

解説

柔らかい機械の人工皮膚

Artificial Skin for Soft Machines

篠田 裕之** 東京大学大学院情報理工学系研究科
Hiroyuki Shinoda **The University of Tokyo

1. はじめに

人間と接触しながら生活する柔らかいロボットを考えるとき、それを柔らかい皮膚でどのように被覆するか、という新しい問題が生じる。未来開拓学術研究推進事業における本特集のプロジェクト（以下「本プロジェクト」と呼ぶ）以前1995年に遡って考えると、このような皮膚の実現のために解決すべき問題は少なくとも二つあった。一つは人間の皮膚がどのような仕組みで触覚の情報を獲得しているかが科学的にも明らかでなく、ロボットの触覚としてどのような物理的パラメータを検出すればよいかがいまいであったこと、もう一つの問題はたとえ触覚の情報処理機構が解明されたとしてもそれをロボットの表面に柔らかく作り込む方法が未知であったことである。人間の皮膚の感覚を工学的に模擬しようとする試みには20年以上の歴史があるが、人間の触覚が得ている情報に比べれば、そのごく一部を検出するものが実現されていたに過ぎなかった。またセンサスーツの研究[5]など少数の例を除けばその装着範囲も指先に限定されていた。フィルム状の圧力センサアレイをはじめとした従来方式のセンサのほとんどは、伸縮を許容しない硬い構造を含んでいて機械的にも弱く、そのままでは自由曲面を有するロボット表面全体に装着することが困難であった[1][2]。

幸いなことに皮膚感覚の科学的理解に関しては近年いくつかの側面から進展があり、その仕組みに関する全体像は急速に明らかになってきた（この詳細については別の記事[4]で解説する）。

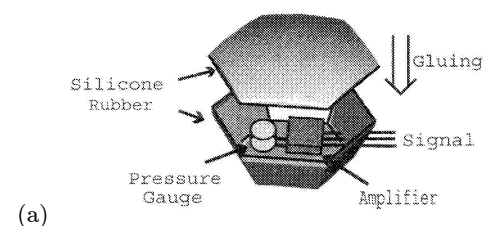
もう一方の問題、すなわち人工皮膚を柔らかくかつ大面積なものとして実現する方法については本プロジェクトにおいて新しい発想の取り組みが数多くなされ、いくつかの有効な方法を見出すことができた。そこで本稿ではそれらの具体的な成果とその基礎となった考え方について以下に

紹介していく。全体を通して鍵となった考え方は、近年利用可能となったMEMS技術を上手に利用することと、柔らかさを損なわない新しいセンシングの手法を探ることであった。

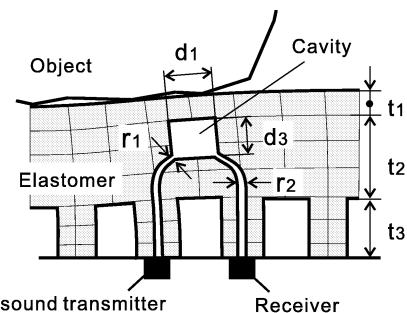
2. 柔軟体の変形を検出する新しい方法

回路部品、電極や配線の材料、あるいはセンサ素子の多くには柔軟性がないため、それらを組み合わせても柔軟な人工皮膚とはならない。例えばフィルム状センサ[6]は数少ない実用分布圧力センサであるが、曲げることはできても伸縮ができないことが難点である。個別の力センサ素子を配置していく方法は、配線への応力集中によって機械的に弱い構造になりがちである。

本プロジェクトではこの問題を回避する新しい変形検出法が提案された。その一つの方法が、図1(a)に示すようにゴムの空気室をユニットにして皮膚を構成し、その内圧を触覚信号とするもの[13][14]である。この方式によって表面全体が触覚をもつ球状行動体「センサボール」が試作さ



(a)



(b)

図1 ゴム空気室型触覚センサのユニット(a)と音響共鳴触覚素子(b)

原稿受付 2001年8月24日
キーワード: Tactile Sensing, Artificial Skin, Sensitive Skin, Haptic Interface
*〒113-0033 文京区本郷 7-3-1
*Bunkyo-ku, Tokyo

れた [7]. もう一つの方法が音響共鳴を利用する触覚素子であり, この素子を利用して摩擦を接触瞬間に検出可能であること [8] や把持対象が滑る前にその兆しとなる信号が得られることが示された [9] [11] [12]. いずれの方法においても弾性体内部の硬い部品に応力集中する問題や柔軟性が損なわれる問題が回避されている. 以下ではこれらのうち筆者らが直接関与した音響共鳴触覚素子について詳しく紹介する.

図 1(b) のように弾性体内部に存在するのは空洞およびそれに接続されたトンネルのみであり, 2本のトンネルのうち一方は皮膚底部の微小な超音波送信子に, 他方は受信子に接続されている (一本のトンネルが送信受信両方を兼ねることも可能). ここで超音波送信子からトンネルを介して空洞内部の空気を (共振周波数に近い周波数で) 励振し, 入力を止めた後に受信子に到達する信号を観測すると, 図 2(a) のような緩和信号が観測される. この信号の周波数 (共鳴周波数) は空洞の形状によって決まるため, この周波数をカウントすることで空洞の変形が検出される. 例えば図 1(b) のような d_1, d_2 および d_3 なる 3 辺をもつ直方体空洞の共鳴周波数 f は l, m, n を整数, c を音速として

$$f^2 = \frac{c^2}{4} \left(\frac{l^2}{d_1^2} + \frac{m^2}{d_2^2} + \frac{n^2}{d_3^2} \right) \quad (1)$$

で与えられるから, 例えば三つの基本モード $(l, m, n) = (1, 0, 0), (0, 1, 0)$ および $(0, 0, 1)$ に対応する三つの周波数 (図 2(b) の f_1, f_2 および f_3) を観測すれば直方体空洞の 3 辺の長さが検出される. 検出可能な変形特長は空洞形状によって異なり, 例えば空洞を, 直方体ではなく球形とした

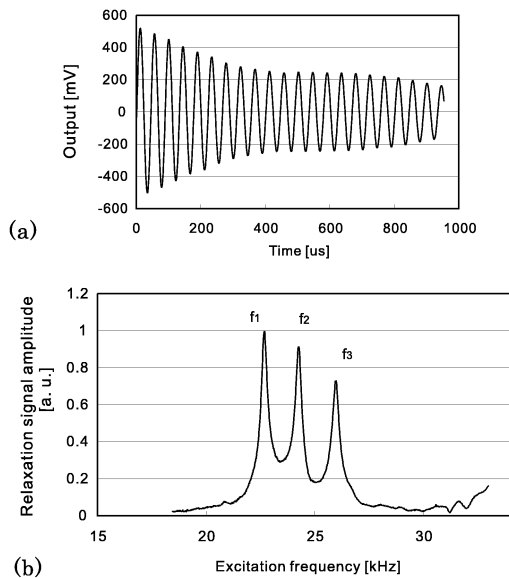


図 2 共鳴セルの緩和信号 (a) と, 励起信号の振幅を一定とし, キャリア周波数を走査して緩和信号の強度をプロットした結果 (b)

場合には空洞周囲の主応力 3 成分が検出される.

このような検出法は①柔らかさ, と②大変形を許容する丈夫さ, の他に, ③柔軟体内部の任意の位置に検出子を配置可能であること, ④複数の共鳴モードを同時に観測することにより, 一つの空洞によって複数自由度の変形を計測することができること, ⑤共鳴空洞の形状のみによって決まる共鳴周波数 (Q 値は数十程度) が観測量であるため容易に高い精度が得られること (例えば空洞の 0.1 % 程度の歪みも測定可能), という特長をもつ.

以上のような触覚素子を用い, 皮膚表面に対して垂直方向の応力と水平方向の応力が同時に検出できれば, その知覚の一例として指を対象に押し当てた瞬間にその摩擦係数が検出されることを以下のように示すことができる [8]. 図 3 のように物体が指に垂直に押し当てられると, 皮膚は水平方向に伸びようとする. このときもし表面の摩擦係数がゼロであれば, 接触にずれが生じて皮膚は水平方向に伸びる. 一方摩擦係数が十分大きく滑りがどこにも生じなければ, 皮膚表面は水平方向に伸びることができない. このように摩擦係数は皮膚の水平方向の伸縮影響を与えるので, この伸縮から逆に摩擦係数が検出可能であると予想される.

図 1(b) に示すようなセンサの表面に摩擦係数の異なる 3 種類の対象物, すなわち平板に 1) サンドペーパーを貼った表面, 2) 粉末を塗布した面, 3) 油を塗布した面, を接触させ, 押し込んでいったときの空洞の横方向伸縮率 u_H をプロットしたのが図 3 である. 各対象物とセンサ表面間の

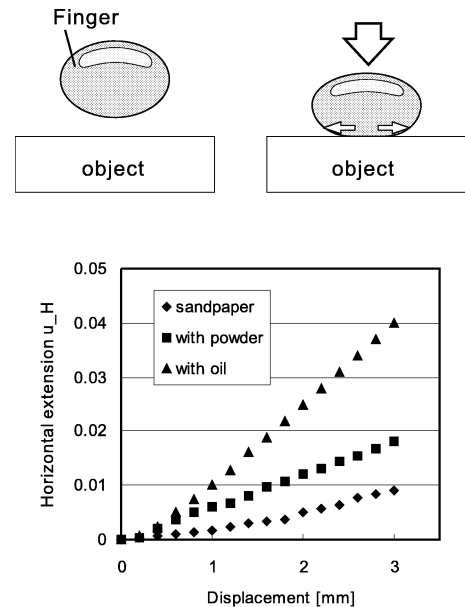


図 3 摩擦係数検出の基本原理. 指と対象が接触した際の皮膚の横方向の伸び方は摩擦係数によって異なる. 下図は摩擦の異なる接触対象物に対し, 接触の深さと空洞の水平方向伸縮率の関係をプロットしたもの

最大静止摩擦係数は最大変位付近の負荷においてそれぞれ 0.8, 0.4 および 0.1 程度であった。摩擦係数によって横方向の伸縮は異なっており、この傾向は押し込み速度を 0.8 [mm/s] から 0.18 [mm/s] まで変化させても同様に再現した [10]。

3. MEMS技術の利用

MEMS技術を用いれば、触覚受容器程度の大きさの素子に高度な検出構造や処理回路を作りこむことができる。センサとその測定値を符号化して出力する回路をも微小なチップに作りこむことができれば、高いSN比が得られるだけでなく、少数の配線に多数の素子を接続することができる。双方向性の入出力回路を素子に持たせることにより、例えば図4のように金属配線を用いずに面状の導電性ゴムで信号伝送することも可能であろう。また素子自体は硬くてもそのサイズが十分小さければ全体の柔らかさを損なわずに済む。

本プロジェクトでは、微小な歪みセンサに処理回路を一体化し、複数の周波数を変調することによって少数の信号線で多数の素子の信号を検出可能とした触覚センサアレイ [7] (図5(a)) や、弾性体内部に埋め込まれた微小なコイルの変形を、自励発振周波数の変化として検出する触覚素子 [15] (図5(b)) が提案され、試作された。

この考え方を突き詰めていくと最終的には図6のような作製プロセスが実現する可能性がある。すなわち無配線で電力の供給と信号の伝送が可能なセンサチップを成形材料に混入し、かくはん後任意形状に成形するというもので、このような行程でセンサスキンが実現できれば容易に任意形状の人工皮膚を作製することができる。また触覚素子への配線が存在しないことから柔らかく、丈夫な皮膚が得られるものと期待される。これを目指した無線センシングチップの実現方法としてアナログ電子回路をベースとしたモデルとその実装例を以下に紹介する [16]。

まずセンサチップの構造を図7に示す。チップへの電力の供給は、チップ上のコイル L_0 と、皮膚底部に配置されたコイルとの誘導結合を介して行う。このチップの場合、

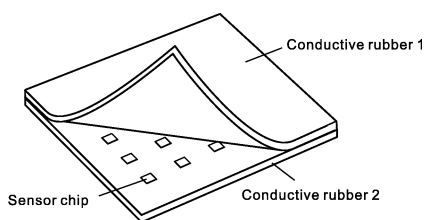


図4 信号符号化回路を組み込んだ触覚素子による人工皮膚の例。各素子が2層の導電ゴム層と電気的に接触できれば信号が読み出せる

図7におけるコイル L_0 と回路上のコンデンサ C_0 の共振周波数 $\omega_0 = \sqrt{L_0 C_0}$ においてのみ、有意な電力が供給される。図7におけるセンシングコイル L と容量 C_1, C_2 はコルピッツ発振回路を形成しており、その発振周波数 ω は L の平方根に反比例する。センシングコイルをソレノイドとするとそのインダクタンス L はソレノイドの長さの変化に応じて変化するため、それによってチップの共振周波数 ω が変化する。この信号を外部のコイルとの誘導結合を介して観測すれば、コイル L の長さの変化がFM変調として検出される。個々のチップの識別同定は各素子への電力供給周波数 ω_0 と自励発振周波数 ω によって行われる。

センサチップへの電力供給と信号の受信は、図8のようにロボットの骨格に巻かれたグラウンドコイルを介して行う。

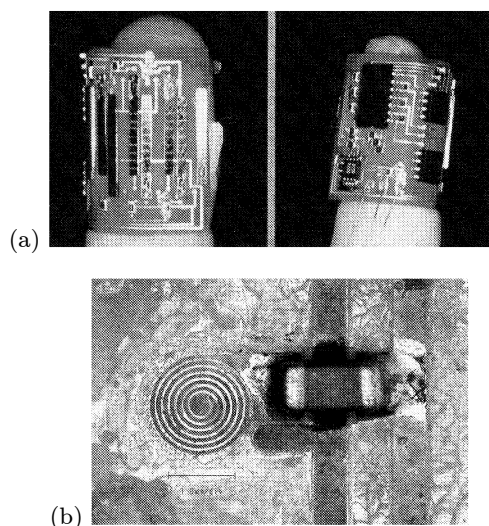


図5 信号処理回路一体型マイクロ触覚センサアレイ [7](a) と LCトラップ回路分布触覚センサの一素子 [15](b)

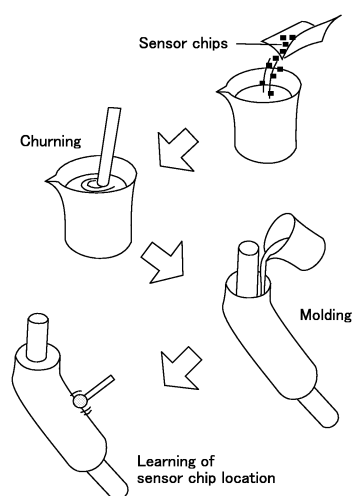


図6 テレメトリックスキンの作成プロセス

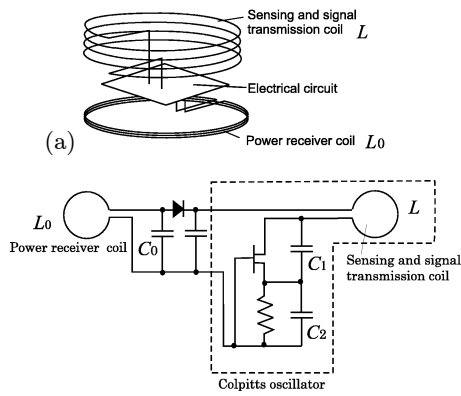


図7 アナログ型無線触覚素子の構造図(a). 電力供給用コイル, 電子回路, センシングと信号送信を兼ねたコイル, の3つの部品で構成される. (b)図はセンサチップの電気的接続

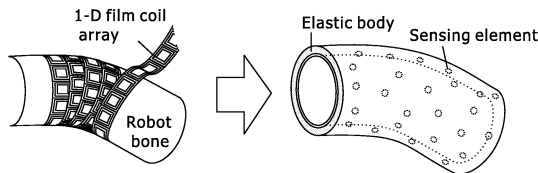


図8 帯状のグラウンドコイルをロボットの骨格に巻きつけ, その後人工皮膚で被覆する. 帯状コイルのマス目一つづつが独立に信号送・受信回路をもち, 各マス目には計算機からランダムにアクセス可能な構成とした

本研究では図に示すように帯状にフィルムコイルが連なるグラウンドコイルを試作した[17]. 一つ一つのコイルは独立に駆動回路と信号検出器をもち, フィルムに多層配線されたバスを介して任意のサイト(コイル)がアクセス可能な構成とした. コイルの一边の長さは4[cm], 駆動周波数は1[MHz]程度である. この帯状フィルムを骨格に巻きつけて固定した後に, 無線触覚素子の埋め込まれた柔軟体を被覆する. 柔軟体とグラウンドコイルの相対的な位置関係に機械的な拘束はなく, 皮膚は骨格上で自由に横ずれすることができる. また任意の触覚素子に対しそれと信号の授受が可能なサイトが最低一つ以上あればよく, 帯状フィルムの巻き方にも自由度は大きい.

4. おわりに

柔らかい人工皮膚を実現するために未来開拓学術研究推進事業で試みられた研究, すなわち弾性体内部の空洞の内圧や共鳴周波数を検出する触覚センシング法, MEMS技術を利用した少数配線あるいは無配線の触覚デバイスについて紹介した. これらの提案が従来からの触覚デバイスが直面していた困難の多くを解決し, 触覚情報が今後多方面で活用されていくためのブレークスルーになることを期待している.

参考文献

- [1] 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.
- [2] M. H. Lee and H. R. Nicholls: "Tactile Sensing for Mechatronics - A State of the Art Survey," Mechatronics, vol.9, pp.1-31, 1999.
- [3] 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.
- [4] 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, 2002年1月掲載予定.
- [5] 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.
- [6] F-SCAN System. Tekscan Inc., MA, USA, 1997.
- [7] 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, 第2章, 2001.
- [8] H. Shinoda, S. Sasaki, and K. Nakamura: "Instantaneous Evaluation of Friction Based on ARTC Tactile Sensor," Proc. 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2173-2178, 2000.
- [9] 吉海智晃, 但馬竜介, 加賀美聡, 篠田裕之, 稲葉雅幸, 井上博允: "テンソルセル触覚センサによる滑り検知と把持動作への応用", 第18回ロボット学会学術講演会予稿集, pp.67-68, 2000.
- [10] K. Nakamura and H. Shinoda: "A Tactile Sensor Instantaneously Evaluating Friction Coefficients," Proc. TRANSDUCERS '01, vol.2, pp.1430-1433, 2001.
- [11] 佐々木晋哉, 松本賢一, 吉富隆博, 篠田裕之: "共鳴型テンソルセルによる滑り予知触覚センサ", 第37回計測自動制御学会学術講演会予稿集, vol.2, pp.411-412, 1998.
- [12] 前野隆司, 他: "曲面状弾性体の内部ひずみ分布検出に基づく把持力制御法", 日本機械学会論文集, 64巻, 620号C編, pp.1258-65, 1998.
- [13] 則次俊郎, 佐々木大輔, 大野泰延: "シリコ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.
- [14] 川島俊嗣, 水内郁夫, 山口博明, 加賀美聡, 稲葉雅幸, 井上博允: "柔軟な全身感覚行動体へ向けたゴム空気室型触覚センサ", 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.167-168, 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] M. Hakozaiki, H. Oasa and H. Shinoda: "Telemetric Robot Skin," Proc. 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.957-961, 1999.
- [17] M. Hakozaiki, A. Hatori, and H. Shinoda: "A Sensitive Skin Using Wireless Tactile Sensing Elements," Proc. 18th Sensor Symposium, pp.147-150, 2001.



篠田裕之 (Hiroiyuki 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. 94年佐藤記念知能ロボット研究奨励賞, 93年, 94年, 98年計測自動制御学会論文賞, 98年日本機械学会部門賞, 99年IEEE ICRA The Best Conference Paper Award 受賞. 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.