

解 説

接触センシングの現状と今後の展開

Contact Sensing, a State of the Art

篠 田 裕 之*
 Hiroyuki Shinoda **
 *The University of Tokyo

1. はじめに

人間の表面は皮膚という接触センサに覆われており、日々の行動の多くが皮膚の感覚に依存している。朝起きてからの行動を一つずつ思い起こしてみれば、触覚を使わずに一日を過ごすのは非常に困難なことが分かるであろう。そしてその感覚は人間の知能の獲得や形成に対しても大切な役割を果たしている [1]。それにもかかわらず人間を模倣しようとするロボットが皮膚の感覚を有効に利用することはこれまでほとんどなかったと言ってよい。この背景や歴史については以前の解説 [2] で論じたが、工場の中で働くロボットにとって触覚はそれほど重要なものではなかったこと、と同時に当時利用可能な技術を組み合わせただけで実用可能な人工皮膚を実現することが技術的に困難であったこと、がその主な理由である。

皮膚の感覚に限定せずにより広く接触のセンサを考えるのであれば、多様な形態のセンサが高い完成度で実現されており、すでに多くが我々の生活にも深く入り込んでいる。電卓やリモコンのボタン、照明や装置類のスイッチは毎日手に触れるものであるが、これらは最もプリミティブな形態の接触センサである。少し進んだ形態のものとしては PC のタッチパッドや操作画面の透明タッチパネルがあり、これらは前述の例のように一点での接触の有無を検出するだけでなく、その位置も検出可能な機構を有している。さらに近年バイオメトリックス認証の一手法として指紋を検出するセンサ [12] が実用段階に入りつつあるが、これは接触の分布を高解像度で検出するものであり、高度な接触センサの例である。

このような豊富なノウハウをロボットの皮膚感覚として活用できなかった理由のうち、以前の論文 [2] では触れられていなかった側面を中心に次章以降で解説する。柔軟で高性能の人工皮膚によってロボティクスがどのように変わ

るのかを展望し、現在は従来の技術的困難が解消可能な段階にあることを指摘する。

2. 感覚を持った人工皮膚のインパクト

工場で働くロボットの環境はロボットのために特別に整備されたものであり、最も生産効率が上がるように作業工程を最適化しておくことができる。そのような条件で決められた組み立て作業を速く大量にこなす機械を設計すると、皮膚感覚の必要性は意外なほど小さなものであった。皮膚が果たしている役割を力覚や他の非接触型センサで代行し、加えて作業治具や工程を改良することで人間以上の効率が実現された。

ところが機械が未知の環境、特に人間と共存する環境で活動することを前提とすると事情は一変する。周囲の人間や物体がその機械の一部に不用意に接触する事態を回避するには、その機械の全面に分布した触覚が不可欠と考えられる。また例えばペットロボットに装着する触覚は動物の皮膚の触覚と同じような感覚をもつことが必要で、これを他の形態のセンサで代替することは困難である。解説 [2] で論じたように、その他にもいくつかの点で人工皮膚の新しいニーズが生じてきている。

1996年に開始された井上らのプロジェクト [3] ではこの点が明確に認識され、機械の全身を覆う柔軟皮膚の研究が開始された。また2000年には Lumelsky らが同様なコンセプトの皮膚センサを Sensitive Skin という名前で呼び、その開発の重要性とロボティクスへのインパクトを論じた [4]。彼らはその中で、工場の中のロボットの仕事は「原理的に自動化可能な仕事」のごく一部に過ぎず、それらの自動化を阻むボトルネックは全身を覆う皮膚感覚の欠落であると述べている。そして汎用性をもつ柔軟な皮膚技術の出現によって産業や生活の形態が変革されること、また学問・技術の広い分野で革新が喚起されることが、を予測している。本当のインパクトは一定水準以上の皮膚が手に入ってはじめて明らかになるものかもしれないが、以下ではそのような皮膚の実現がこれまで困難であった事情を解説する。

原稿受付 2002年 3月 18日

キーワード: Contact Sensing, Tactile Sensing, Artificial Skin, Sensitive Skin, Haptic Interface, Proximity Sensor

*〒113-0033 文京区本郷 7-3-1

*Bunkyo-ku, Tokyo

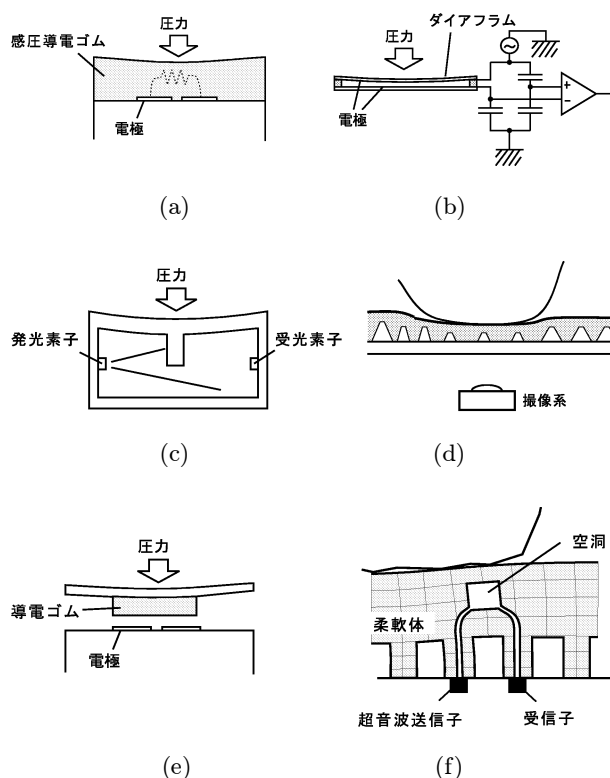


図1 代表的な接触計測方法。(a):感圧導電ゴムの利用,(b):容量変化の検出,(c):光遮断による変形検出,(d):光学的触像検出,(e):導通・非導通による接触検出,(f):音響共鳴触覚素子

3. 接触の検出原理

接触検出の基本原則としては10年前にその大半が出揃っているといつてよい。ロボットの触覚センサのサーベイとして1990年以前のものとしては文献[5]に、それ以後のものとしては文献[6]にはほぼ網羅されている。接触のセンサの主要な検出原理は接触の際の圧力を検出するものであるが、その他にも接触による電気的变化を検出する方式、温度の変化を検出するもの、そしてそれらの複合型が提案、開発されている。なお、文献[4]において実験で用いられたロボットの表面に配置されていたのは、対象物が接近したことを検出する近接覚のセンサであった。

接触による圧力や表面変形を検出する具体的方法としては、感圧導電性のゴムや塗料を用いる方法[7]、容量の変化を用いる方法[9]～[11]、が代表的である。これらをアレイ化した触覚センサは数多く提案され一部は商用化されている[8]。圧力によって抵抗が変化する材料を利用したセンサの概念図は図1(a)に示されている。カーボンや金属の微粒子を混入した柔軟体の抵抗が圧力によって減少することを利用し、接触を検出する。電極の配置法は図のように横

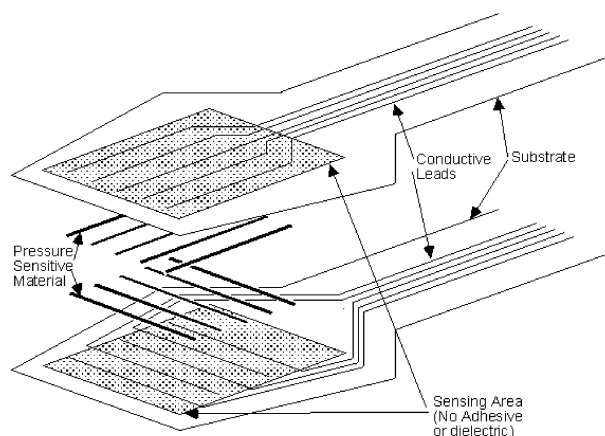


図2 行電極・列電極による二次元圧力センサアレイ。米Tekscan社ウェブサイトより転載

に並んだタイプや上下から導電ゴムを挟み込むタイプがあり、図2のように行電極と列電極の指定によって一つのサイトを指定する二次元アレイが代表的である。これに近い発想のものとして、図1(e)のように接触による導通を利用して接触を検出するタイプは電卓のキーとしても広く用いられている。容量検出に基づく方法としては、図1(b)のように圧力によってダイアフラムや梁が変形した際の容量の変化を検出するという発想のもの、導電性の対象物が接触することにより表面付近に設置された隣り合う電極間、あるいは電極とグラウンド間の容量が変化するのを検出するタイプ[12]がある。抵抗変化や容量変化の検出以外の方法としては、図1(c)のように遮断される光量を検出するセンサや、図1(d)のように表面の変形を映像化して取得する方法[13][14]も多くのタイプが研究され、一部は商用化された。その他にも、変形に伴うインダクタンスの変化を検出する方法や[15]、皮膚となる弾性体の裏側から超音波を送出し、表面で反射して戻ってくるまでの時間から表面の変形を検出する方法[16]、組み込んだ磁性体の移動を磁気センサで検出する方法、などが提案されている。また以上の方法では皮膚に伸縮可能な柔らかさを与えるのが難しかったため、柔軟体で空気室を作りその圧力を計測する方法[21]、あるいは図1(f)のように弾性体中の空洞内の空気に音響的共鳴を発生させその共鳴周波数の変化から空洞の変形を検出する方法[18]が研究されている。さらに固体の熱伝導率が気体の熱伝導率より著しく大きいことを利用して、接触による表面温度の変化から接触を検出することも可能である[17]。

4. 大面積センサスキンのセンシング

前章のように接触センシングの原理は数多く提案されているが、これをロボットの触覚に応用する場合、これまでいくつかの問題があった。第一の要因は柔軟性に乏しかつ

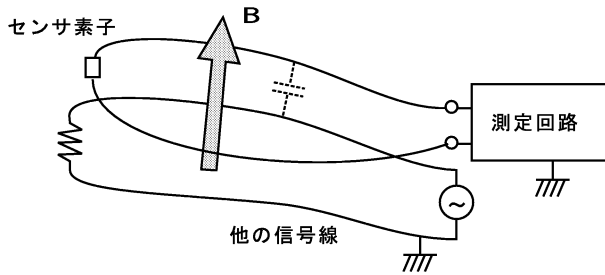


図3 誘導性干渉と容量性干渉

たこと、第二に複雑な形状をもつロボットの表面に装着し、実用に耐える丈夫さを付与するのが困難であったこと、第三の要因として単純な接触検知以上の触覚情報を獲得するのが困難であったことが挙げられる。これらの問題の詳細と、既に提案されている解決方法については解説 [1] [2] [19] で紹介した。

以下では、それらの中であまり触れられていなかった問題について考察する。ロボット表面を広く覆う人工皮膚の場合、離れた場所での微小なセンサの信号を計測しなければいけないという問題である。特に軽く触れた感触から衝撃力まできちんと識別しようとするのが厄介である。人間の皮膚は最大で数ミリ程度は変位する一方で、200 [Hz] 程度の振動であれば 1 [μm] 以下の変位振幅でも検出可能であることが知られている。指に加わる力で表現すれば、kg 重のオーダーから mg 重のオーダーまでをカバーし、しかも物体を強い力で握りしめながら同時に微弱な振動を感じ取ることができる。人間の場合は異なる時間応答・空間応答をもつ複数種類の受容器を組み合わせるとこの広い測定レンジを実現していると考えられるが [1]、これを単一の変位センサ・圧力センサで知覚しようとすれば非常に高い SN 比が必要になる。

例えば図2のような行電極と列電極を用いた二次元センサアレイは構造や作成工程が簡単であるという大きなメリットをもつが、測定点への行きと帰りの信号線は分離せざるをえず、誘導性ノイズ・容量性ノイズの影響を受けやすい。このことを定量的に見積もってみよう。

まず互いに l [m] 離れて配置された半径 r [m] の2本の導線間の d [m] 当たりの容量は $\pi\epsilon d/\log(l/r)$ と書かれ、ここから分かるように容量結合は比較的離れた導線間にも存在する。図3のように、信号線が 1 [m] 程度の長さを持ち、付近に他の信号線が存在した場合、その信号線との間に 10 [pF] 程度以上の容量結合が発生し、それを介してセンサからの信号線に電流が流入する。

またセンサ素子への信号線（素子までの距離 d [m]）と隣の信号線のループが重ねて配置されている場合の相互インダクタンスは $\pi^{-1}\mu_0 d \log(l/r)$ であり（ただし l は行きと

帰りの信号線の間隔）、 $d = 1$ [m] では 1 [μH] の程度である。信号周波数を 1 [kHz] 程度とし、隣の信号線に 0.1 [A] の電流が流れば、センサ素子の両端電圧に 1 [mV] 程度のノイズ電圧が加算されることになる。

以上はたかだか1本の信号線が隣接する場合の影響であり、モータの駆動系などが混在すればこれよりはるかにノイズは大きくなる。このようにノイズの影響が大きい環境下で良い計測を行うためには、大別して二つの方向性が考えられる。一つは各信号線を電気シールドしたり信号電圧を大きくしたりして物理的な SN 比を大きくする方法であり、もう一つは信号伝達の形態を工夫する方法である。以下では両者の効果を比較する。

5. 人工皮膚の信号伝達の形態

アナログ伝送よりもデジタル伝送の方がはるかに多くの情報伝達が可能であることは半ば常識として語られているが、その差異をここで定量的に把握してみよう。すなわち局所的に検出した応力等のデータを符号化して送る場合（デジタル伝送）と、センサからの信号強度を離れた地点でそのまま検出する（アナログ検出）場合である。

この概念を説明するために一つのセンサの信号が $[-s_0, s_0]$ なる範囲で $s(n)$ なる電圧を出力し (n は離散データの時刻)、それに加算される予測不能ノイズ $e(n)$ が、 $[-e_0, e_0]$ なる範囲でランダムな値をとるとする。この場合、ある1時刻の計測データから有意に同定できるセンサの状態数は s_0/e_0 通りである。この状態数の対数

$$K = \log_2 \frac{s_0}{e_0} \quad \text{ビット} \quad (1)$$

を、各時刻にセンサが発生可能な情報量と呼ぶことにする。すなわちこのセンサ出力から同定可能な状態の数は、 K ビットのメモリの状態数に等しいという意味である。

もしセンサが各時刻ごとに独立な電圧を発生可能な発信装置であるならば、 N 点の信号が表現可能な情報量は式 (1) の N 倍の NK ビットであり、時間に比例して増大する[†]。仮に1時刻当たり1ビットを送ることとすれば、例えば10点のデータで10ビットの精度のデータを送ることができる。

一方、この信号線の先端が感圧型の抵抗 R や容量 C であり、その信号強度を遠隔地で計測する場合はどうだろうか？ すなわち N 点の観測電圧データの平均をとって真値の最良推定をする場合、あるいは少し高度な計測法としてロックイン計測（センサ素子に交流電流を与え抵抗両端の電圧観測値の系列から交流電流と同期した成分だけを

[†]信号よりもノイズが大きく、 $e_0/\sqrt{N} < s_0 < e_0$ である場合は Ns_0^2/e_0^2 ビット程度であるが、時間に比例する性質は変わらない。

取り出す)を行った場合, の両方を検討してみよう. いずれの計測方法においても, 信号がある基準関数 $\phi(n)$ の定数倍であるという先験情報^{††}に基づいて推定を行うことになる. すなわち「 $\phi(n)$ を基底関数の一つに含む m 個の正規直交基底」で観測電圧 $V(n)$ を展開し, そのときの $\phi(n)$ の係数をもって信号強度の最良推定値とする. もしノイズが白色雑音であれば, ノイズはいずれかの基底成分に偏ることはないから, $\phi(n)$ に平行なノイズ成分の2乗期待値は全ノイズエネルギー $E \equiv \sum e(n)^2$ (n についての総和)の $1/N$ に等しく, これが最良推定誤差を与える. したがって N 点のデータから導かれた (1つの) 最良推定値から判別できる状態の数の対数をとると

$$K_N = \log_2 \frac{\sqrt{\text{Max}[\sum s(n)^2]}}{\sqrt{E/N}} = \log_2 \frac{s_0 \sqrt{N}}{e_0} \quad (2)$$

の程度であり, 結局物理的なSN比を向上させる努力や長時間の測定データから真値を推定しようとする努力は, 信号源から読み取れる情報量という意味では対数的にしか効いてこないことが分かる. 例えば物理的なSN比を何桁か向上させたとしても, その努力は符号化された通信信号をわずかに数ビット余計に送る分にしか相当しない. すなわち信号強度の増大やノイズの抑制でSN比の向上を追及するよりも, センサの近くに計測データを符号化して送信する回路を付加する方が (それが実現可能であるならば) はるかに効果的であることになる.

以上のことから, 大面積の人工皮膚においては, センシングされた物理量を検出場所ごとに符号化して伝送する機構を組み込むことが有効と考えられる. このような回路を触覚素子レベルで組み込むことはすでに原理上可能であり, もし実現すれば皮膚はもはや単なるセンサではなく, 知能をもった情報メディアであることに気付く. そのようなデバイスを前提としたロボット工学の展開が今から楽しみである.

参 考 文 献

- [1] 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, vol.46, no.1, pp.28-34, 2002.
- [2] 篠田裕之: “器用な手の皮膚と触覚”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.6, pp.767-771, 2000.
- [3] 井上博允編: “マイクロ・ソフトメカニクス統合体としての高度生体機能機械の研究”, 日本学術振興会未来開拓推進事業研究成果報告書, 理工領域-8, 2001.
- [4] V. J. Lumelsky: “Sensitive Skin,” IEEE Sensors Journal, vol. 1, no. 1, pp. 41-51, 2001.
- [5] H. R. Nicholls and M. H. Lee: “A Survey of Robot Tactile sensing Technology,” Int. J. Robotics Res., vol.8, no.3, pp.3-30, 1989.

^{††}例えば平均化を行う場合は, 観測時間内で値の変動がないことを前提に $\phi(n) = \text{const.}$ と考えたことになり, ある周波数で変調した場合は $\phi(n)$ としてその交流波形の定数倍を考えることになる.

- [6] M. H. Lee and H. R. Nicholls: “Tactile Sensing for Mechatronics – A State of the Art Survey,” Mechatronics, vol.9, pp.1-31, 1999.
- [7] 石川, 下条: “ビデオ信号出力をもつ圧力分布センサと触覚パターン処理”, 計測自動制御学会論文集, vol. 24, no. 7, pp.662-669, 1988.
- [8] F-SCAN System. Tekscan Inc., MA, USA, 1997.
- [9] R. A. Boie: “Capacitive Impedance Readout Tactile Image Sensor,” Proc. 1984 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.370-378, 1984.
- [10] R. S. Fearing: “Tactile Sensing Mechanisms,” Int. J. Robotics Res., vol. 9, no.3, pp. 3-23, 1990.
- [11] M. R. Wolfenbuttel: “Surface Micromachined Capacitive Tactile Image Sensor,” Delft University Press, 1994.
- [12] S. Shigematsu, H. Morimura, Y. Tanabe, T. Adachi, and K. Machida: “A Single-Chip Fingerprint Sensor and Identifier,” IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 34, no. 12, pp.1852-1859, 1999.
- [13] H. Maekawa, K. Tanie, et al.: “Development of a Finger-Shaped Tactile Sensor and Its Evaluation by Active Touch,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics And Automation, pp.1327-1334, 1992.
- [14] K. Nagata, M. Ooki and M. Kakikura: “Feature Detection with an Image Based Compliant Tactile Sensor,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 838-843, 1999.
- [15] N. Futai, T. Yasuda, M. Inaba, I. Shimoyama and H. Inoue: “A Soft Tactile Sensor with Films of LC Resonance Traps,” Proc. of the Ninth International Conf. on Advanced Robotics ('99 ICAR), pp.25-27, 1999.
- [16] B. L. Hutchings, A. R. Grahn and R. J. Petersen: “Multiple-Layer Cross-Field Ultrasonic Tactile Sensor,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2522-2528, 1995
- [17] 湯治準一郎, 信太克規: “感圧ゴムセンサによる多機能的材質識別—硬さと熱伝導性の場合—”, 計測自動制御学会論文集, vol.33, no.7, pp.582-587, 1997.
- [18] H. Shinoda, K. Matsumoto and S. Ando: “Acoustic Resonant Tensor Cell for Tactile Sensing,” Proc. 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3087-3092, 1997.
- [19] 篠田裕之: “柔らかい機械の人工皮膚”, 日本ロボット学会誌, vol.19, no.7, pp.814-817, 2001.
- [20] M. Inaba, Y. Hoshino, K. Nagasaka, T. Ninomiya, S. Kagami and H. Inoue: “A full-body tactile sensor suit using electrically conductive fabric and strings,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.450-457, 1996.
- [21] 則次俊郎, 佐々木大輔, 大野泰延: “シリコーンゴムを用いた圧力検出型ソフト触覚センサの開発”, 第18回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1003-1004, 2000.
- [22] M. Hakozaiki, H. Oasa and H. Shinoda: “Telemetric Robot Skin,” Proc. 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.957-961, 1999.



篠田裕之 (Hiroyuki Shinoda)

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年より東京大学情報理工学系研究科助教授. 触覚を中心としたセンサシステムとデバイス, 触覚ディスプレイ, 光・音響計測などの研究と教育に従事. 計測自動制御学会, 電気学会, 日本機械学会, 日本VR学会の会員. (日本ロボット学会正会員)