

皮膚デバイス技術の応用事例

計測と制御 第47巻 第7号
2008年7月号 pp. 611-615

* 東京大学 大学院情報理工学系研究科 システム情報学専攻
* Graduate school of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

キーワード：触覚センサ (tactile sensor), ハプティックインタフェース (haptic interface), 皮膚センシング (cutaneous sensing), ロボット皮膚 (robot skin).
JL 0007/08/4707-0611 ©2008 SICE

1. はじめに

触覚の利用を牽引する技術革新には2つのフェーズが存在する。一つの重要なフェーズが、既に開発されている触覚デバイスの利用方法を考案し、有効な形態で情報システムに組み込んでいく過程であり、仮にこれを統合化フェーズとよぶ。統合化フェーズにおいて触覚技術は全体システムの中で取捨選択される一要素にしか過ぎないが、そこでの検討を通して触覚技術のニーズが明確化されることになる。もう一方は要素開発フェーズであり、これについては後述する。

近年の米国アップル社の携帯機器 iPod と iPhone, 任天堂のゲーム機 Wii においては、他社製品との差別化において指や手と機器との間の接触インタフェースが重要な役割を果たした。これらの例は、実用製品の統合化フェーズにおいて触覚が上手に取り入れられた例として意義深い。例えば iPod の平面ダイヤルが登場したとき、非常に気の利いたインタフェースであると感じた読者は多いであろう。ドーナツ状の接触センサ上の接触点の移動によってリストをスクロールするというシステムの組み方は暫新であり、指の移動量と画面の移動量の関係も、ストレスなく操作できるようよく調整されていた。しかしこれらのシステムを分解して考えると、個々の要素が新しいわけではない。接触のセンサ自体が原理上新しいわけでもないし、回転式ダイヤルによって項目を選ぶインタフェースもすでに馴染みの深いものであった。同様なことは iPhone の多点接触タッチパネルのインタフェース, Wii の触覚フィードバックを導入したゲームにおいても当てはまる。

今後の情報機器の商品企画・開発においては、視覚、聴覚、触覚の感覚要素を全体システムでどのように活用するか、という観点で設計が行われる。より使いやすい機器、楽しく使える機器のデザイン・機能の工夫の中に、新しい触覚の利用法が織り込まれていくと考えられる。これが「統合化フェーズ」であり、アップル、任天堂の触覚インタフェースはそのフェーズにおいて組み込まれたものといえる。

統合化フェーズと対をなす技術革新のもう一つの柱は、触覚の科学的解明と皮膚に関連した基礎技術の革新であり、この過程を要素開発フェーズとよぶ。視覚インタフェ

表1 要素開発フェーズにある皮膚関連デバイス

| 分類 | 優先事項 | 現在想定されている応用 |
|--------|--------------|---|
| 皮膚センサ | 触感センサ | 人間の触覚に近い特性をもつ ・製品触感の設計, 製造管理 ・テレグジスタンス ・医療支援 ・オンラインショッピング |
| | マニピュレータ触覚センサ | 力ベクトル分布を正確, 高速に特定, 滑り検出 ・物品運搬 ・ショップ作業支援 ・人間技能の代替 |
| | 全身型皮膚センサ | ロボット全身を被覆でき柔軟 ・生活支援ロボット ・介護ロボット |
| 触覚提示装置 | 触感ディスプレイ | 本物らしく触感を再現すること ・アミューズメント ・遠隔手術支援 ・テレグジスタンス ・オンラインショッピング |
| | 情報ディスプレイ | 全体システムにおける最適性 ・障害者支援 ・情報ツール ・警告 (危険の伝達) |
| その他 | 皮膚状態計測技術 | 全体システムにおける最適性 ・情報インタフェース |
| | 触覚フィルタ | 触覚を拡張する受動部品 ・触診補助 ・製品検査 |

ースを例にとると、撮像素子が安価でしかも指先にのるようなものになったこと、その視覚情報を処理する計算回路の集積度、処理速度が向上したこと、人間の目には劣化が感じられない圧縮技術が開発されたことなどはいずれも要素開発フェーズの成果に属する。視覚インタフェースにおいては要素開発フェーズと多岐に渡るアプリケーション開発 (統合化フェーズ) が相互にうまくかみ合うことで発展を加速することができた。アップル、任天堂の例はまだほんの序章に過ぎないのであって、今後は触覚固有の科学研究、要素技術が提供されることで本格的な技術革新が進展していくものと予感される。特に皮膚センサに関連した新しい通信技術の開発も進展しており、今後数年間で要素技術が飛躍することも期待できる。

本稿では特に要素開発フェーズにある触覚技術を整理し、それらがどのように実用化を始めているか、いくつかの事例をあげて説明する。前述の通信技術については、触覚以外の応用も含めて現状を紹介する。現時点で統合化フ

フェーズにある触覚技術の事例は数少ないが、今後は新しい要素技術が統合化フェーズにうまく取り入れられることで触覚の利用が促進されていくと期待される。

2. 皮膚関連技術の要素開発

触覚に関する要素開発のターゲットを表1のようにまとめた。人間の皮膚と同様、高密度・大面積の触覚をもつ柔軟な皮膚センサの開発が、触覚基礎技術開発の第一の柱である。表中、触感センサ、マニピュレータ触覚センサ、全身型皮膚センサとあるのは、皮膚センサを主目的によって分類したものである。そして皮膚センサとならぶもう一方の柱が、人間の皮膚に触感を与える触覚提示装置である。これらの設計・利用の指針となる皮膚感覚の科学的知見は両者に共通であるが、工学的開発内容の多くは独立である。

次章以降では、3分類された皮膚センサの要素開発現状と応用の進展について具体的事例をあげて紹介する。もう一つの柱である触感提示技術については本特集の他の記事にゆずり、本稿では扱わない。

なお触覚インタフェース全体を考えた場合には、触覚センサ・提示の範疇には入らない技術も存在する。例えば人間の皮膚と情報機器との接触状態を計測するために（機器側に接触センサを配置するのではなく）人間の皮膚変形を計測することも有効な着眼である[1,2]。あるいは筋電信号を通して指の力の状態を計測する技術も広義にはハプティクスのインタフェースである[3]。表中「皮膚状態計測技術」はこれらをまとめたものである。

また、リアリティのある触感を伝達するわけではないが、皮膚に何らかの情報を提示する技術については、情報ディスプレイとしてまとめた。この範疇に分類されるものとして、視覚障害者向けに古くから実用化されている振動ピン型ディスプレイ Optacon があり、近年はピンを大面積に2次元分布させたデバイス[4]も商品化されている。分布型の触覚提示装置としては電気刺激を用いたもの[5]も実用段階に入りつつあるようである。訓練用シミュレータにおいて負傷事故の危険を実感するために触覚刺激を与えるシステムが提案されているが、触覚提示を上手に活用した例といえる。

この他にも、触覚の感覚を増幅・加工して体感させるフィルタとしてのデバイスが研究開発されている[6]。現象として興味深いだけでなく、医師の触診や板金の損傷検査等への応用が検討されている。

3. 皮膚デバイス技術の展開

皮膚デバイスの目標仕様として、「完全触覚センサ[7]」を考えることができる。完全触覚センサとは、人間の指が取得している情報と同等な知覚が可能なセンサのことであり、特に表面に均質な構造のセンサ素子を単純配列したアレイセンサを想定したものである。均質・単層アレイによ

る完全触覚センサのスペックは以下のとおりである。これらの数値の根拠については紙数の都合から割愛するが、詳細は文献 [7] に論じられている。

(P-1) 皮膚表面でのサンプリング間隔は 1 mm 以下

(P-2) 各計測点において力の3次元ベクトルが計測される

(P-3) サンプリング周波数は 1 kHz 以上

(P-4) 各点での計測レンジは 16 bit 以上

(P-5) センサの弾性的性質が皮膚と同等であること

(P-6) センサ表面の摩擦特性が皮膚と同等であること

なおここでは機械刺激の知覚に限定して議論している。文献 [7] で述べているように、人間の触覚は完全触覚センサほどの情報量を取得しておらず、明らかに過剰性能になっている。人間の触覚は3次元構造を有しているのに対し、これを均質・単層アレイセンサで実現しようとするると過剰性能なものになってしまう。しかし均質・単層アレイは工学的には明快な構造でありスペックも記述しやすいため、ここでは目標仕様として上記 P1~6 を仮定することとする。この技術目標を完全に満たすセンサは未だ実現されていないが、当面の目的に応じていくつかの項目を満たすセンサが実現され、実用化が始まりつつある。先に挙げた3類型すなわち、触感センサ、マニピュレータ触覚センサ、全身型皮膚センサについてそれぞれ現状を紹介する。

3.1 触感センサ

衣服、寝具、アクセサリ、自動車のハンドル、シフトノブなどの触感は、商品全体の価値を大きく左右する。キーボードやスイッチ類のタッチ感、携帯電話を折り畳んだりボックスのフタを閉めたりしたときのカチッという感じは、心地よい感触になるように長い時間かけてノウハウが蓄積されている。触感センサの第一の目標はこれらの感覚をセンサによって定量化することである。

近年触覚の受容器が物理レベルでどのような情報を取得しているかについては [8], [9] 等の研究によってかなり明らかになってきた。また、[10] では皮膚の機械的特性や、表面の摩擦特性を考慮した人工皮膚の検討が行われている。複雑な知覚機構を経て認識されていると思われていた滑り感覚や触感が、ごく簡単な構造の振動型ディスプレイで呈示される事例なども見出されており、触感知覚のメカニズムに関する基礎研究は着実に進展してきている。

それらの知見に基づいた、実用志向のセンサが近年研究されている。皮膚状態 [11] や髪触感など、対象のカテゴリをある程度限定した上で触感定量化に成功した実験例が報告されている。これらの研究では、パチニ小体¹の役割に注目し、空間的には低解像度であるが時間的帯域は広いセンサを用いている。この例において前述の項目 P-1,2 を満た

¹ パチニ小体: 皮膚の深部に存在し、空間的解像度は最も低い。200Hz 付近の高周波の振動には感度よく反応する触覚受容器。

すことは想定されていない。

対象を限定せず、未知物体を含む対象についての一般的な触感検出については、基礎研究として可能性が大きく魅力的な研究領域であるものの、実用まではまだ距離があるように思われる。たとえばオンラインのショッピングで触感を確かめる目的で利用するためには非常に高い完成度の触感センサが必要である。均質・単層アレイセンサを用いる場合、P1~6の項目のいくつかを単純に削ってしまうことはできず、実用化へのハードルは低くない。

3.2 マニピュレータ触覚センサ

マニピュレーションに必要な情報を与えるセンサとしては、必ずしも人間の触覚に忠実である必要はなく、接触点の位置と力を高い時間応答で精度よく計測できることが最優先される。近年提案された文献 [12] のセンサは弾性体表面付近の微小マーカの移動を指に埋め込まれたカメラで撮影し、その変形分布から表面の応力を計算する。このセンサはすでに商品化されているが、微小な高精細撮像素子が安価に入手できるようになったこと、その後のパターン処理もリアルタイムで行えるよう周辺技術が進歩したことが、センサ実現の背景にある。また研究 [13] のグループは、触覚フィードバックによる高速な「ペン回し」と「ひも結び」を実現している。垂直力とその重心位置の計測値をもとに、指リンクの範囲内から対象が外れないように把持制御を行っている。これらのデモンストレーションがそのまま実用化される可能性は高くないかもしれない。しかし利用状況をうまく設定することで、これらのセンサを統合化フェーズに組み込むことが可能になりつつあるようにも思われる。

3.2 全身型皮膚センサ

全身型皮膚センサとは、ロボット全身の表面に触覚を付与することを第一目的としたセンサである。人間と同様な触感が検出できればそれにこしたことはないが、当面は自由形状をもつロボットの表面に接触の感覚を分布することが目標である。開発の初期段階から P1~6 の制約に過度にとらわれることは得策ではない。

大面積センサとしてもっとも古くから研究されているのは感圧導電性材料を用いた手法である[14,15]。研究 [16] においては光学式のセンシング手法を上手に使い、電気信号を送る部分と柔軟皮膚の部分とを分離した。また計測と信号伝送用の回路を分散させ、自由な形状の領域にセンサが配置できるようにすることで、人間型ロボットの表面に高密度センサを実装した。なおロボット装着型のセンサは、ペトロボット[17]などにも力の分布を計測するセンサがすでに組み込まれており、すでに実用化が始まっている領域であるといえる。応用システムに組み込まれることで今後それらが徐々に改良されていくことが期待できる。

長期的な視点で考えると、このような全身型皮膚センサを完全触覚センサに近づけていくには、2つの取り組み方

があると考えられる。一つは柔軟性のある有機材料のセンシング回路を、印刷技術などを使って一気に実現してしまうという考え方である[18]。もう一つは、多数のセンサ要素それぞれが相互に容易に結合できるようなインタフェースを備え、それらを電磁的に少ない配線数、願わくは無配線で結合しようという考え方である。筆者らは後者に属する考え方として二次元通信技術[19]の開発を進めており、本稿の残りではその概要を紹介する。

4. 二次元通信技術の応用展開

二次元通信とは薄いシート内を伝播する電磁波で通信を行う技術であり、電気接点をもたない素子が通信、受電を行うことを可能にする。素子と通信層の間に電気接点がないため、柔軟性と丈夫さを損なわずに素子を分布させることが可能になる。二次元通信層内部に素子が配置される場合には、電磁波長よりも小さいカプラによって良好な近接結合が確立できる。図1は2.4 GHz帯RFIDタグをベースに試作した1ビット検出型触覚素子による人工皮膚の写真である。2層の導電層に挟まれた触覚素子は、無接点で信号を送出する[20]。

二次元通信層の作製や近接結合の技術は、多数の要素を動作・通信させる基礎技術として触覚以外の分野にも応用可能と思われる。そこで現在は、広範囲の応用分野を設定して二次元通信の技術開発を進めている。「けいはんな情報通信オープンラボ」に設置されている二次元通信ワーキンググループでは、二次元通信の開発目標として、1) 現行電波法の制限にとらわれず広い帯域幅を利用する高速通信の実現(電磁波を空間に放射しないため)、2) 通信機器の動作電力も安全にワイヤレス伝送する技術の確立、3) 柔軟かつ低コストな通信シートの製造、に対し産、官、学連携して取り組んでいる。以下ではこのような二次元通信技術がどのような用途から実用され始めているかを紹介する。

図2のように導電性のメッシュ層、絶縁層、導電層の3層構造をもつ通信シートの場合には、メッシュ層の上から近接結合をとることができ、ユビキタス通信の媒体として有用性が高い。通信層に電磁波が伝播している状態で表面に導体を近接させると、層の内部に閉じ込められていた電磁エネルギーが表面に吸い出されてくる。この現象を利用して信号を受信・送信する。ケーブルの電磁波を低損失で二次元波動に変換する近接カプラがすでに実現されている。

この技術の最初の製品化は、図3に示す高セキュリティLANシステムである。無線LANアクセスポイントの出力を通常より弱めてシートに導入する。通信シートの表面付近には微弱な電波が染み出していることから、通常の無線機器を装備したPCはシートに近接した場合だけアクセスポイントからの電波を受信することができ、通信シートから離れたアンテナは、アクセスポイントからの電波を物

理的に有意な強度では傍受できない、というものである。ここでの応用はあくまで通信システムとしてのものであるが、通信シートがPCの接触を検出する一種の接触センサになっているともみなせる。

また、これも実用化が進展しつつある応用として、RFID タグを読み取るインタフェースとしての利用がある。無線でRFID タグを読み取る場合、送信電波の許容値には上限があり、実用上は限られた距離までしか読み取りができない。それに対し、電波を平面付近に展開させれば同じ電力でもより広い面積がカバーできる。パッシブのRFID タグに電力

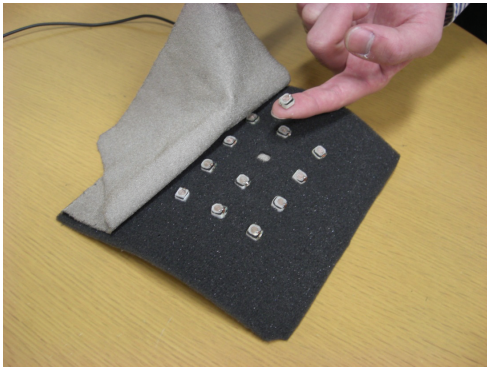


図 1 二次元通信による柔軟触覚センサの実現例。素子は電気接点なく導電シートに挟みこめばよい。

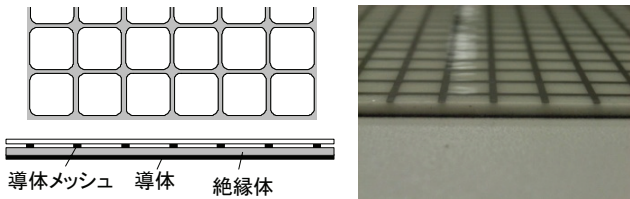


図 2 表面近接結合タイプ二次元通信シートの構造。写真は7mm周期のメッシュ層をそなえた通信シート。

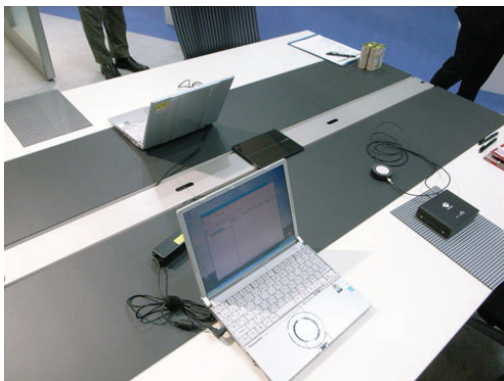


図 3 二次元通信の最初の応用事例。シートに触ったPCがネットワークに接続される。(セルクロス アットセル LAN, イトーキ LAN シート, 帝人 セルフフォーム。)写真はITmedia Biz.ID の2008年3月4日付ウェブ記事より転載。

を供給して発光させることもできるから、商品棚に通信シートを設置することにより、目的の商品が光ってその存在を教えてくれるシステムが実現される。シートに接触したときだけRFID タグが読み取られることを利用し、商品が手に取られた回数を記録するシステムも構築できる。なおこの場合にも通信シートはRFID タグの接触を検出するセンサの役割を果たしている。一歩進んで接触センシング機能を付加したタグをシート上に分散配置させれば文字通りの触覚センサになる。

今後数年程度の技術開発で利用可能になると期待されるのが、機器を動作させるためのワイヤレス給電、および現在の無線よりも広い帯域を利用する高速ユビキタス通信技術である。まずはこれらの開発を先行し、そこで得られた技術と知見を人工皮膚の開発に転用していく予定である。

5. おわりに

触覚の実用化を牽引する2つの開発フェーズすなわち統合化フェーズと要素開発フェーズを指摘し、要素開発フェーズにある皮膚センサデバイスがどのように実用され始めているかを概観した。それらは今後多様な応用分野での統合化フェーズに組み込まれることで、さらに利用が広がっていくと考えられる。最後に皮膚デバイスを実現するための触覚素子集積法として、筆者らが進める二次元通信という考え方を紹介した。素子の動作電力を送れること、高速通信が可能なこと、から今後は少なからぬ割合のユビキタス機器が二次元通信という形態で結合されると考えられる。現在は人工皮膚以外の応用が先行しているが、そこで確立される技術を還流させることで、人工皮膚の完成度も高まっていくと考えられる。

(2008年4月17日受付)

参 考 文 献

- 1) S. Mascaro, and H. Asada: Measurement of Finger Posture and Three-Axis Fingertip Touch Force Using Fingernail Sensors, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 20, no. 1, pp. 26-35 (2004)
- 2) 岩本貴之, 篠田裕之: 静脈像を利用した皮膚変形推定, 第8回SICE SI 部門講演会, pp. 503-504 (2007)
- 3) Y. Makino and H. Shinoda: Comfortable Wristband Interface Measuring Myoelectric Pattern, Proc. World Haptics 2007, Mar., Tsukuba, Japan, pp. 433-438 (2007)
- 4) <http://www.kgs-jpn.co.jp/piezo.html>
- 5) 梶本, 川上, 前田, 箱: 皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J83- D-II, No. 1, pp. 120- 128, 2001.
- 6) 佐野明人, 武居直行, 望山洋, 菊植亮, 藤本英雄: 表面近接知レンズ(触覚コンタクトレンズ), 検査技術, Vol.10, No.1, pp.8-12, 2005.
- 7) 篠田裕之: ヒトのように触れる, 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol. 12, No. 3, pp. 26-31 (2007)
- 8) 前野隆司, 小林一三, 山崎信寿: 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 巻, 607 号, pp.881- 888 (1997)
- 9) K. Dandekar, B. I. Raju and M. A. Srinivasan: 3-D

Finite-Element Models of Human and Monkey Fingertips to Investigate the Mechanics of Tactile Sense, Transactions of the ASME, Vol. 125, pp. 682-691 (2003)

- 10) 白土寛和, 野々村美宗, 前野隆司: 肌質感を呈する人工皮膚の開発 (皮膚の表面凹凸パターンと弾性構造の模倣に基づく肌質感の実現と評価), 日本機械学会論文集 73 巻 726 号C編, pp. 541-546, 2007.
- 11) M. Tanaka, J. Leveque, H. Tagami, K. Kikuchi, S. Chonan: The "Haptic finger"-a New Device for Monitoring Skin Condition Skin Research and Technology, 9, 131-136 (2003)
- 12) K. Kamiyama, K. Vlack, H. Kajimoto, N. Kawakami, S. Tachi: Vision-Based Sensor for Real-Time Measuring of Surface Traction Fields, IEEE Computer Graphics & Applications Magazine, Jan-Feb, Jan-Feb, pp. 68-75 (2005)
- 13) T. Ishihara, A. Namiki, M. Ishikawa, M. Shimojo: Dynamic Pen Spinning Using a High-speed Multifingered Hand with High-speed Tactile Sensor, Proc. 2006 IEEE RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.258-263 (2006)
- 14) 下条誠, 石川正俊: 薄型フレキシブル位置覚センサとその応用, 計測自動制御学会論文集, Vol.21, No.11, pp. 1250-1252 (1985)
- 15) <http://www.nitta.co.jp/>
- 16) Yoshiyuki Ohmura, Yasuo Kuniyoshi, and Akihiko Nagakubo: Conformable and Scalable Tactile Sensor Skin for Curved Surfaces, Proc. of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida, May, pp. 1348-1353 (2006)
- 17) <http://www.paro.jp/>
- 18) H. Kawaguchi, T. Someya, T. Sekitani, and T. Sakurai: Cut-and-Paste Customization of Organic FET Integrated Circuit and Its Application to Electronic Artificial Skin, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 40, No. 1, pp.177-185 (2005)
- 19) H. Shinoda, Y. Makino, N. Yamahira, and H. Itai: Surface Sensor Network Using Inductive Signal Transmission Layer, Proc. Fourth International Conference on Networked Sensing System (INSS07), pp. 201-206 (2007)
- 20) H. Chigusa, Y. Makino, and H. Shinoda: Large Area Sensor Skin Based on Two-Dimensional Signal Transmission Technology, Proc. World Haptics 2007, Mar., Tsukuba, Japan, pp. 151-156 (2007)

[著者紹介]

しの だ ひろ ゆき 君 (正会員)
篠 田 裕 之



1988年東京大学工学部物理工学科卒業。90年同大学院計数工学修士, 90年より同大学助手, 95年博士(工学)。同年より東京農工大学講師, 97年より同助教授, 99年 UC Berkeley 客員研究員, 2001年東京大学大学院情報理工学系研究科助教授, 2007年同准教授。触覚を中心としたセンサシステムとデバイス, センサネットワーク, ヒューマンインタフェース, 光・音響・

生体計測などの教育と研究に従事。
