して何かアプローチしているのか否かは、WHCの発表からでは伺い知れない。一方で、触覚により抽象的な情動を伝えるのではなく、文字を伝達することには大きな需要がある。

一般的に視覚障害者と言った場合、われわれはどうしても全盲の方を想像しがちであるが、実際は弱視の方も多く、後天的に視力が低下したという状況が多い。そのように後天的に視力を失くした人たちの多くは、点字を読むことができない。視覚障害者全体に占める点字を読める人の割合は10%程度と言われており、残りの90%の人たちは文字情報を得るのに困難を抱えていることになる。近年ではスマホの文字読み上げ機能が向上してはいるものの、公共の場での利用が難しいなど問題もあり、触覚を介して少ない訓練で文字情報を伝達する手法については、その実現が望まれるものである。

9. むすび

以上、本稿では最近の触覚研究の動向も含め、人工的に触覚を提示する触覚ディスプレイについての解説を行った。今年に入ってからのコロナウイルス蔓延下での世界情勢を見ると、これまで普通に触れることのできた握手やハグなどができない状況が続いている。そのような「できなくなってしまった触覚的なインタラクション」のバーチャルな実現が、今後触覚研究に求められることの1つになるかもしれない。

(2020年5月5日受付)

〔文 献〕

- 1) https://www.youtube.com/watch?v=C_rHAbJggM
- 2) シュミット：感覚生理学金芳堂（1989）（R.F. Schmidt: "Fundamentals of Sensory Physiology", Springer-Verlag, 1986）
- 3) I.R. Summers and C.M. Chanter: "A broadband tactile array on the fingertip", the Journal of the Acoustical Society of America, 112, 2118-26 (2002), <https://doi.org/10.1121/1.1510140>
- 4) 仲谷正史, 梶本裕之, K. Vlcek, 関口大陸, 川上直樹, 館暉: "コイル形状記憶合金を用いた3次元形状ディスプレイの研究", 映情学誌, 60, 2, pp.183-191 (2006) 公開日2008/03/07, Online ISSN 1881-6908, Print ISSN 1342-6907, <https://doi.org/10.3169/itej.60.183>
- 5) J. Pasquero and V. Hayward: "STReSS: A practical tactile display system with one millimeter spatial resolution and 700 Hz refresh rate", in Proc. Eurohaptics, pp.94-110 (2003)
- 6) H. Kajimoto and L.A. Jones: "Wearable Tactile Display Based on Thermal Expansion of Nichrome Wire", in IEEE Transactions on Haptics, 12, 3, pp.257-268 (1 July -Sep. 2019)
- 7) H. Yao and V. Hayward: "An experiment on length perception with a virtual rolling stone", in Proceedings of EuroHaptics 2006, pp.325-330 (2006)
- 8) K. Minamizawa, M. Nakatani, Y. Kakehi, S. Mihara and S. Tachi: "TECHTILE Toolkit", in IEEE Haptics Symposium 2012, Demo (2012)
- 9) <https://www.nintendo.co.jp/switch/aacca/index.html>
- 10) C. Park, J. Park, S. Oh and S. Choi: "Realistic Haptic Rendering of Collision Effects Using Multimodal Vibrotactile and Impact Feedback", 2019 IEEE World Haptics Conference (WHC), Tokyo, Japan, pp.449-454 (2019)
- 11) T. Handa, M. Azuma, T. Shimizu, S. Kondo, M. Fujiwara, Y. Makino and H. Shinoda: "Ball-type Haptic Interface to Present Impact Points with Vibrations for Televised Ball-based Sporting Event", 2019 IEEE World Haptics Conference (WHC), Tokyo, Japan, pp.85-90 (2019)
- 12) T. Watanabe and S. Fukui: "A Method for Controlling Tactile Sensation of Surface Roughness Using Ultrasonic Vibration", Proc. IEEE ICRA, pp.1134-1139 (1995)
- 13) TPAD TABLET Project, <http://tpadtablet.org>
- 14) 山本晃生, 石井利樹, 樋口俊郎: "摩擦力制御を用いた静電皮膚感覚ディスプレイ", 計測自動制御学論集, 40, 11, pp.1132-1139 (2004)
- 15) O. Bau, I. Poupyrev, A. Israr and C. Harrison: "TeslaTouch: electrovibration for touch surfaces", in Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '10), pp.283-292 (2010), DOI:<https://doi.org/10.1145/1866029.1866074>
- 16) M. Takasaki, D. Yamaguchi, Y. Ochiai, T. Hoshi and T. Mizuno: "Between Smoothness and Stickiness", Proc. IEEE World Haptics Conference, D-46, Chicago, Illinois (USA), 22-26 (June 2015)
- 17) T. Ohmori, Y. Abe, Y. Someya, M. Fujiwara, Y. Makino and H. Shinoda: "ReFriction: Remote friction control on polystyrene foam by ultrasound phased array", in SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies (SA '19) (2019), DOI:<https://doi.org/10.1145/3355049.3360522>
- 18) R. Sodhi, I. Poupyrev, M. Glisson and A. Israr: "AIREAL: interactive tactile experiences in free air", ACM Trans. Graph. 32, 4, Article 134 (July 2013), 10 pages (2013), DOI:<https://doi.org/10.1145/2461912.2462007>
- 19) Y. Ochiai, K. Kumagai, T. Hoshi, J. Rekimoto, S. Hasegawa and Y. Hayasaki: "Fairy Lights in Femtoseconds: Aerial and Volumetric Graphics Rendered by Focused Femtosecond Laser Combined with Computational Holographic Fields", ACM Trans. Graph. 35, 2, Article 17 (Feb. 2016), 14 pages (2016), DOI:<https://doi.org/10.1145/2850414>
- 20) T. Iwamoto, M. Tatezono and H. Shinoda: "Non-contact Method for Producing Tactile Sensation Using Airborne Ultrasound", Haptics: Perception, Devices and Scenarios: 6th International Conference, Eurohaptics 2008 Proceedings (Lecture Notes in Computer Science), pp.504-513 (2008)
- 21) T. Carter, S. Seah, B. Long, B. Drinkwater and S. Subramanian: "UltraHaptics: multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces", Proc. Symp. User interface software and tech. (UIST'13), pp.505-514 (2013)
- 22) T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto and H. Shinoda: "Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound", IEEE Trans. On Haptics, 3, 3, pp.155-165 (2010)
- 23) W. Frier, D. Ablart, J. Chilles, B. Long, M. Giordano, M. Obrist and S. Subramanian: "Using Spatiotemporal Modulation to Draw Tactile Patterns in Mid-Air", in Haptics: Science, Technology and Applications, 10894, pp.270-281. Springer (2018)
- 24) R. Takahashi, K. Hasegawa and H. Shinoda: "Tactile Stimulation by Repetitive Lateral Movement of Midair Ultrasound Focus", IEEE Transactions on Haptics (Open Access) Early access (Oct. 2019)
- 25) Y. Monnai, K. Hasegawa, M. Fujiwara, S. Inoue and H. Shinoda: "HaptoMime: Mid-Air Haptic Interactions with a Floating Virtual Screen", Proc. 27th ACM User Interface Software and Technology Symposium (UIST2014), pp.663-667, Hawaii, USA (Oct. 5-8, 2014), DOI: 10.1145/2642918.2647407
- 26) <https://aska3d.com/ja/>
- 27) Y. Makino, Y. Furuyama, S. Inoue and H. Shinoda: "HaptoClone (Haptic-Optical Clone) for Mutual Tele-Environment by Real-time 3D Image Transfer with Midair Force Feedback", Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.1980-1990, San Jose Convention Center, San Jose, CA, USA (May 7-12 (2016), DOI: 10.1145/2858036.2858481
- 28) A. Matsubayashi, Y. Makino and H. Shinoda: "Direct Finger Manipulation of 3D Object Image with Ultrasound Haptic Feedback", Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Paper, 87, pp.1-11, Glasgow, Scotland UK (May 04 - 09, 2019)
- 29) <http://www.worldhaptics2019.org/>
- 30) <https://japan.cnet.com/article/35100052/>
- 31) S. McIntyre, A. Mounqou, R. Boehme, P.M. Isager, F. Lau, A. Israr, E.A. Lumpkin, F. Abnoui and H. Olausson: "Affective touch communication in close adult relationships", 2019 IEEE World Haptics Conference (WHC), Tokyo, Japan, pp.175-180 (2019)
- 32) S.C. Hauser, S. McIntyre, A. Israr, H. Olausson and G.J. Gerling: "Uncovering Human-to-Human Physical Interactions that Underlie Emotional and Affective Touch Communication", 2019 IEEE World Haptics Conference (WHC), Tokyo, Japan, pp.407-412 (2019)
- 33) S.C. Hauser, S.S. Nagi, S. McIntyre, A. Israr, H. Olausson and G.J. Gerling: "From Human-to-Human Touch to Peripheral Nerve Responses", 2019 IEEE World Haptics Conference (WHC), Tokyo, Japan, pp.592-597 (2019)
- 34) E. Pezent, A. Israr, M. Samad, S. Robinson, P. Agarwal, H. Benko and N. Colonnese: "Tasbi: Multisensory Squeeze and Vibrotactile Wrist Haptics for Augmented and Virtual Reality", 2019 IEEE World Haptics Conference (WHC), Tokyo, Japan, pp.1-6 (2019)
- 35) E.M. Young, A.H. Memar, P. Agarwal and N. Colonnese: "Bellowband: A Pneumatic Wristband for Delivering Local Pressure and Vibration", 2019 IEEE World Haptics Conference (WHC), Tokyo, Japan, pp.55-60 (2019)



まきの やすとし
牧野 泰才 2007年、東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。学術振興会特別研究員などを経て、2009年より、慶應義塾大学特任助教。2013年より、東京大学大学院情報理工学系研究科講師。2014年より、同大学院新領域創成科学研究科講師。2017年より、同大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻准教授。JST さきがけ研究員。触覚ディスプレイの開発や、身体性に着目した動作予測、触情報推定などの研究に従事。

触覚技術のユーザインタフェースへの応用

佐藤 克成[†]

1. まえがき

ヒトの生活において触覚は、肌に触れる物質の状態を認識し、把持操作など適切な行動を取るために活用されている。すなわち触覚は、ヒトと外界とを身体的につなぐインタフェースとしての役割を果たしている。こうした触覚の機能を模倣する触覚デバイスは、ヒトと電子空間とをつなぐユーザインタフェースとしても幅広く応用されている。触覚デバイスを用いることで、あたかも実空間と接するかのようになり、電子空間との身体的インタラクションが可能となる。さらに電子空間を介して、遠隔のヒトや環境とをつないだ場合、時間や空間の制約を超えた“触れ合い”も可能となる。触覚デバイスを用いた遠隔地との“触れ合い”は、離れて住む家族間のコミュニケーションの実現や、身体的な理由により外出が困難な人の生活支援など、多様な応用が期待できる。特に、COVID-19の感染防止対策時のように、ヒトと直接接することが制限される状況下においてはその価値が高まる。

本稿は、講座「触覚技術入門」の第2回¹⁾、第3回²⁾で述べられた触覚センサとディスプレイ技術のユーザインタフェースとしての応用を、触覚伝送技術を中心として、製品化された事例から研究段階の事例まで幅広く解説する。

2. 触覚を伝える・共有する

触覚センサとディスプレイを用いることで、ビデオカメラで記録した映像をモニターで再生する視覚伝送のように、触覚の伝送を実現できる。触覚伝送は触覚技術のユーザインタフェース応用において、比較的早くから研究が進められてきた。触覚伝送としての応用事例をその歴史とともに述べる。

2.1 触覚伝送技術の発展

触覚伝送技術は、ロボットの遠隔操作 (Teleoperation) の分野を中心に発展してきた。アメリカのアルゴンヌ国立研

究所 (ANL) は、第2次世界大戦後、放射性物質を離れた場所から安全に取り扱うために、マスタ・スレーブ・マニピュレーションの研究を行った³⁾。最初に開発されたものは、人間が操作するマスタと、作業するスレーブがリンク機構で繋がっており、双方向に力の感覚を伝送する。1950年代には、より遠くに力を伝送するため、電動式のマニピュレータの開発が始まった。これらは触覚のうち深部感覚を伝送するシステムであった。

1980年には、あたかも操作者自身がロボットの中に入り込んだかのような高い臨場感を得られる、テレグジスタンス (Telexistence)⁴⁾ の概念が提唱される。テレグジスタンスでは、遠隔の作業やコミュニケーションにおいて高い臨場感を得るために、視覚や聴覚、触覚の情報を高精度にフィードバックすることが求められる。そのために触覚としては、固有受容感覚に加え皮膚感覚を伝送する技術が開発されてきた。例えば、指先における圧力分布情報を伝送するロボットハンドシステム⁵⁾ (図1) や、振動・圧・温度の情報を伝送するシステム⁶⁾ などが開発されている。

さらに2000年代以降は、超臨場感コミュニケーションとして、遠隔地間においてあたかも同じ空間を共有しているかのような対話を実現するための研究が進められている。臨場感を構成する空間要素である「質感」を再現するために、

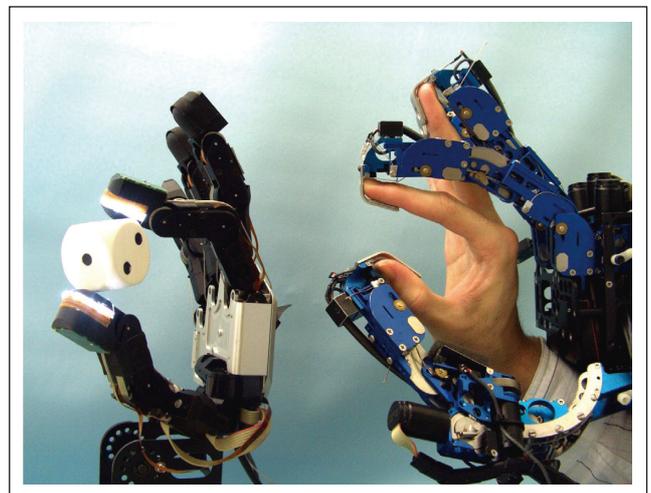


図1 触覚のテレグジスタンス⁵⁾

[†] 奈良女子大学

"Introduction to Haptic Technology: Exploring a methodology for human interface through the sense of touch (4); Application of Haptic Technology to User Interface" by Katsunari Sato (Nara Women's University, Nara)

触覚に関わる情報を伝送する必要性が主張されている³⁾。伝送される触覚情報の精度が高まるにつれ、その用途は極地作業からコミュニケーションやショッピング、遠隔医療など多様な分野に広がりを見せている。

2.2 触覚伝送モジュールの開発

触覚伝送の研究が進められる一方で、視覚におけるカメラとモニタ、聴覚におけるマイクとスピーカのような標準化された技術の確立には至っていない。その理由として、触覚の基底となる情報が十分に解明されていないこと、また触覚には複数の物理情報が関与し、デバイス実装が困難なことが挙げられる。これらの問題を解決するために、JST(日本科学技術振興機構) ACCELの身体性メディアプロジェクト⁷⁾では、触原色原理に基づく触覚伝送モジュールの開発に取り組んでいる。身体性メディアプロジェクトでは、力と振動、温度を物理空間の基底とし、これらの情報を同時に計測・提示可能なモジュール⁸⁾⁹⁾を、手の指先腹部と同程度の大きさに実装している(図2)。さらに、これら物理空間の基底の刺激の組み合わせにより、多様な材質感を生成し得ることを検証している¹⁰⁾。

実装した触覚伝送モジュールの活用事例として、触覚共有を可能とするグローブ型インタフェース¹¹⁾(図3)を開発している。計測用グローブの指先に搭載した触覚計測モジュールは、感圧導電シートとチップサーミスタから構成され、圧力と温度の分布情報、および圧の時間変化として振動情報を計測できる。また提示用グローブの先端に搭載した触覚提示モジュールは、振動子と冷刺激用ペルチェ素子、温刺激用ヒータ、および電気刺激用電極フィルムから構成され、計測された触覚情報を再現できる。計測用モジュールを着用したユーザが多指でモノに触れた時、提示

用グローブ装着者はそのモノの形状や質感、温度を体感できる。

さらに、これら触覚伝送モジュールの研究により得られた成果を活用し、トレイグジスタンスロボット TELESAR VI¹²⁾が開発されている。TELESAR VIはヒトに近い67自由度を有しており、10指すべてにおける力と振動、温度の伝送が可能となっている。このロボットは、遠隔地における自分の新しい身体として操作可能であり、高い臨場感が得られる。

2.3 触覚伝送のこれから

トレイグジスタンス技術は事業化が加速しており、2017年にTELEXISTENCE株式会社が、2020年にはavatarin株式会社が設立している。トレイグジスタンスの普及に伴い、触覚伝送技術の必要性も増している。人は「触れる」ことで対象の存在を確認し、器用な把持操作が可能となる。さらに「触覚」には情動的な側面¹³⁾が知られており、触れることで相手に対する信頼を示し、触れられることで安心感を得られる。また、幼少期における触れ合いは精神的な発育に影響することも指摘されている。このような触覚の特徴から、触れ合いが可能な遠隔コミュニケーションは、離れて生活する家族や友人、仕事仲間などにとって実現が切望される技術である。また、本稿の執筆時期はCOVID-19の影響により直接会うこと、触れることが制限されており、同様の状況は今後も継続・再発する可能性がある。こうした人類に降りかかる問題を乗り越え、ヒトに欠かせない「触れ合い」を維持するために、触覚伝送技術のさらなる進展が望まれる。

3. 接触対象を認識する

触覚伝送において記録装置として活用されていた触覚センサは、それ単体としてユーザインタフェースへ応用されている。代表的な応用は、第2回¹⁾の講座において「物体の操作」、「接触の検知」、「物体の識別」の3分類が紹介されている。これらは主に触覚センサをロボットへ搭載する用途であり、ヒトの生活を支援するロボットやロボットによる製品の定量評価など、多様な用途が期待される。またロボット以外の用途として「入力インタフェース」や「生活の記録」が挙げられる。これら二つについて紹介する。

3.1 入力インタフェース

触覚を用いる入力インタフェースは、電子機器のボタンやコンピュータのキーボードなど複数存在する。近年ではタッチパネルの接触センサが代表例に挙げられる。これら入力インタフェースに最新の触覚センサの技術を用いることで、人と電子空間とのインタラクションが多彩になる。例えば、3次元力分布などリッチな情報を検出する触覚センサ技術を入力インタフェースに採用すれば、電子空間内の物体を優しくつまむ、強くひねるなどの操作が可能になる。

さらに、触覚センサの技術を用いることで、生活空間に

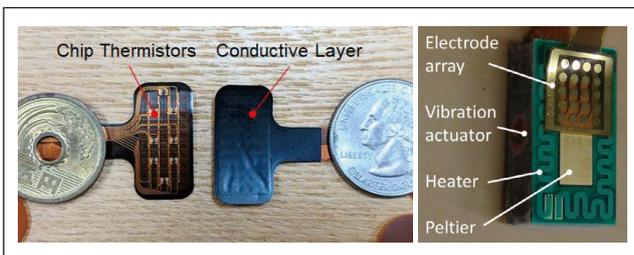
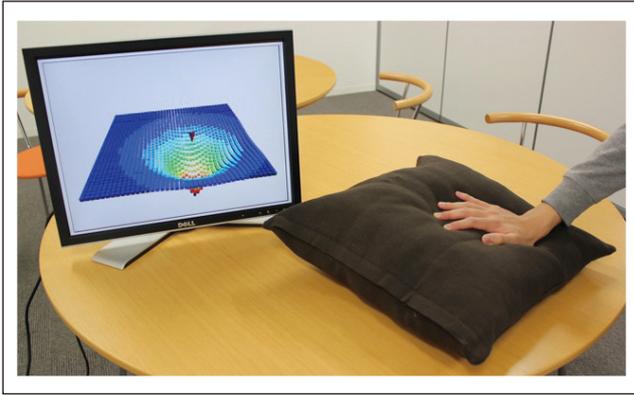


図2 触覚計測モジュール(左)と提示モジュール(右)⁹⁾¹¹⁾



図3 触覚伝送グローブの使用例¹¹⁾

図4 クッション型インタフェース¹⁴⁾

あるクッションやソファなど柔軟物を入力インタフェースに変化させる¹⁴⁾ことが可能である。図4はクッション型インタフェースの例である。赤外LEDを用いた近接触覚センサ技術を応用し、計測部をクッションの中心部に搭載することで、クッションの柔軟性を保ったまま入力インタフェースとすることを実現している。

3.2 生活の記録

触覚センサをウェアラブルデバイスとして、日常的な生活に関わる情報を取得するライフログとしての用途がある。触覚に関わる情報は、視覚情報や聴覚情報に比べ個人のプライバシーを保つことができ、また情報処理も容易という利点がある。

一例として、爪に圧電素子を装着し、人が物体に触れた際に生じる振動を記録するインタフェース¹⁵⁾がある。記録された振動から、扉の開閉や歯磨きなどの行動を識別できる。鍵の締め忘れの防止や、行動履歴の管理による高齢者の生活支援などへの活用が期待できる。

手指のみならず足裏の触覚情報の記録にも価値がある。例えば、足裏の圧力分布を計測し姿勢制御を評価するスマートインソール(図5)^{16) 17)}がある。足裏7箇所を計測可能なインソールにより、転倒リスクや歩行軌跡の評

図5 スマートインソール(左)と使用例(右)^{16) 17)}

価が可能である。高齢者の行動識別や歩行支援、足部手術後の患者の生活管理などへの活用が期待できる。

4. 心と身体を拡張する

ヒトにバーチャルな触覚を知覚させる触覚ディスプレイ技術は、スマートフォンやゲーム機などのユーザインタフェースとして欠かせない存在となっている。例えばスマートフォンでは、着信があった際に、画面を見ることなく、また周囲に着信音を鳴り響かせることなく応答できる。このように、触覚ディスプレイは情報フィードバックとしての応用が進んでいる。情報のフィードバックは、コンピュータ端末のみならず、人の活動を支援する目的で用いられている。また触覚刺激はヒトの情動に働きかける性質が指摘されており、これを活用することで新しいユーザインタフェースの可能性が期待されている。本稿では、触覚ディスプレイの応用事例として「感覚代行・障害者支援」、「身体の拡張」および「情動性の拡張」の三つを紹介する。

4.1 感覚代行・障害者支援

感覚代行は、視覚や聴覚に関わる刺激を、触覚を通して人に知覚させる技術である。カメラやマイクなどの視覚や聴覚情報の計測装置と、情報フィードバックとしての触覚ディスプレイを組み合わせることで実現できる。触覚刺激を用いることで、障害のない他の感覚による外界認識を阻害することなく、必要な情報を障害者に対してのみ直感的に伝えることが可能となる。

例えば、視覚代行システムのオーデコ^{18) 19)}(EyePlusPlus社)は、視覚情報を電気刺激による圧の分布情報として使用者に知覚させる。頭部に搭載したカメラにより前方の様子を2次元画像として捉え、その画像を2値化することでヘッドバンドに搭載した電極マトリクスによる電気刺激信号に変換し、電極が接する額に提示する(図6)。使用者は顔を動かした際に、目の前に広がる光景を額の電気刺激パターンの変化として感じられるため、あたかも目が見えるような感覚を覚える。また、聴覚代行システムのオンテナ²⁰⁾(富士通)では、音の振幅をデバイスの振動の強度として感じることができる。これにより、聴覚の障害の有無に関わらず音楽のリズムやスポーツ観戦時の歓声などを楽しむことができる。

図6 オーデコ^{18) 19)}の電極部(左)と電気刺激により提示される刺激のイメージ(右)

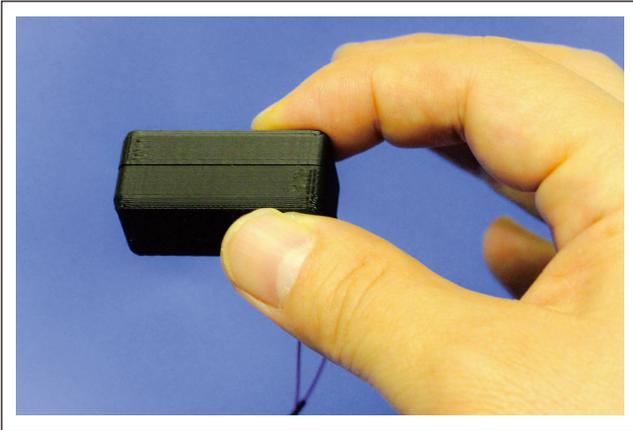


図7 ぶるなびの使用例²¹⁾

障害者支援という観点からは、視覚障害者の歩行誘導を支援する把持型の装置ぶるなび²¹⁾ (図7, NTT)がある。ぶるなびは、ヒトはゆっくりな動きを知覚しにくいという知覚の非線形性を利用している。一方方向に強くすばやく、反対方向に弱くゆっくりと振動する装置を把持すると、強くすばやく動く向きに牽引力を錯覚する。この技術を発展させることで、装置を把持した使用者を任意の方向に牽引できる。ぶるなびをGPSや地図情報、各種センサと組み合わせることで、視覚障害者が一人で移動する際に目的地まで誘導できる。

また、頭部への圧迫刺激によって引き起こされる頭部回旋運動(ハンガー反射)を活用し、頭部の向きを任意に変化させるインタフェース^{22) 23)}が開発されている。頭部の向きは歩行の向きに関連するため、歩行誘導への応用が期待できる。また、痙性斜頸の治療に応用した事例もある。

4.2 身体の拡張

触覚ディスプレイの技術は、人の感覚を増強するAR (Augmented Reality: 拡張現実感)のインタフェースとしても活用できる。得られる感覚を増強する、実際には触れられないモノを感じる、触れたモノの性質を異なるものを感じる、などが可能となる。例えば、爪の上に振動子を装着し、物体表面をなぞる際に爪上の振動子を駆動させるインタフェース²⁴⁾がある。このとき振動は指腹部において知覚され、物体表面がなめらかであっても凹凸があるように感じられる。同様のことは温冷覚でも可能である。指腹部で物体に触れる瞬間に、指側面に対し温冷刺激を与えた場合、その物体をより温かく/冷たく感じられる²⁵⁾。

電子的に駆動するディスプレイを用いない触覚のARも提案されている。触覚コンタクトレンズ²⁶⁾ (図8)は、この原理を利用して凹凸面の知覚を増強させるシートである。薄いシート状の台座に数mmの大きい差の突起が並んだ構造になっている。突起面に皮膚を当てて物体の表面をなぞると、直接触れてもわからない微細な突起を検出することができる。この触覚コンタクトレンズは、メリヤス編みの軍手をはめると凹凸を見つけやすくなるという現象か

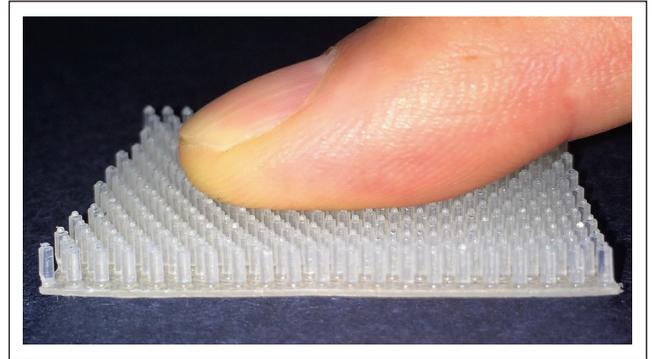


図8 触覚コンタクトレンズ²⁶⁾

ら着想を得ている。

触覚ディスプレイを利用したARは、手で触れた感覚の拡張にとどまらない。Chewing JOCKEY²⁷⁾と呼ばれるシステムでは、食品を咀嚼する音を記録し、フィルタをかけたうえで骨伝導ヘッドフォンにより使用者にフィードバックすることで、食感を変化させる。例えば、ポテトチップス咀嚼時にハイパスフィルタの通過音をフィードバックすることで、より新鮮なパリパリ感を味わうことができる。

4.3 情動性の拡張

触覚刺激の特徴として、情動的な性質がある。人は柔らかく温かい人やモノに触れることで安心感が得られる。また、身体への触刺激が人の行動や判断に影響を及ぼすことも指摘されている。例えば、人は身体に温かい刺激を与えられると、初対面の人の印象をポジティブに評価し、利他的に行動する傾向がある²⁸⁾。こうした触感の情動的な特徴に着目したインタフェースが考えられる。

触覚刺激を用いて情動を拡張するインタフェースとしては、音楽鑑賞と組み合わせた例がある。音楽鑑賞はそれ自体が情動的な体験であるが、これに適切な触覚刺激を付与することで、その体験が増強されると期待される。これまで、耳介に対して音響に応じた振動刺激を提示するインタフェース²⁹⁾ (図9:左)や、耳介の前方部に音楽の印象に応じた温冷刺激を提示するインタフェース³⁰⁾ (図9:右)が提案されている。

また、精神的な疾患の患者の支援インタフェースとして

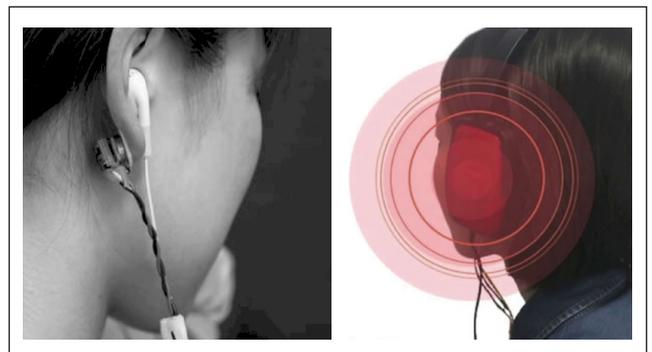


図9 振動刺激²⁹⁾ (左)と温冷刺激³⁰⁾を活用した音楽の情動性拡張インタフェースの使用イメージ

の活用がある。Tjacket³¹⁾ (TWARE社)は、自閉症などの子供をサポートするジャケットである。自閉症などの子供が落ち着かないときやパニックを起こしたとき、抱きしめられると安心感が得られ症状が緩和することが知られている。Tjacketはこの抱きしめによる効果に着目しており、内蔵されたエアポケットが膨らむことで着用者に圧迫刺激を与え、着用者を落ち着かせることができる。

5. むすび

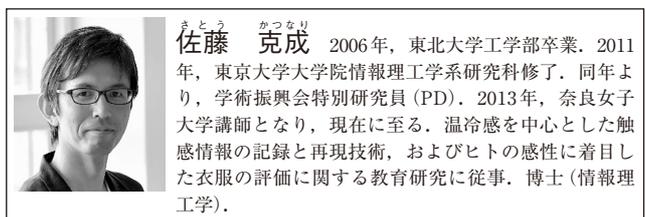
ヒトにとって触覚は、外界を認識し適切な行動を取るため、また外界との繋がりを確かなものとし、精神的な安定をもたらす重要な役割を果たす。こうした触覚の特徴は、ヒトと電子空間を、さらに電子空間を介してヒトと現実空間を繋ぐインタフェースにおいて欠かせない要素である。触覚センサやディスプレイ技術は、視覚や聴覚の技術に比べ発展途上であり、新しい技術が次々に開発されている。こうした新技術を用いることで、触覚の特徴を活かした有益なインタフェースが実現されると期待する。

なお、触覚技術の応用分野を分析した研究成果が書籍³²⁾の一節にまとめられており、本稿で紹介した以外の応用分野について述べられている。触覚技術の応用に興味がある方はこちらも合わせて参照頂きたい。(2020年6月2日受付)

〔文 献〕

- 1) 田中由浩：“触覚センサ”，映情学誌，74，3，pp.526-531 (2020)
- 2) 牧野泰俊：“触覚ディスプレイ”，映情学誌，74，4，pp.643-648 (2020)
- 3) 館 暉，佐藤 誠，廣瀬通孝：“バーチャルリアリティ学”，工業調査会 (2010)
- 4) S. Tachi: "Tele-existence (1) Design and Evaluation of a Visual Display with Sensation of Presence, Proc. of the 5th Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators (RomanSy 84)", 2451254, CISM-IToMM, Udine, Italy (1984)
- 5) K. Sato, K. Minamizawa, N. Kawakami and S. Tachi: "Haptic Telexistence", 34th Int. Conf. On Computer Graphics and Interactive Techniques (ACM SIGGRAPH 2007), Posters (2007)
- 6) T. Kurogi, M. Nakayama, K. Sato, S. Kamuro, C.L. Fernando, M. Furukawa, K. Minamizawa, S. Tachi: "Haptic transmission system to recognize differences in surface textures of objects for telexistence", Proceedings of the IEEE Virtual Reality, pp.137-138 (2013)
- 7) JST ACCEL触原色に立脚した身体性メディア技術の基盤構築と応用展開，https://www.jst.go.jp/kisoken/accel/research_project/ongoing/h26_05.html
- 8) M. Nakatani, K. Sato, Y. Kawana, D. Takai, K. Minamizawa and S. Tachi: "A novel multimodal tactile module that can provide vibro-thermal feedback", AsiaHaptics2016, 82F-1 (2016)
- 9) 梶本裕之，佐藤克成，外山敬三，吉原秀和：“感圧導電シートとチップサーミスタを用いたグローブ型圧力・温度分布計測センサの開発”，電気学会研究会資料 (2019)
- 10) 田島優輝，加藤史洋，井上康之，館 暉：“力・振動・温度を触原色とする触感提示デバイスにおける触感再現手法”，日本バーチャルリアリティ学論，24，1，pp.125-135 (2019.3)
- 11) V. Yem, H. Kajimoto, K. Sato, H. Yoshihara: "A System of Tactile Transmission on the Fingertips with Electrical-Thermal and Vibration Stimulation", Proceedings of HCI (2019)
- 12) 館 暉：“テレグジスタンスの研究 (第96報) - TELESAR VI: 67自由度を有するテレグジスタンスAVATARシステム-”日本

- バーチャルリアリティ学会第15回テレグジスタンス研究会 (2020)
- 13) 山口 創：“皮膚感覚から生まれる幸福”，春愁社 (2018)
- 14) Y. Sugiura, G. Kakehi, A. Withana, C. Lee, D. Sakamoto, M. Sugimoto, M. Inami and T. Igarashi: "Detecting shape deformation of soft objects using directional photorefectivity measurement", Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.509-516 (2011)
- 15) Y. Makino, T. Murao, T. Maeno: "Life log system based on tac-tile sound", Proceedings of EuroHaptics 2010, pp.292-297 (2010)
- 16) K. Nakajima, E. Anzai, Y. Iwakami, S. Ino, K. Yamashita and Y. Ohta: "Measuring gait pattern in elderly individuals by using a plantar pressure measurement device. Technology and Health Care", Official Journal of the European Society for Engineering and Medicine, 22, 6, pp.805-815 (2014)
- 17) E. Anzai, J. Tripette, K. Nakajima and Y. Ohta: "Comparative study between a novel 7-sensor plantar pressure measurement insole and the F-scan device". 2020 IEEE 2nd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech), pp.339-342 (2020)
- 18) H. Kajimoto, Y. Kanno, S. Tachi: "Forehead Electro-tactile Display for Vision Substitution", Proceedings of EuroHaptics 2006 (2006)
- 19) オーデコ，<http://www.eyepius2.com/>
- 20) ONTENNA，<https://ontenna.jp/>
- 21) T. Amemiya and H. Gomi: "Distinct pseudo-attraction force sensation by a thumb-sized vibrator that oscillates asymmetrically", in Proc. of Eurohaptics 2014 (2014)
- 22) 佐藤未知，松江里佳，橋本悠希，梶本裕之：“ハンガー反射-前側頭部圧迫に誘発される頭部回旋運動-”，日本バーチャルリアリティ学論，19，2，pp.295-301 (2014)
- 23) 相場彩子，旭 雄士，梶本裕之，佐藤未知，大山彦光，平 孝臣，林 明人：“携帯筋電計の音フィードバックを用いた痙性斜頸に対するボリヌス治療およびハンガー反射の応用”，日本運動障害研究会機関誌，24，1，pp.13-18 (2014)
- 24) 安藤英由樹，渡邊淳司，稲見昌彦，杉本麻樹，前田太郎：“Augmented Realityのための爪装着型触覚ディスプレイの研究”，信学誌D-II，情報・システム，II-パターン処理J87-D-II，11，pp.2025-2033 (2004)
- 25) K. Sato: "Augmentation of Thermal Sensation on Finger Pad using Stimuli for Finger Side", Proceedings of EuroHaptics2016, pp.371-379 (2016)
- 26) R. Kikuuwe, A. Sano, H. Mochiyama, N. Takesue and H. Fujimoto: "Enhancing haptic detection of surface undulation", ACM Trans. On Applied Perception, 2-1 46/67 (2005)
- 27) 小泉直也，田中秀和，上間裕二，稲見昌彦：“Chewing JOCKEY：咀嚼音提示を利用した食感拡張装置の検討”，日本バーチャルリアリティ学論，18，2，pp.141-150 (2013)
- 28) L.E. Williams and J.A. Bargh: "Experiencing Physical Warmth Promotes Interpersonal Warmth", Science, 322, 5901, pp.606-607 (2008)
- 29) 福嶋政期，粟生馨奈子，中田明日香，梶本裕之：“心動：音響に同期した耳介への触刺激による情動の増幅”，日本バーチャルリアリティ学論，19，4，pp.467-476 (2014)
- 30) S. Akiyama, K. Sato, Y. Makino, T. Maeno: "ThermOn, a Thermo-musical Interface for an Enhanced Emotional Experience", Proceedings of ISWC2013 (Sep. 2013)
- 31) Tjacket，<https://www.mytjacket.com/>
- 32) 下条 誠，前野隆司，篠田裕之，佐野明人：“触覚認識メカニズムと応用技術-触覚センサ・触覚ディスプレイ-【増補版】”，S&T出版 (2014)



佐藤 克成 2006年，東北大学工学部卒業。2011年，東京大学大学院情報理工学系研究科修了。同年より，学術振興会特別研究員(PD)。2013年，奈良女子大学講師となり，現在に至る。温冷感を中心とした触覚情報の記録と再現技術，およびヒトの感性に着目した衣服の評価に関する教育研究に従事。博士(情報理工学)。

映像コンテンツと連動した触覚情報提示

正会員 高橋正樹[†]

1. まえがき

4K8K放送に代表される映像の高品質化により、映像メディアの臨場感は飛躍的な向上を見せている。また近年のAR・VR技術の進展により、ユーザーがあたかもその場にいるような没入感を得られるサービスが人気を集めている。今後は、従来の2次元映像コンテンツだけでなく、3DテレビやAR・VRなどの多彩なコンテンツを家庭でもさまざまなデバイスで視聴できるようになると予想される。多様な視聴スタイルに対応可能な未来のメディア技術をNHK放送技術研究所では「ダイバースビジョン」と呼び、実現に向けた研究開発を進めている¹⁾²⁾。ダイバースビジョンは、SHVなどの2Dテレビだけでなく、3DテレビやAR・VRなどの技術により映像メディアを革新し、“表現空間を拡張”したサービスを提供する未来のメディア技術である。

ダイバースビジョンが伝える情報として、従来の視覚・聴覚情報以外にも、触覚や嗅覚などの五感情報が検討されている。中でも触覚は、没入感や臨場感を向上する次世代メディアの情報として大きな注目を集めている^{3)~5)}。例えば、ソニー株式会社では、触覚と視覚聴覚との相互作用(クロスモーダル効果)によって情報を強化し、映像音響だけよりもイマーシブな体感を付与するサービスを展開している⁶⁾。放送やインターネットで触覚情報を配信し、さらにそれを蓄積して自由に再現できるようになれば、新たな情報を伝えるメディアとして大きな価値を持つと予想される。

図1は、ダイバースビジョンによる触覚情報提示のイメージである²⁾。特殊なグローブをはめたユーザーが、3Dテレビで視聴している動物の毛並みの感触を楽しむ様子を示している。このように、映像に加えて被写体の材質、温度、硬軟に至るまでの触覚情報を提供することで、映像を現実のように体感することが可能になると予想される。

触覚情報提示は、将来の3DテレビやAR・VRのみならず、従来の2次元映像に対しても、ユーザーの視聴体験を高

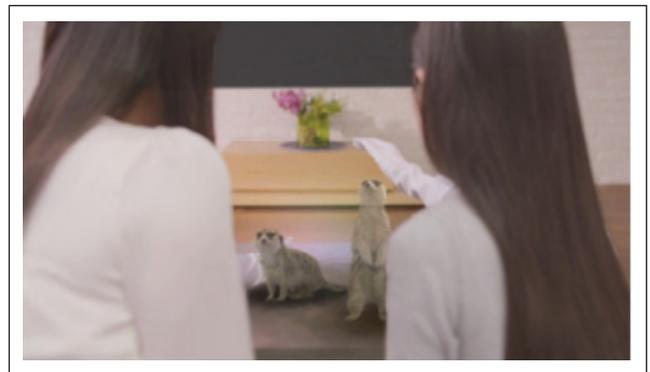


図1 ダイバースビジョンによる触覚情報提示のイメージ

める効果があると考えられる。NTTコミュニケーション科学基礎研究所では、振動デバイスを装着したソファやクッションとともに映像コンテンツを視聴する「触感TV」を提案している⁷⁾。また、慶応義塾大学では、バスケットボールの試合会場床面の触感情報を遠隔地に伝送するシステムを構築し、その効果を実試合で検証している⁸⁾。このように、映像と連動した触覚刺激を提供することで、臨場感や没入感を向上させる試みが各所でなされている。

臨場感・没入感の向上に加え、適切な刺激を適切なタイミングで提示することにより、触覚情報でコンテンツの内容を伝えることも可能である。特に、視覚に障害がある人や映像情報の取得に不便を感じている人にとって、触覚刺激による情報保障は有益である。視覚障がい者や聴覚障がい者を含むあらゆるユーザーが楽しめるユニバーサルな映像視聴サービスの実現を目指す上でも、触覚提示技術の果たす役割は大きい⁹⁾¹⁰⁾。

体性感覚の一つである触覚は、体への刺激を即座に脳へ伝えるため、情報伝達のスピードが必要となるジャンル映像視聴のサポートに適している。そこでNHK放送技術研究所では、刺激の変化や動きを瞬時に伝えられる触覚の特徴を生かし、映像コンテンツの中でも言語化した場合に発話が間に合わない、スポーツ映像の状況変化を触覚で伝えるための研究開発を進めてきた¹¹⁾。一般に、映像情報と連動して触覚デバイスを振動させることで情報を補ったり、リアリティを向上させたりする試みが、家庭用ゲーム

[†] NHK 放送技術研究所

"Introduction to Haptic Technology: Exploring a methodology for human interface through the sense of touch (5); Haptic Information Presentation Linked with Video Content" by Masaki Takahashi (Science & Technology Research Laboratories, NHK, Tokyo)

機などで長年採用されている^{12) 13)}。

われわれは、この2次元映像コンテンツと連動した触覚情報提示を「体感メディア」と位置付け、その制作システムの開発を進めている。体感メディアは、視覚・聴覚障がい者への情報保障のみならず、あらゆるユーザに体感や臨場感を提供するユニバーサルなメディアとなり得る。また将来、3次元映像と触覚を組み合わせたダイバースビジョンサービスへと発展できる可能性がある。本稿では、状況が刻々と変化するスポーツ映像の試合状況を触覚情報で伝える体感メディア制作システムの紹介を通し、触覚提示技術を用いた新たなメディアのあり方を考察する。

2. 体感メディア制作システム

2.1 概要

放送は主に視覚・聴覚情報を伝えるメディアであるが、これらに触覚情報を加えることで、より詳細な情報を高い臨場感で伝える体感型の放送サービスを提供できると考えられる。さらに、触覚刺激を提供することで、視覚・聴覚障がい者の方々も映像コンテンツの内容を把握しやすくなる可能性がある。例えば、スポーツ映像でのボールの往来やバウンドの瞬間に触覚インタフェースを適切に制御することで、試合状況の直感的な理解をサポートできる。この映像コンテンツと連動した触覚提示を実現する「体感メディア制作システム」の処理の流れを図2に示す。

まず、RGBカメラやサーモカメラなどの画像センサや、圧力センサ、音声マイクなど、図2左に示すさまざまな方法で触覚情報を取得する。スポーツ中継のような生放送番組の場合は、触覚刺激の種類やタイミングに関する情報を自動計測することで、触覚情報をリアルタイムに取得できる。ボールやラケットにセンサデバイスを装着して触覚情報を計測することも可能であるが、センサデバイスの利用が難しい公式試合などでは、カメラ映像等の非接触センサを利用し、映像解析で触覚情報を取得する^{14) 15)}。

続いて、得られた触覚情報を図2中央に示す触覚エディタで編集する。触覚エディタは、映像コンテンツに同期する形で触覚情報を付与・編集可能なソフトウェアである¹⁶⁾。生放送以外の番組では、予め映像のタイムライン上で触覚

刺激を付与しておくことで、映像再生時に触覚デバイスを最適なタイミングで制御することが可能になる。生放送番組においても、触覚エディタを経由することにより、センサから得られた触覚情報をデバイス制御可能な信号へと変換できる。

最後に、図2右に示すさまざまな触覚デバイスを通し、視聴者へ触覚刺激を提示する。ボールの衝突タイミングや移動方向を表現可能なボール型^{17) 18)}、選手やボールの立体的な位置関係を表現可能なキューブ型^{19) 20)}、手先の自由度が保てるリストバンド型²¹⁾など、競技種目やコンテンツのジャンル、ユーザの好みに応じた触覚デバイスを使用することで、視聴者へ最適な触覚情報を提供する。これら専用の触覚デバイス以外にも、携帯電話やゲームコントローラの振動など、既存の汎用機器を用いた触覚情報提示も考えられる。

この映像コンテンツと連動した触覚情報提示は、視覚・聴覚障がい者を含むあらゆる視聴者が利用できるユニバーサルメディアとして期待されている。次節より、この体感メディア制作システムの構成要素である“触覚情報の取得”、“触覚刺激の生成・制御”、“触覚刺激の提示”についてそれぞれ解説する。

2.2 触覚情報の取得

始めに、さまざまな触覚センサを利用し、提示すべき触覚刺激の種類、タイミングなどに関する情報を取得する。本節では、一例として映像解析による卓球のショットタイミングの検出手法を紹介する。映像中のショット動作を検出し、ボールを打った選手を認識することで、卓球競技のラリーの様子を触覚刺激で表現することが可能になる。

(1) 人物の姿勢計測

まず、競技映像に対してフレームごとに骨格検出アルゴリズムを適用し、画像内の選手の関節位置を取得する。深層学習アルゴリズムを用いることで、奥行き(デプス)情報等を含まない通常のカメラ画像から、人物の骨格位置を計測することが可能である^{22)~24)}。図3に卓球画像から検出

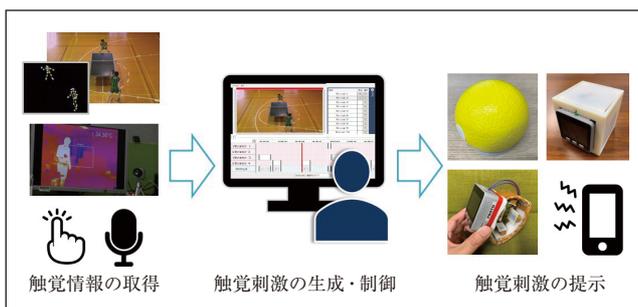


図2 体感メディア制作システムの処理の流れ

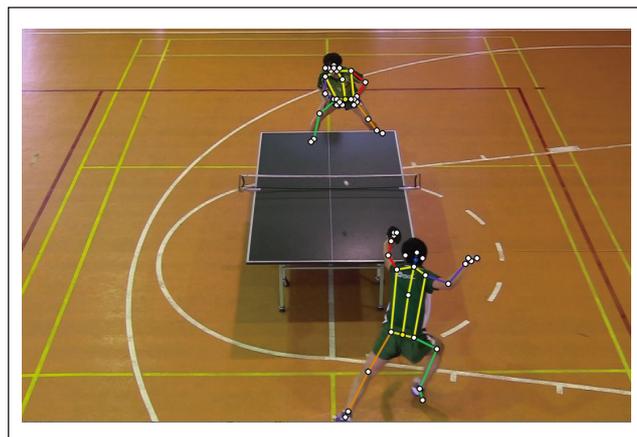


図3 卓球画像からの骨格検出例

した骨格の例を示す。

(2) 選手識別

各人物領域が包含する特徴点のオプティカルフローは時間情報を含むため、一般に動作認識に有効に作用する²⁵⁾。しかし、骨格検出は静止画単位で処理されるため、隣接フレーム間での骨格の対応付けは行われず、関節のオプティカルフローが得られない。そこで、関節点周辺の画像情報に基づいて各選手を識別し、選手ごとの骨格情報を取得した。

具体的には、各関節点の位置、外接矩形のサイズ、矩形内のテクスチャ情報を抽出し、これらの特徴量を基に追跡対象である選手を識別した。卓球競技の場合、撮影画角の中で選手位置が制限されるため、位置に関する情報が識別に有効に作用した。この識別処理により、隣接フレームでの骨格の対応付けが可能となり、選手ごとの関節のオプティカルフローを作成できる。

(3) 軌跡特徴に基づく動作認識

時間軸の特徴量を含む“動作”の認識には、位置情報の履歴である軌跡データの利用が効果的である^{26) 27)}。そこで、前述の骨格位置の推移から各関節点の軌跡を作成し、選手の動作情報を含む画像を作成した。この際、過去のフレームにおけるオプティカルフローほど輝度を下げて軌跡を描画することで、1枚の静止画像に時間軸の情報を表現した。図4に卓球選手の関節軌跡の例を示す。手前側(画像下)選手の関節軌跡を白線、奥側(画像上)選手の関節軌跡を赤線で示している。

このように、選手ごとの動きを軌跡画像として表現し、深層学習アルゴリズムで学習することで、ショット動作を自動検出する識別器を作成した。学習用映像からショット動作時の軌跡画像(正例)と、ショット動作時以外の画像(負例)を抽出し、教師あり学習を行った。新たに入力された映像に対しても、同様の手順で軌跡画像を作成することで、ショット動作を検出することが可能である。

われわれが開発したシステムにおいては、4K 2160pの映

像を入力として、約20 frames/secondの処理速度でショット動作を認識できている。撮影カメラのフレームレートには及ばないものの、触覚情報の取得には支障のない処理速度である。ショット動作の検出においては、7~8割程度の認識精度が得られた。スマッシュのような典型的なショット動作は高い精度で検出できるものの、カットのような小さなショット動作に対しては見逃すケースが散見された。軌跡特徴量の改善など、今後さらなる認識精度の向上を検討する。

2.3 触覚刺激の生成・制御

前節で述べた映像解析により、触覚刺激の種類やタイミングを自動計測する。しかし、自動計測した触覚情報には誤検出も含まれるため、生放送以外の番組に対しては、触覚エディタを用いて触覚情報を修正する。

触覚エディタはWindows PCで動作するソフトウェアである。図5に示すように、映像編集ソフトウェアのような外観をしており、映像のタイムライン上に各種触覚刺激を配置することができる。登録された触覚デバイスごとに編集画面が用意されており、デバイスの各アクチュエータ(振動子やモータなど)の動作タイミングや制御内容を指定する。

例えば、次節で述べるキューブ型触覚デバイスには立方体の各面に音声信号を入力とする振動子が装着されており、それぞれ独立に振動する。図では各面を振動させるタイミングや、割り当てた触覚刺激(音声信号)が表示されている。PC上のどの音声ファイルを何番の音声信号として割り当てるかは任意に指定でき、割り当てた音は編集中に再生して確認できる。一般的な映像編集ソフトウェアに近い、シンプルで理解しやすいインターフェースを備えており、番組制作に関わるユーザが負担なく編集できる。

編集したタイムライン上の触覚情報にしたがって触覚デバイスを制御することにより、触覚デバイスを持つユーザへ映像と同期した触覚刺激を提供できる。Wi-Fiや

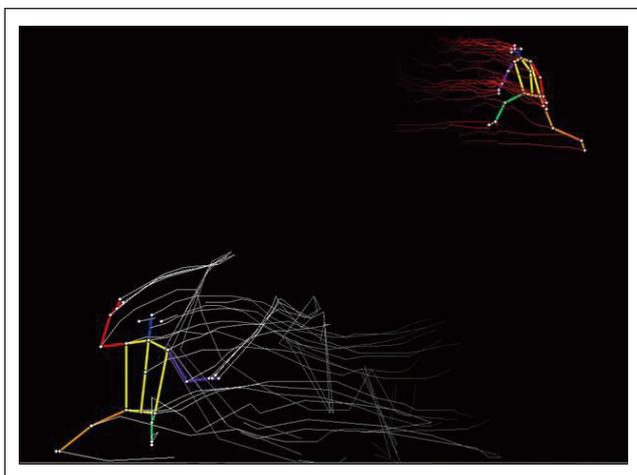


図4 卓球映像から抽出した選手の関節軌跡

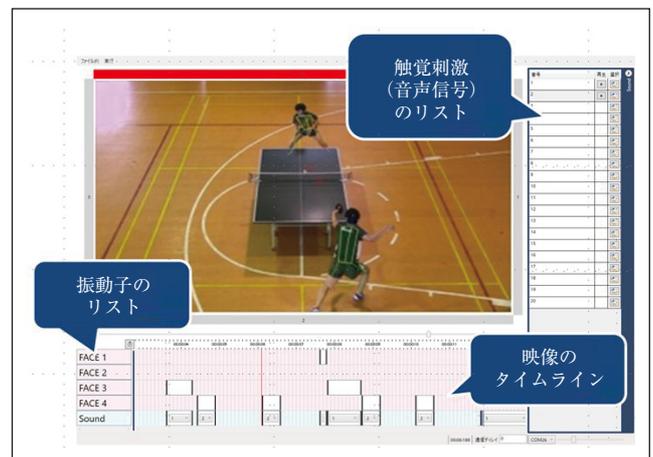


図5 触覚エディタのユーザインターフェース

Bluetoothに対応しており、触覚デバイスを無線制御することが可能である。

2.4 触覚刺激の提示

前述の触覚エディタを利用し、さまざまな触覚インタフェースを制御する。本稿では、当所で開発したボール型触覚デバイス、キューブ型触覚デバイスを紹介する。

(1) ボール型触覚デバイス

ボール型触覚デバイスは、主にスポーツ映像の球技を対象とし、ボールや選手が受ける衝撃や移動方向を伝える触覚インタフェースである¹⁷⁾¹⁸⁾。例えば、バレーボール映像のサーブやトス、スパイクのタイミングで触覚デバイスを動作させることで、試合状況をより直感的に伝えることが可能となる。図6にボール型触覚デバイスの外観を示す。

このボール型触覚デバイスは、直径70mmの球体のスポンジ製であり、振動子と二つのサーボモータを内蔵している。コンピュータからの音声信号を受信し、それに応じて衝撃を振動で提示する。また、左右のサーボモータの回転角度を制御し、ボールの側面が物理的に凸に膨らんだり凹にへこんだりすることで、衝撃の方向を表現できる。図7にボール型触覚デバイスの内部構造と動作概要を示す。衝撃の大きさを表す振動と同時に、ボールの側面を凹ませることで、ボールを把持しているユーザーに対し、ボールが衝撃を受けた後に飛んでいく方向を提示する。

視覚障がい者による評価実験を行ったところ、このデバイスを使用することで、試合の進行を視覚情報なしに一定程度理解可能であるとの結果が得られた。特に、アタック動作のタイミングを振動と音の大きさから把握することで、その後、ボールが相手コートに入って得点となったか、あるいは打ち返されたか、などの状況を予想可能になったことが、ユーザーの理解を助けたと考えられる。また、左右の手に一つずつボール型触覚デバイスを持ち、左手と右手にそれぞれのチームのサーブやレシーブの衝撃を提示することで、ボールの往来をより直感的に把握できることがわかった。これらの結果から、健常者がスポーツ映像を視聴

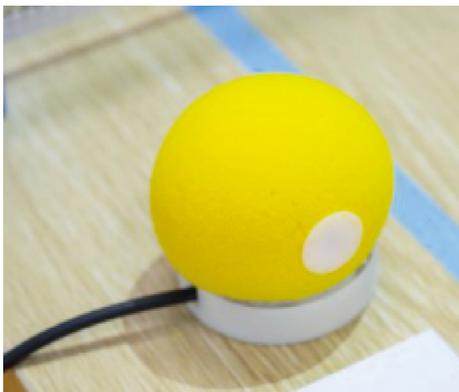


図6 ボール型触覚デバイスの外観

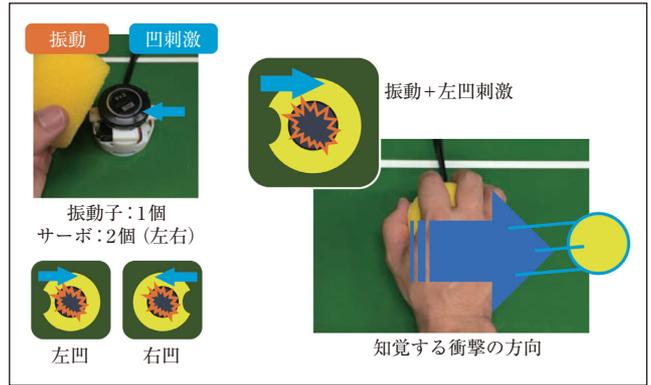


図7 ボール型触覚デバイスの内部構造と動作



図8 ボール型触覚デバイスの展示の様子

する際に抱く、試合進行への期待や緊張感などを、触覚デバイスにより視覚障がい者と共有できる可能性が見いだされた。このように触覚提示デバイスは、視覚障がい者や聴覚障がい者を含め、より多くの方々に映像コンテンツを楽しんでいただけるユニバーサルなデバイスになり得る。

また、このボール型触覚デバイスは、展示会などで多くの方々にご体験いただいた。図8に、ボール型触覚デバイスの展示の様子を示す。バレーボールの映像を視聴しながら、ボール型触覚デバイスから触覚刺激を受けることで、選手やボールが受ける衝撃やボールの移動方向を直感的に理解でき、映像視聴時の臨場感も向上した、とのコメントをいただいた。

(2) キューブ型触覚デバイス

キューブ型触覚デバイスは、図9に示すように立方体の形状をした触覚インタフェースである¹⁹⁾²⁰⁾。各面の内側に振動子が搭載されており、図10のように把持することで、それぞれの面の振動を感じることができる。映像の3次元的な位置情報や被写体の動きを、手元で感じることができるデバイスであり、スポーツのみならず幅広いジャンルの映像に適用可能である。

開発したデバイスは両手のひらに収まるサイズのキューブ形状(1辺74mm)とし、無線で制御可能とした。制御用のマ



図9 キューブ型触覚デバイスの外観



図12 キューブ型触覚デバイスの展示の様子

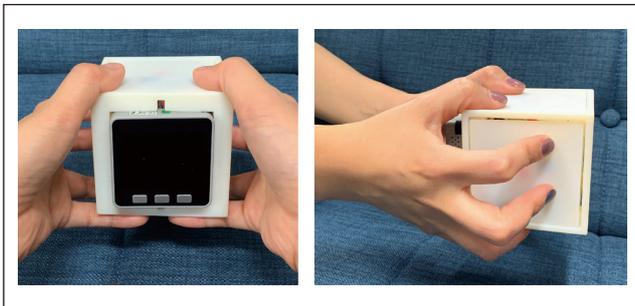


図10 キューブ型触覚デバイス把持の様子

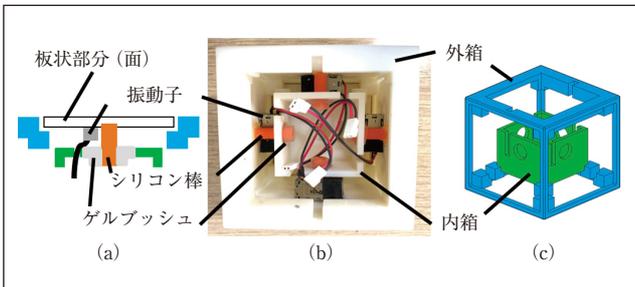


図11 キューブ型触覚デバイスの内部構造

マイクロコンピュータモジュール (M5 stack²⁸) がはめ込まれた面から見て、上下左右の面の内側にそれぞれ振動子が固定されている。振動子を制御するための信号はPCから無線通信でマイクロコンピュータモジュールに送信される。

キューブ型触覚デバイスの内部構造を図11に示す。このデバイスは各面が独立して振動できる機構を有している点が特長であり、どの面が振動しているかをユーザーが瞬時に識別できる。筐体は樹脂製で、内箱と外枠が一体化になった部品(図11(c))と、板状の各部品から構成されている。キューブの面となる板状の各部品は、内箱からゲルブッシュを介してシリコンゴムで支持されている。このように、面同士を直接接触させず、かつ面と内箱の接続に弾性体を使用し各面の動きを内箱に伝わりにくくすることで、振動させたい面以外の面への振動伝播を抑制した。

本デバイスの有効性を確認するため、被験者実験を通して評価した。まず、視覚情報がない状態で、映像コンテンツ中の被写体の移動方向が把握できるか否かを確認した。その結果、それぞれの振動面が独立して振動することにより、高い確度で被写体の移動方向を理解できるという結果が得られた。主観評価結果からは、視覚情報がない状態での触覚刺激は、ユーザーの想像力をかきたてる効果があることも示唆された。また、実験における体験者の好意的な反応から、この手法が映像コンテンツへの没入感向上に寄与する可能性があることも示唆された。

さらに、本デバイスを卓球の競技映像へ応用し、NHKサイエンススタジアムなどで展示を行った(図12)。映像中、画面手前のプレーヤーが球を打ったときにはキューブ型デバイスの前面、奥のプレーヤーのときには後ろの面、テーブルで球がバウンドしたときには底面を、それぞれ適切な振動パターンで振動するよう制御した。体験者からは、「触覚でボールの往來を理解できた」、「視覚に障がいのある方でもこれならわかるのではないかと」いったコメントをいただいた。キューブ型触覚デバイスも、視覚障がい者や聴覚障がい者を含め、多くの方々に映像コンテンツを楽しんでいただけるユニバーサルな触覚インタフェースと言える。

3. むすび

本稿では、当所で開発を進めている触覚提示技術の紹介を通して、映像コンテンツと連動した触覚情報を伝える将来のメディアについて考察した。具体的には、体感メディア制作システムの要素技術である、触覚情報の取得、触覚刺激の生成・制御、触覚刺激の提示に関する事例を紹介し、映像と同期した触覚提示の可能性を示した。本稿では主にスポーツ映像に関する事例を紹介したが、触覚提示技術はスポーツ以外のコンテンツにも広く応用できる。例えば、撮影現場の温度や風などの情報を提示することで、さまざまな映像コンテンツの臨場感を向上できると考えられる。

さらに、振動や圧力など複数の触覚刺激を適切に組み合わせることで、映像内の主要人物が知覚した手触りや衝撃を体感することも可能になると考えられる。視覚や聴覚に障がいがある方々が、映像コンテンツの内容を理解する上でも触覚情報は有効である。触覚センサや触覚デバイスには多くの可能性があることから、今後もさまざまな触覚技術が生まれることが予想される。触覚により臨場感や体感を向上させ、豊かな情報をユニバーサルに伝える技術の研究をさらに進めることにより、あらゆる人がメディアをより楽しめる環境を実現したい。

(2020年7月31日受付)

〔文 献〕

- 1) “NHK技研3か年計画(2018-2020年度)～Creation for 2020 and beyond～”, https://www.nhk.or.jp/str/vision/4_1.html
- 2) “技研公開2019 E1展示「2030～2040年ごろのメディア技術ダイバースビジョン」”, <https://www.nhk.or.jp/str/open2019/tenji/e1.html>
- 3) 半田: “触覚はメディアをどう変えるか”, NHK技研R&D, 176, pp.61-67 (Aug. 2019)
- 4) Y. Mizushima, C.L. Fernando, K. Minamizawa and S. Tachi: "Haptic broadcasting", In Proc. of EuroHaptics 2014, pp.466-468 (2014)
- 5) S. Tachi, K. Minamizawa, M. Furukawa, C.L. Fernando: "Haptic Media", in Proc. of International Conference on Artificial Reality and Telexistence, pp.145-150 (2013)
- 6) 大岸, 山本: “5Gによる感覚の伝送とUXへの期待”, ITUジャーナル, 50, 7, pp.3-9 (2020)
- 7) “触覚TV (Tactile TV)”, <https://www.nttcc.or.jp/ja/archive/works/tactile-tv-2019/>
- 8) 早川, 神山, 松園, 徐, 田中, 本山, 鈴木, 南澤: “触覚伝送を伴うバスケットボールのライブフィーリングの実践”, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 34E-06 (2018)
- 9) 渡辺, 岡野, 浅野: “ユニバーサルガイドライン”, NTT技術ジャーナル (2005)
- 10) T. Sakai, T. Handa, M. Sakajiri, T. Shimizu, N. Hiruma and J. Onishi: "Development of Tactile-Proprioceptive Display and Effect Evaluation of Local Area Vibration Presentation Method", JACIII, Vol.21-1, pp.87-99 (2017)
- 11) 近藤: “触覚への情報提示技術”, NHK技研R&D, 175, 解説02, pp.12-19 (May 2019)
- 12) F. Danieau, P. Guillotel, O. Dumas, T. Lopez, B. Leroy, N. Mollet: "HFX studio: haptic editor for full-body immersive experiences", in Proc. of ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST), pp.1-9 (2018)
- 13) M. Orozco, J. Silva, A.E. Saddik, E. Petriu: "The Role of Haptics in Games", Haptics Rendering and Applications, pp.217-234, 2012. DOI: 10.5772/32809
- 14) 高橋, 東, 半田, 佐野, 清水: “人物の姿勢解析に基づくスポーツ映像からの触覚提示情報抽出”, 映像学冬季大, 15B-3 (2019)
- 15) M. Kristan, et al.: "The seventh visual object tracking VOT2019 challenge results", in Proc. of the International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV2019 Workshop) (2019)
- 16) 東, 半田, 高橋, 清水: “編集機能付き触覚情報提示システムの開発”, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 21A-4 (2019)
- 17) 半田, 東, 清水, 近藤: “スポーツ中継を能動的に楽しむためのボール型ハプティックインタフェースの開発”, 第23回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 21A-5 (2018)
- 18) T. Handa, et al.: "Ball-type Haptic Interface System to Present Impact Vibration and Impact Points for Televised Ball-based Sporting Event", IEEE World Haptics Conference (WHC2019), TP1A.14, p.85-90 (2019)
- 19) 東, 高橋, 清水, 佐野, 半田: “キューブ型触覚デバイスを用いたStorytellingの試み”, 日本バーチャルリアリティ学会ハプティクス研究会, HAP04, pp.31-32 (2019)
- 20) 東, 半田, 清水, 近藤: “触覚による情報伝達のための振動キューブの開発”, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2D2-02 (2017)
- 21) M. Azuma, T. Handa, T. Shimizu and S. Kondo: "Hapto-band: Wristband Haptic Device Conveying Information", Lecture Notes in Electrical Engineering, 535 (3rd International Conference on Asia Haptics), Kajimoto, H. et al eds., Springer, D2A17 (2018)
- 22) Z. Cao, et al.: "Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields", <https://arxiv.org/abs/1611.08050>
- 23) A. Newell, Z. Huang, J. Deng: "Associative Embedding: End-to-End Learning for Joint Detection and Grouping", in Proc. of Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS) (2017)
- 24) "VisionPose", <https://www.next-system.com/visionpose>
- 25) M. Raptis, I. Kokkinos and S. Soatto: "Discovering Discriminative Action Parts from Mid-Level Video Representations", in Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.1242-1249 (2012)
- 26) P. Matikainen, et al.: "Trajectons: Action recognition through the motion analysis of tracked features", Workshop on Video-Oriented Object and Event Classification (ICCV) (2009)
- 27) H. Wang, A. Kläser, C. Schmid and C.L. Liu: "Action Recognition by Dense Trajectories", in Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.3169-3176 (2011)
- 28) "M5Stack. Modular Rapid ESP32 IoT Development Board - ESP32 dev kits & m5stack-store", 2020. <https://m5stack.com/>



高橋 正樹 1999年、慶應義塾大学大学院管理工学研究科修了。同年、NHK入局。山形放送局を経て、2002年より、放送技術研究所にて、画像認識や触覚提示技術の研究に従事。2013年、総合研究大学院大学複合科学研究科博士課程修了。博士(情報学)。正会員。

触覚技術の展望

正会員 半田拓也[†], 篠田裕之^{††}

1. まえがき

本講座の第1回が学会誌に掲載された2020年3月以降、新型コロナウイルスの脅威で世界の状況は一変した。国内外での行動が著しく制限されるなか、視覚情報と聴覚情報の伝達技術は、三密を避けなければならない社会における最低限のコミュニケーションを確保したと言えよう。はからずもコロナ禍の状況は、筆者らにとっても、触覚技術の必要性を改めて認識する機会となった。視覚情報や聴覚情報と同じように触覚情報を記録したり、伝送して再現したりする未来はくるだろうか。本講座の第1回¹⁾では、「触覚技術が現在の視覚技術や聴覚技術と同等以上のクオリティであったらどうか？ どのレベルに達すれば実用的と言えるか？」という問いを出発点とし、基本的な触覚の認識メカニズムについて解説した。第2回「触覚センサ²⁾」では、皮膚感覚を中心に触覚の情報取得に関する計測技術とその応用が論じられた。第3回「触覚ディスプレイ³⁾」では、振動や圧力の提示技術を中心に、人工的に触覚を提示する触覚ディスプレイの研究開発動向が解説された。そして、第4回「触覚技術のユーザインタフェースへの応用⁴⁾」では、触覚センサと触覚ディスプレイの応用として、触覚の伝送技術をはじめ、本講座の副題である「触覚インタフェースの可能性」を考える上で重要な事例が多数解説されており、第4回までで触覚技術入門としての本講座の役割は果たされたと考えている。

最終回となる本稿では、第5回「映像コンテンツと連動した触覚情報提示⁵⁾」で「映像メディア×触覚技術」の例として紹介された体感メディアの構想に続く未来の活用事例を考察する。また、前回までに解説された触覚技術の基本的な特徴や、研究開発事例、標準化などの動向をふまえ、あらためて触覚技術が持つ意味と今後の可能性を展望する。

[†] NHK 放送技術研究所

^{††} 東京大学

"Introduction to Haptic Technology: Exploring a methodology for human interface through the sense of touch (Final study); Technology Outlook of Haptics" by Takuya Handa (Science & Technology Research Laboratories, NHK, Tokyo) and Hiroyuki Shinoda (The University of Tokyo, Tokyo)

2. 触覚技術の活用事例とその可能性

触覚技術の活用事例を考える上で、本講座で各専門家が解説した要素技術の応用例や、期待を込めて述べられた将来の展望は非常に示唆に富んでおり、ぜひとも参考になりたい。以下では、一部を引用して議論の拠り所とするが、関連して紹介された個々の技術の詳細についてはぜひ学会誌を再度参照頂きたい。

触覚は、まさに人の全身の入出力を担っているインタフェースであり、日々の活動に不可欠な感覚である。つまり、「触覚」の活用事例は限りなく存在する。本稿の目的は、触覚技術の展望を考察することであるが、極論すれば、限らない触覚の活用事例の分だけ触覚技術のニーズや展望があるとも言える。強いて技術的な究極例の一つ挙げるとすれば、人の全身の触覚を完全に実装したロボットを想像することができるだろう。ロボットの目的に応じてどこまで必要かという議論はあるが、人が進化の過程で獲得した触覚は、人とともに、あるいは人の代わりに活動をするロボットにとって、ある意味で理想的なセンサとアクチュエータの集合体だと考えられる。本講座の2回で田中が解説した「完全触覚センサの十分条件⁶⁾」は、まさに人の触覚の時空間特性や皮膚の力学的な観点からまとめたものである。しかし、触覚技術の活用事例は、必ずしも人と同等の触覚を有するロボットの実現だけにはとどまらない。それ以外にも、人の社会的な活動に伴うさまざまなケースに応じて触覚技術は進展し、最適化されていくことが予想される。このあたりの用途に応じた触覚技術の製品化や研究開発の事例は、特に第3回と第4回の講座で幅広く解説されている。

ここでは、前回までに言及されたテーマのうち、特に映像情報メディアに関係する触覚技術の活用事例として、情動への働きかけ、ユーザインタフェース、そして、リアリティの向上について、活用事例と今後の可能性を考えるとしたい。

2.1 情動への働きかけ

触覚に関する最大の国際会議 IEEE World Haptics Conference 2019 (WHC 2019) では、「情動に直接働きかける

触覚」に関するワークショップが開催され、研究者の間で話題となった。本講座の第3回でも、WHC 2019における論文採択数で他を圧倒したFacebook社が関わる触覚研究の動向として、人の情動（喜びや悲しみなど）の伝達という活用事例を想定した複数の大変興味深い事例が報告されている。また、コロナ禍において、これまでは普通にできた握手やハグなどができない状況が続いていることにも言及し、そのような「できなくなってしまった触覚的なインタラクション」のバーチャルな実現が、今後触覚研究に求められることの一つになるかもしれないと述べられている³⁾。さらに、第4回「触覚技術のユーザインタフェースへの応用」では、人は、柔らかく温かい人やモノに触れることで安心感が得られることや、身体への触刺激が人の行動や判断に影響を及ぼすことを示唆する事例が紹介され、触覚技術が「情動性の拡張」に貢献する可能性が論じられている⁴⁾。個別の研究事例からは、触覚と情動との関係が、触覚技術の今後を考える上で外せない重要なテーマであることが伺える。むしろ、以降の内容はいずれも「情動への働きかけ」が本質的な意味を持っているといっても過言ではない。

WHC 2019では、喜びや悲しみなどの情動を伝える部位として、手首や前腕に刺激を提示する研究例が報告されている³⁾。また、人を安心させたくて肩に手を置いたり、子供の背中を優しくさすったりする例からもわかるように、「情動×触覚」のアプローチでは、身体のどの部位にどう刺激を提示するかということが重要になる。今後、さまざまなウェアラブルデバイスの普及が予想されるが、任意の身体部位に刺激を提示する方法として、例えば、2次元通信ウェア⁷⁾（図1左）は、複数のセンサや触覚振動子を、ウェアの任意の場所に用途に応じて配置することができる。これは、触覚技術の課題の一つであるデバイスの配線の問題を、2次元通信技術⁸⁾によって解決した例である。また、EnhancedTouch⁹⁾（図1右）は、人体通信技術を用いて、握手などの身体接触コミュニケーションを促進したり定量評価したりするためのプレスレット型デバイスである。身体接触を始めとしたコミュニケーションを不得手とする自閉症スペクトラム障害（自閉症）児の支援を目的に進められているプロジェクトであるが、コロナ禍で身体接触コミュニ

ケーションが著しく減少した子供たちのサポートや、ニューノーマルにおけるコミュニケーションのあり方の検討にとっても重要なアプローチだと考えられる。

2.2 ユーザインタフェース

サイエンスフィクション（SF）の世界では、静的なプロファイルはもちろん、リアルタイムの身体動作や周辺状況、さらには心理的な状態にいたるまで、ユーザのさまざまなコンテキストを解して自律的にサービスを提供するシステムがしばしば登場する。そして、急速なAI技術の進展もあり、これまでSFとして描かれていたユーザインタフェース（UI）の一部は実用化されはじめている。身近な例では、すでに一部のスマートフォンは、画面を注視した際の顔の特徴をユーザ認証に使用しており、音声による操作も実用的なレベルに達してきたと感じられる。

視覚と聴覚に関する技術には一日の長があり、画像処理技術や音声処理技術の応用が先行しているように思われるが、第4回で論じられた数々の触覚技術の応用例は、触覚インタフェースのさまざまな可能性を示唆するものであった。佐藤は、「ヒトにとって触覚は、外界を認識し適切な行動を取るため、また外界との繋がりを確かなものとし、精神的な安定をもたらす重要な役割を果たす」とした上で、このような触覚の特徴は、UIにとって欠かせない要素であると述べている⁴⁾。

現状の情報機器の操作や文字入力触覚インタフェースが主流であり、「いかに心地よく扱えるか」がシェアを大きく左右する要因の一つにもなっている。操作インタフェースにおける「心地よさ」の追求は、先に述べた「情動への働きかけ」に関わる部分でもある。また、デジタル化による圧倒的な利便性は誰もが認めるにも関わらず、書籍やホワイトボードをはじめとして、完全にはデジタル化されていないメディアやツールがまだ数多く残されている。これらが依然として広く使われている理由は、表示の解像度やコストの問題だけではないだろう。書籍であれば、記憶の定着や愛着などの情動にも少なからず影響するであろう紙の質感や、ページをめくるときの感触を再現するUIによって、電子化の利便性もあいまったまったく新たな読書体験を生み出すかもしれない。また、ピアノなどの楽器はそもそも繊細なタッチで表現に差が生じるが、近年の電子楽器の中には、柔らかい素材の鍵盤やパッドなどの触り方で多彩な表現ができるものもすでに登場している。今後、あらゆるデジタル化のシーンのUIにおいて、触覚技術の貢献が期待される。

近年のボードゲーム（アナログゲーム）ブームの背景にも、触覚によるインタラクションを考える上で多くのヒントが見え隠れする。例えば、50年以上前の「手探りゲーム」は、まさに触覚の特性を生かしたゲームであった。数年前にこれを復刻したタカラトミーは、「目や耳の不自由な友達と一緒に楽しく遊べるおもちゃ」を「共遊玩具¹⁰⁾」と呼んでユ



図1 2次元通信ウェア⁷⁾（左）とEnhancedTouch⁹⁾（右）



図2 ゲームマーケット2017の会場の様子

図3 空間共有コンテンツ視聴システムの利用シーン¹⁴⁾

ニバーサルなサービスを意識した活動を展開している。共遊玩具には、スイッチの状態や電池を入れる方向を触って確かめられるようにしたり、ミニカーなどの実物を模写した玩具をデフォルメせずになるべく実物と近い触感や形にデザインするなど、触覚を活用した工夫も多くみられる。図2は、2017年のゲームマーケット¹¹⁾の会場の様子である。はじめて参加した際、会場の熱気や、実際に触れるユニークな作品の数々、そして出展する人と参加者との議論の様子などが、デモ展示を必須とする国際会議 Asia Haptics¹²⁾のそれと同じものを感じられた。今年も楽しみにしていたが、残念ながら AsiaHaptics2020 (北京) とゲームマーケット2020 (大阪) は開催中止となった。現状ではオンラインで開催する意味が見いだせないということであろう。

図2(右)で参加者が試遊しているのは、見た目は同じで硬さが7段階で異なる駒を使い、指先の感覚を駆使して遊ぶレースゲームである。指の感覚を頼りに自身の駒を目的の硬さ(ゴールの城で待つ王子駒の硬さ)に近づけつつ、カードで他のプレーヤの硬さも変えて退けるといったシンプルなルールだが、触覚的な記憶による駆け引きが思わぬ展開を生む。せっかくの良きアナログ感をあえてデジタル化する必要性はともかく、いったいどんなUIがあればこれをバーチャルで実現できるだろうかと思像することは触覚技術の展望を考える意味でも楽しい。

2.3 リアリティの向上

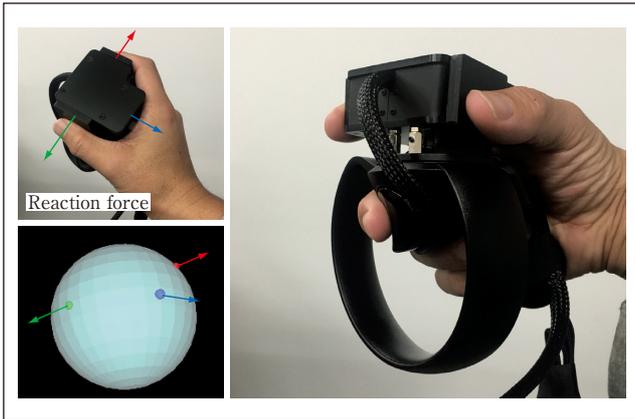
映画館やアミューズメントパークでは、最新技術による映像と音響に加え、揺れや風なども体感できるコンテンツが人気を得ている。第5回で紹介されたNHKのダイバースビジョン¹³⁾のコンセプトや体感メディア⁵⁾の実現に向けた取り組みは、将来の映像メディアにさらなるリアリティの向上をもたらす触覚技術の活用事例の一つである。特に次世代のメディアとして発展が期待されるAR (Augmented Reality) /VR (Virtual Reality) 技術は、3Dのオブジェクトがあたかも目の前の空間に存在するかのように表示することを可能にする。例えば、NHK放送技術研究所が開発した空間共有コンテンツ視聴システム¹⁴⁾(図3)では、ユーザの主観映像に、遠隔地にいる友人やコンテンツの出演者の3D映像が合成表示され、視聴覚的には、あたかも目の前の空

間にそれらが存在するかのように感じられる。このシステムは、ビデオシースルー型のヘッドマウントディスプレイ(HMD)を使用しており、AR表示はもとより、没入型のVR空間の表示においても、ユーザ自身の手や身体を見ることができる。このため、お互いに指差しやジェスチャなどを交えた自然なコミュニケーションが可能となっている。そして、ここからが本題であるが、このシステムを体験した人の多くは、二眼式の3D映像をはじめて見た子供がそうであるように、合成表示された出演者や友人に手を伸ばして触ってみようとするのである。一見すると当たり前に感じられるかもしれないが、この行動が意味するところを少し詳しく議論したい。

本講座の第3回で牧野は、「夢かどうかを確かめるために頬をつねる」事例を話のまくらに、触覚は「そこにある」ことを実感する感覚であることを指摘している³⁾。市販のHMDに付属するコントローラには振動機能が搭載されており、CGオブジェクトとのインタラクションに応じて振動による触感が提示される場合がほとんどである。近年は、振動型アクチュエータの性能改善により、振動によって感じられる触感のリアリティが格段に向上してきた。これもUIの一つであるが、映像コンテンツを能動的に操作するUIに触覚技術を搭載することで、体験全体のリアリティを高める事例としてここで特に取り上げたい。

図4は、市販のVR用のコントローラ(Oculus Touch¹⁵⁾)に付けるハプティックフィードバック用のアタッチメントの試作例である¹⁶⁾。約7mmのストロークを有する3組のアクチュエータが搭載されている。VR空間内のCGオブジェクトとユーザの手との干渉状態に応じて、振動だけでは表現が難しい反作用の力を、指と手のひら、あるいは指どうしの間に内力として提示する。また、VR用コントローラを持った手に対し、可視光のLEDで非接触に温感を提示するデバイスの研究¹⁷⁾では、VR空間内に提示された温泉や炎など、不定形で温度が高いオブジェクトがあるシーンのリアリティを高めるための、より安全な温感提示方法が検討されている。

最新のビデオゲームのプラットフォームでも触覚技術を効果的に利用する動きは顕著である。話題となったSwitch¹⁸⁾

図4 VRコントローラ用触覚アタッチメントの試作例¹⁶⁾図5 リングコン¹⁸⁾ (左)とDualSense¹⁹⁾ (右)

のJoy-Con (HD振動) やリングコン (図5左) は、すでに多くの方が体験済みであろう。続くPlayStation 5では、新型コントローラのDualSense¹⁹⁾ (図5右) というネーミングからもその意気込みが伺えるが、車が泥道を走るときの重いずっしりとした感触や、弓矢を引き絞るときのような感覚を実感できるハプティックフィードバック技術が使われているとうたわれており、注目されている。もちろん、実際に体験するまでその真価の程がわからないのが触覚技術の「お約束」である。ハンズオン映像での見せ方も工夫されており大変興味深い。本稿の執筆時点では発売前で筆者も未体験である。なお、コンテンツのコンテキストや視聴覚刺激との相互作用によるクロスモーダル知覚²⁰⁾によって、想起される触感や体験は大きく影響を受けることが知られており、特に総合的な体験のリアリティに関しては、必ずしもコントローラ単体で評価できるものではないことを念のため付け加えておきたい。

今後、AR/VRをはじめ、さまざまな映像表現技術の登場が期待されるが、やはり目で見たモノに触れたり、あるいは触れられたりしたとき、その体験のリアリティが格段に向上するのは間違いない。例えば、現時点においてこの種のリアリティの違いを体験できるシステムとしてABAL²¹⁾がある。これは、マーカを付けたリアルオブジェクト(剣、盾、銃などのモックアップ)を、リアルタイムにトラッキングしてHMDにCG表示することで、VR空間内で触覚的にも実体を伴うCGオブジェクトを取り扱うこと

ができるシステムである。フルCGの完全没入型のVRであるが、体験者どうして握手などのインタラクションが可能である。加えて、CGで表示されている架空の人物のキャラクターを、実際にマーカを付けた人間がその空間で演じることにより、実体を伴わせることもできる。CGだと思っていたゾンビに本当につかまれたときの驚きは想像に難くない。

将来的には、映像情報メディアのリアリティを向上させる触覚技術の進展により、遠隔地の人やオブジェクトとの触覚を介したインタラクションが実現されることが期待される。ただし、触覚によるインタラクションを考える際には、文字通り相互に「触れる/触れられる」という現象が同時に生じるということが、体験に重要な意味を持つ点に注意が必要である。この本質的なところをいかに実現する技術やサービスとなるかが最終的には試されるであろう。

3. 触覚技術のこれから

3.1 標準化の必要性

2章では、将来展望を語る目的で少し概念的に触覚技術の活用事例を考えた。しかし、より具体的なサービスやシステムを想定してユースケースを考えれば、例えば「触覚情報付きコンテンツの放送」や「手触りが確認できるオンラインショッピング」などのコンセプトからはじめ、技術の要求仕様が議論できる程度には、サービスの目的や範囲、想定するクオリティ等を限定する必要がある。そして、個々の活用事例を具現化して広くサービスを提供するために、ユースケースを詳細に規定して技術をあらかじめ標準化することが望ましい場合がある。いわゆるデジュールスタンダードのアプローチであるが、これを進めるためには、各種のサービス事業者やデバイスを開発するメーカーなどが集まり、触覚技術のユースケースを具体的に検討して議論する必要があるだろう。

現在は、アプリケーションごとに設計されたさまざまな形態のハードウェアが混在しており、刺激を提示する身体の部位も多様である。映像や音楽と同様に、標準化によってコンテンツを共有することができれば、利用者と提供者の双方にとって大きなメリットがあると考えられる。

3.2 触覚技術の実用性

視覚情報におけるカメラと映像ディスプレイや、聴覚情報におけるマイクとスピーカのように、触覚情報を汎用的に入出力できるデバイスはまだない。つまり、現時点でデファクトスタンダードと呼べる技術はないと言えるだろう。この理由として、視覚であれば三原色、聴覚であれば周波数、というように感覚の基底となる情報や方法論が十分に明らかにされていないこと、そして、触覚には複数の物理情報が関与し、デバイス実装が困難なことが指摘されている²⁴⁾。これらの課題に対する直接的な研究アプローチは、主に第4回で解説されている。

例えば、視覚的な文字情報であれば、漢字を含めても1文字あたり少なくとも 8×8 ドットあれば多くの人にとって実用的であり、このタイプの電光掲示板も広く使われている。低解像度の白黒映像からスタートした映像伝送技術は、解像度や色再現などのパラメータを向上させることを概ね共通の技術目標として進展した。技術水準が向上する度に伝送できるコンテンツの幅が広がり、小型化やコストの低減も相まって、生活の隅々にまで普及するに至った。現在、2次元の映像伝送技術は、フルスペック8Kスーパーハイビジョンに到達している。

しかし、触覚の応用技術では、前述の理由からも、そのような一般的な技術的目標やパラメータを設定することが難しい。このため、アプリケーションや利用シーンを事前に特定した上で、その個別の目的を達成するように研究開発が進められてきており、しばらくの間はそのように進展していくと思われる。つまり、目的に応じて手が触れる共通の道具などがある程度特定することにより、課題を現実的なものとするアプローチである。

例えば、点字は、仮名1文字あたり 2×3 ドットの凹凸パターンを指で認識するための記号的な触覚情報であり、必要性和有用性は極めて高い。視覚障害者がテキストを読んだりコミュニケーションをしたりするための点字ディスプレイ(図6)は、メーカーだけでなく、ユーザを含む有志の個人やNPOなどによる草の根的な活動で相互の運用性を向上させてきた背景がある。NHK技研でもデータ放送や字幕の内容を点字ディスプレイに提示するデジタル放送受信機を2011年に開発している²²⁾。2018年には、USB-IF²³⁾(インプリメンターズ・フォーラム)により、点字ディスプレイ向けのUSB HID(ヒューマンインタフェースデバイス)規格が発表され話題となった。これで少なくとも点字を習得した人にとっては、PCやスマートフォンのUIとして日常的に使用できる技術になったと考えられる。



図6 点字ディスプレイ

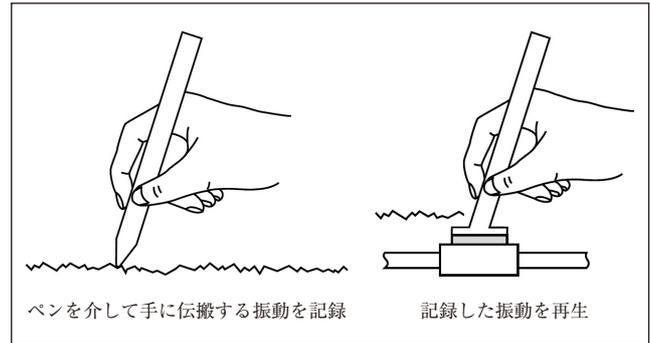


図7 ツールを介した振動触感の再現

一方で、点字の習得自体は容易ではないため、これがそのまま健常者も含む一般的な触覚デバイスの開発目標であった訳ではない。第3回で牧野が指摘しているように³⁾、点字が読めない健常者でも少ない訓練で文字情報を読み取れるようになれば、社会問題となっている歩きスマホの解決や、普及が予想されるARグラスにおける次世代のUIにつながる可能性もある。後天的な視覚障害の場合には、点字を読むことが難しい場合が多いのも事実である。これらのニーズに応えるためには、現在の点字ディスプレイの性能をそのまま向上させるというよりは、音声読み上げ技術と併用することなどを前提とした新たな目標設定と技術開発が必要になるであろう。

次に、触感を忠実に再現する実用技術を考えると、ペンやハサミ、テニスのグリップなど、直接手が触れるツールを限定することが当面は有効である。図7のように、接触対象から、ペンなどのツールを介して手に伝搬する振動を記録し、同じ素材のツールを介して再生することで、少なくともヒトが差異を許容できるレベル(モノによっては差異を検知できないレベル)で等価に再現することが技術的に可能である。例えば「触覚ペン」なるもので記録した触感を再生したり、遠隔地の「触覚ペン」同士で触感を伝送したりできる可能性があるということだ。TECHTILE toolkit²⁴⁾を利用したTECHTILEの活動は、このようなモノを介して伝達される振動触感の可能性を広め、おもしろいコンテンツや知見を数多く生み出している。また、前述したVRやゲームプラットフォームのコントローラでは、材質的に表現が限定される部分もあるが、映像と音響を駆使して剣や弓などのツールをユーザに想起させ、振動触感を効果的に利用している。上記のペンはあくまで一例であるが、仮に「触覚ペン」が標準的なものであれば、伝わる触感の最低限の質が保証され、安心して使えることになるだろう。

2章で紹介したゲームプラットフォームは、コンテンツ制作から配信、そして最終的にユーザの体験を左右する視覚・聴覚・触覚のUIまでを統合的にプロデュースすることでシェアを競っているといえる。近年は、優れたコンテンツがプラットフォームを超えてユーザに訴求力を持つ

ケースも目立ち、マルチプラットフォームで遊べるゲームコンテンツも多い。いわゆるソフトウェアの「移植」であるが、近年はスマートフォンの普及もあり、はじめからクロスプラットフォームで楽しめる作品も増え、移植という言葉自体をあまり聞かなくなった。この背景には、Unity²⁵⁾やUnreal Engine²⁶⁾などの強力なゲーム開発環境の普及や、W3CによるHTML5の勧告、そしてWebブラウザ技術の急速な進展がある。今後、視覚と聴覚はもちろん、UIによってユーザの体験が劇的に向上するようであれば、プラットフォームの構図が大きく変わることもありえるだろう。触覚技術が、まさにゲームチェンジャーになるかもしれない。

4. むすび

講座「触覚技術入門」の最終回として、前回までに解説された内容をふまえ、触覚技術が持つ意味と今後の可能性を展望した。触覚技術の活用事例として、「情動への働きかけ(精神的支援)」、「ユーザインタフェース(効率的な操作とインタラクション自由度の拡大)」、そして「リアリティの向上(体験満足度の向上)」という、最終目的の三つの側面から眺めて整理した。あらためて第1回から通して読むと、これらの目的に到達するための技術課題に共通性があることや、一つのシーズや研究成果が複数の目的に同時に活用できたりすることがわかる。これは、触覚技術の本質が、人間のインタラクション(人間がどう反応してどう変わるか)を理解して支援することだからだと言えよう。

本稿では、前回までで講座本来の目的が果たされたのいいことに、私見を交えて触覚技術の今後を模索した。映像情報メディアにおけるリアリティの本質の追求において、触覚という感覚の重要性が少しでも伝われば幸いである。あるいは、第3回で紹介した「超音波を利用した遠隔からの触覚提示技術²⁷⁾」などからは、スタートレックシリーズのホロデッキとレプリケータの技術を想像した読者もいるかもしれない。このSF作品に登場する(現時点で)架空の技術は、人に触覚を提供するための擬似物質や「場」を物理的に生成するというものであるが、人の触覚に本質的に等価な刺激を知覚させるという意味においては、確かに触覚技術が目指す究極の到達点の一つを示している。本講座で紹介された最先端の技術動向はもちろん、最新のSF小説やアニメが描く未来像に触発された次世代の技術者によって、触覚技術がさらに進展することを期待したい。

(2020年10月8日受付)

〔文 献〕

- 1) 半田拓也, 篠田裕之: “触覚の認識メカニズム”, 映情学誌, 74, 2, pp.338-341 (2020)
- 2) 田中由浩: “触覚センサ”, 映情学誌, 74, 3, pp.526-531 (2020)
- 3) 牧野泰才: “触覚ディスプレイ”, 映情学誌, 74, 4, pp.643-648 (2020)

- 4) 佐藤克成: “触覚技術のユーザインタフェースへの応用”, 映情学誌, 74, 5, pp.840-844 (2020)
- 5) 高橋正樹: “映像コンテンツと連動した触覚情報提示”, 映情学誌, 74, 6, pp.958-963 (2020)
- 6) 篠田裕之: “人のように触れる”, 日本バーチャルリアリティ学誌, 12, 3, pp.150-155 (2007)
- 7) K. Serizawa, Y. Masuda, S. Suzuki, M. Fujiwara, A. Noda, Y. Makino and H. Shinoda: "Whole body haptic experience using 2D communication wear", Asia Haptics 2018, Incheon, Korea (Nov. 14-16 (2018))
- 8) A. Noda and H. Shinoda: "Inter-IC for Wearables (I2We) : Power and Data Transfer Over Double-Sided Conductive Textile", IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 13, 1, pp.80-90 (Feb. 2019)
- 9) T. Hachisu, K. Suzuki: "Representing Interpersonal Touch Directions by Tactile Apparent Motion using Smart Bracelets", IEEE Transactions on Haptics, 12, 3, pp.327-338 (2019)
- 10) TAKARA TOMY, 共遊玩具, <https://www.takaratomy.co.jp/products/kyouyu/>
- 11) ゲームマーケット, <https://www.gamemarket.jp/>
- 12) AsiaHaptics2020, <http://www.asiahaptics2020.com/>
- 13) 技研公開2019 E1展示「2030～2040年ごろのメディア技術ダイバースビジョン」, <https://www.nhk.or.jp/str/open2019/tenji/e1.html>
- 14) “VR・ARを活用した空間共有コンテンツ視聴システム”, 技研だより, No.185 (2020)
- 15) Oculus Touch, https://www.oculus.com/rift/accessories/?locale=ja_JP
- 16) 半田拓也, 東真希子, 清水俊宏, 近藤悟: “仮想物体を空間に提示する触覚インタフェースにおける空間位置検出方式の評価”, 電気学会研究会資料, PI-18-31, pp.35-38 (2018)
- 17) 界塚宏, 山口勉, 三武裕玄, 長谷川晶一: “HMDVRのための可視光LEDによる手への非接触型温覚提示”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 24, 1, pp.83-92 (2019)
- 18) Nintendo Switch, <https://www.nintendo.co.jp/hardware/switch/>
- 19) PlayStation 5, <https://www.playstation.com/ja-jp/ps5/accessories/>
- 20) 鳴海拓志: “Pseudo-haptics 応用インタフェースの展望”, システム制御情報学誌, 61, 11, pp.462-468 (2017)
- 21) ABAL, <https://www.abal.jp/>
- 22) 坂井忠裕, 半田拓也, 大河内直之, 伊福部達: “視覚障害者向けデジタル放送受信機とUIの開発評価”, 信学HCGシンポジウム2011, HCG2011-B3-4, pp.154-159 (2011)
- 23) USB-IF, <https://www.usb.org/node/588>
- 24) TECHTILE toolkit, <http://embodiedmedia.org/project/techtile-toolkit/>
- 25) Unity, <https://unity.com/>
- 26) UNREAL ENGINE, <https://www.unrealengine.com/>
- 27) A. Matsubayashi, Y. Makino and H. Shinoda: "Direct Finger Manipulation of 3D Object Image with Ultrasound Haptic Feedback", Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Paper, 87, pp.1-11, Glasgow, Scotland UK (May 04 - 09, 2019)



半田 拓也 2001年, 電気通信大学大学院電子工学専攻修了。同年, NHK入局。岡山放送局を経て, 2005年より, 放送技術研究所。ユニバーサルサービス, 触覚インタフェース, AR/VRなどの研究に従事。2020年, 東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻修了。博士(科学)。正会員。



篠田 裕之 1988年, 東京大学工学部物理工学科卒業。1990年, 同大学院計数工学修士課程修了。同年, 同大学時助手。東京農工大学講師, 東京大学助教授を経て, 2012年より, 同大学教授。空中触覚提示を含むハプティクス, 2次元通信などの研究と教育に従事。博士(工学)。