

非線形触覚素子による人工皮膚

○星 貴之 (東京大学)
篠田 裕之 (東京大学)

Robot Skin Based on Non-Linear Tactile Sensing Element

○Takayuki Hoshi (The university of Tokyo)
Hiroyuki Shinoda (The university of Tokyo)

In this paper, we propose a new tactile sensor element with a simple structure. The element is composed of two layers of isolators sandwiched between three pieces of conductive sheets. The element acquires not only contact force but also contact area using the non-linear elasticity of the isolator, which provides rich tactile information. This sensing method is inspired by the fact that humans can sensitively discriminate sharpness of objects on any parts of their bodies in spite of their several-centimeter Two Point Discrimination Thresholds. The elements can be connected without long wires by placing sensor/communication chips at the boundary of them. The chip measures the capacitances between the conductive pieces and send signals through the identical pieces.

keywords: Tactile sensor, Contact area, Nonlinear elasticity

1. はじめに

近年、介護ロボットやペットロボットなど人間社会で活動するロボットへの関心が高まっている。それらのロボットは常に周囲の環境に注意を払い、人間と安全にコミュニケーションしたり環境の変化に対応したりすることが要求される。そのためロボティクスの分野では、ロボットに触覚を付与する触覚センサ（人工皮膚）が望まれている [1]。

人工皮膚に求められるのは以下のような性質である。

- 対象物体の形状、圧力、温度などに関係する触覚情報を感度よく取得すること。
- ロボットの全身のような大面積を覆うこと。
- 柔軟性を有すること。軟らかさは、ロボット表面への装着や人間と安全に接触するために必要であるが、触感の取得に関しても重要な要素のひとつである。

そのような人工皮膚を実現するため、さまざまな触覚センサアレイが提案されてきた。それらは主に圧力を検出するセンサ素子を配列したものであった [2-4]。そのような触覚センサの性能を向上させ、実用的な人工皮膚を目指す方法としては、センサ素子の高密度化がある。しかし膨大な数のセンサ素子を 1 mm 間隔で配列し、なおかつ触覚センサの柔軟性を保つことのできる実装技術はいまだ存在していない。

そこで我々は、問題解決のための新しいセンサ素子を提案する [5]。そのセンサ素子は数 cm^2 という広い表面を持ち、その中で接触力だけでなく接触面積を取得する。一つの触覚素子面積が大きいと、大面積を少ない個数の素子で覆うことができる (図 1)。そしてなおかつ人間の触覚に近い感覚情報が取得可能である。この計測法は人間の皮膚触覚の特性を参考にして考案されたものである。人間の二点弁別閾は顔や手を除く多くの部位で数 cm という大きな値であるが、そのような部位であっても対象物体の鋭さ（接触面積）について

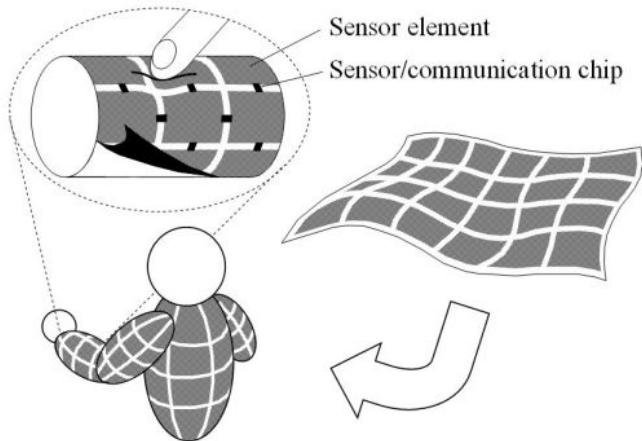


Figure 1. Robot skin composed of proposed sensor elements. It is soft, stretchable, and capable to cover a large area easily.

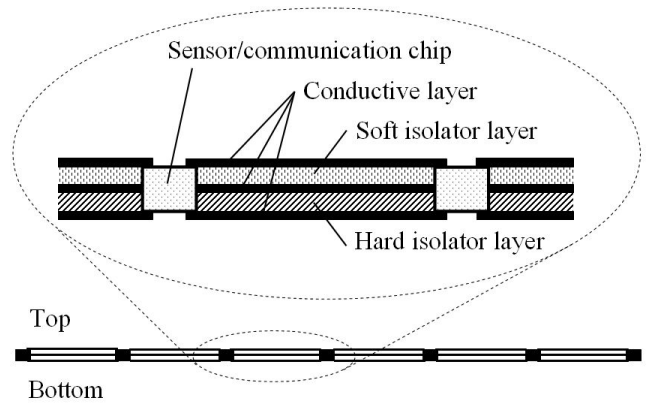


Figure 2. Cross-section of our robot skin. A set of soft and hard layers and three pieces of stretchable conductive sheets form a sensor element.

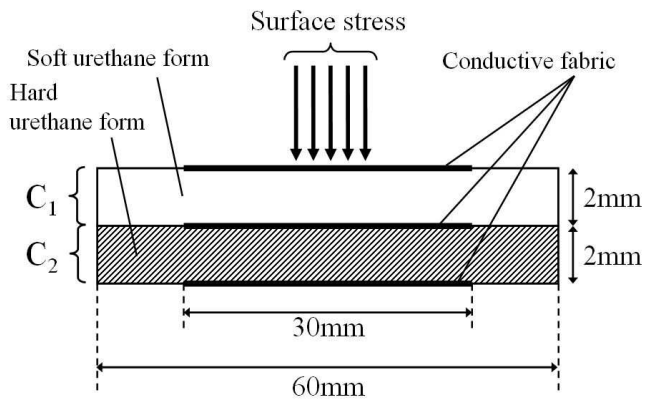


Figure 3. Cross-section of sensor element prototype.

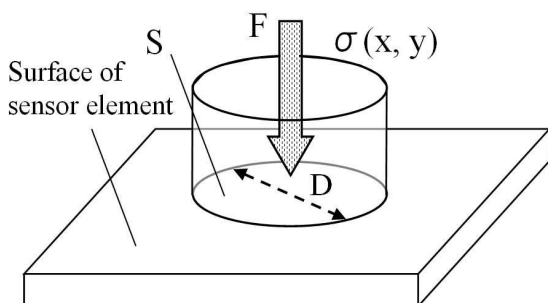


Figure 4. Supposed surface stress distribution $\sigma(x, y)$.

は非常に感度よく識別することができる。鋭さの知覚は皮膚を保護するために必須の感覚であり、接触面積というパラメータは、人間が感じる触感の全体を形成する主要な特徴量であると考えられる [6]。

センサ素子は 2 枚の絶縁層を 3 枚の薄い導電層で挟んだ構造をしており、接触力と接触面積を得るために絶縁層の非線形弾性を利用する。導電層はセンサ素子を構成するだけでなく、境界に配置された計測／通信チップによってデータの通信路としても利用される [7] (図 2)。これにより各センサ素子への個別配線が不要となり、柔軟な人工皮膚が実現できる。

本稿では、提案するセンサ素子の構造と計測原理を述べ、試作センサ素子の検証実験とその結果を示す。さらに、現在開発中の CMOS LSI チップを用いた、個別配線を必要としない通信も紹介する。

2. 構造

センサ素子は図 3 に示す断面図のような構造をもつ。厚さ 2 mm の柔らかい発泡ウレタン (15 kg/m^3) と硬い発泡ウレタン (60 kg/m^3) の層があり、それを伸縮性を持つ導電繊維 3 枚で挟む。導電繊維の面積は $30 \times 30 \text{ mm}^2$ であり、これは人間の前腕部の二点弁別閾と同程度のサイズである。発泡ウレタンと導電繊維を柔軟接着剤で貼り合わせ、硬いロボット表面を想定して底面をアクリル板に固定する。

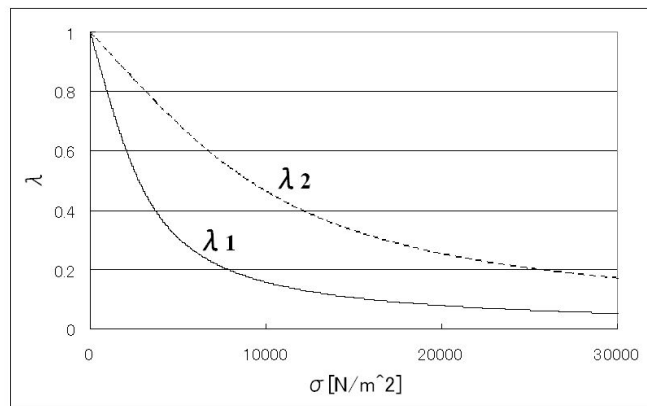


Figure 5. Relationship between surface stress σ and extension ratio λ_n . Soft layer λ_1 is more easily compressed than hard layer λ_2 .

3. 計測原理

式(1)で定義されるような、ある接触面 S 内で一様な垂直方向の表面応力分布 $\sigma(x, y)$ [Pa] を仮定する (図 4)。

$$\sigma(x, y) \equiv \begin{cases} F/S & \text{if } (x, y) \in S \\ 0 & \text{if } (x, y) \notin S \end{cases} \quad (1)$$

F [N] は表面応力の総和、 S [m^2] は接触面 S の面積である。また、絶縁層の非線形弾性が式(2)のエントロピー弾性 [8] で以下のように表されると仮定する。

$$\sigma = \frac{E_n}{3} \left(\frac{1}{\lambda_n} - \lambda_n^2 \right) \quad (n=1, 2) \quad (2)$$

$$\lambda_n \equiv \frac{d_n - \Delta d_n}{d_n} \quad (3)$$

式中 n は絶縁層を区別する添え字であり、 $n=1$ が上側の柔らかい層を、 $n=2$ が下側の硬い層を表す。 E_n [Pa]、 λ_n 、 d_n [m] はそれぞれ各絶縁層の弾性率、伸長比、初期の厚みである。なお、表面応力 σ から伸長比 λ_n を算出する式は式(2)を解いて

$$\lambda_n = \sqrt[3]{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{\sigma}{E_n}\right)^3}} + \sqrt[3]{\frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{\sigma}{E_n}\right)^3}} \quad (4)$$

のように与えられる。また、それをプロットしたものが図 5 である。ここで $E_1=4,750 \text{ Pa}$ 、 $E_2=15,400 \text{ Pa}$ である (実測)。

さらに、導電層に生じる横方向の張力と絶縁層のポアソン比が無視できるほど小さいと仮定する。これにより、垂直方向の表面応力が加えられたときの水平方向への影響が無視できることになる。そのとき、変位分布 $\Delta d_n(x, y)$ は直上の表面応力 $\sigma(x, y)$ によってのみ決定される。

ここで導電層 (全体) 間の静電容量 C_n [F] を計測することを考える。漏れ電界を無視すると、 C_n は式(5)で表される。

$$C_n = \iint_{\text{Element}} \frac{\epsilon_n}{d_n - \Delta d_n(x, y)} dx dy \quad (5)$$

ϵ_n [F/m] は絶縁層の誘電率である。前述の仮定により、 (C_1, C_2)

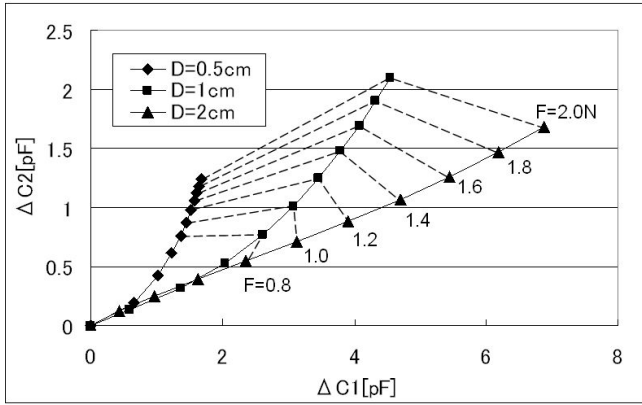


Figure 6. Simulation result. Calculated $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ s for various (F, S) . D is defined as $D \equiv 2\sqrt{S/\pi}$ to represent a diameter of S for a circular object.

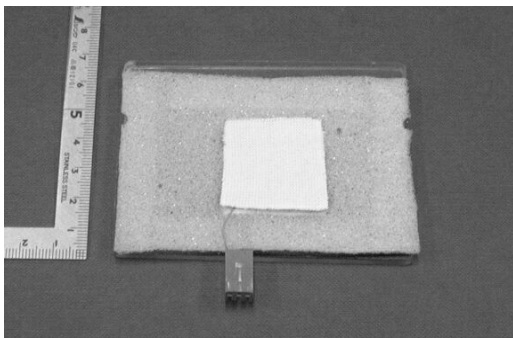


Figure 7. Photograph of sensor element prototype.

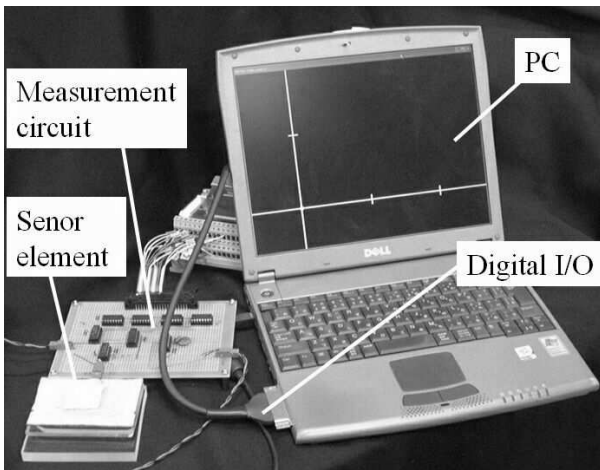


Figure 8. Experimental setup.

は (F, S) によって一意に決定される。ここでもし逆に (C_1, C_2) から (F, S) が求められれば、 (C_1, C_2) を計測することで接触力と接触面積を得ることができる。

図 6 にシミュレーション結果を示す。 D [m] は式(6)で定義され、接触面 S が円形の場合の直径を表すパラメータである。

$$D \equiv 2\sqrt{S/\pi} \quad (6)$$

さまざまな (F, S) に対して $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ が二次元的に展開され、 $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ から (F, S) を一意に求められることがわかる。

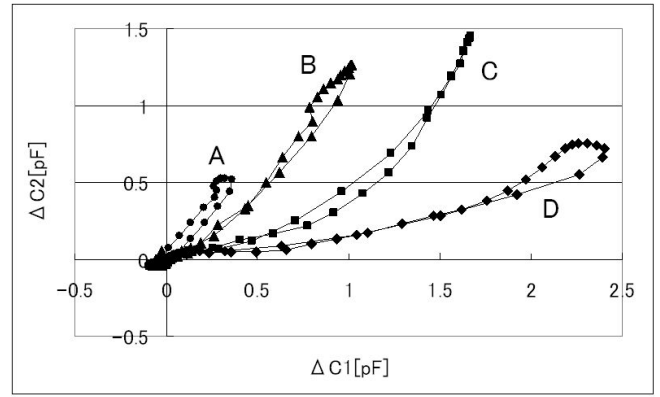


Figure 9. Experimental result of basic performance. Measured trajectories of $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ s for stimulators A: $D=0.5$ mm, B: $D=1$ cm, C: $D=2$ cm, and D: $D=4$ cm.

4. 実験・結果

試作したセンサ素子 (図 7) の性能を調べる実験を行った。 C_n をコンデンサとする RC 発振をさせ、2 ms 間のパルス数を 16 ビットカウンタで数え、発振周波数から C_n を計算した。データはデジタル I/O を介して PC に取り込んだ。システムの実効的なサンプリングレートは 80 Hz であった (図 8)。

4.1. 基本性能

4 種類の異なる接触面積を識別できるかを確認した。A: $D=0.5$ mm (点荷重)、B: $D=1$ cm、C: $D=2$ cm、D: $D=4$ cm (全面荷重) の円形の物体をセンサ素子中央に手で垂直に押し当てた。10 N 程度までの力で約 0.5 秒押し込み、その後離れた。

計測した $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ を図 9 に示す。この結果から、4 種類の対象物体が軌跡の違いによって識別できることがわかる。

4.2. 底面形状の影響

図 10 に示す半球状の隆起がある土台にセンサ素子が貼付された場合でも対象物体 A~D を識別できるかを確認した。土台以外の実験条件は 4.1. と同様とした。

計測した $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ を図 11 に示す。この結果から、センサ素子が曲面に貼られた場合でも 4 種類の対象物体の識別が可能であることがわかる。

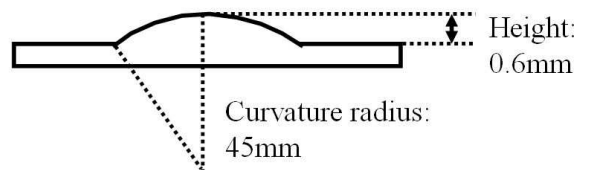


Figure 10. Base with hemispherical bump.

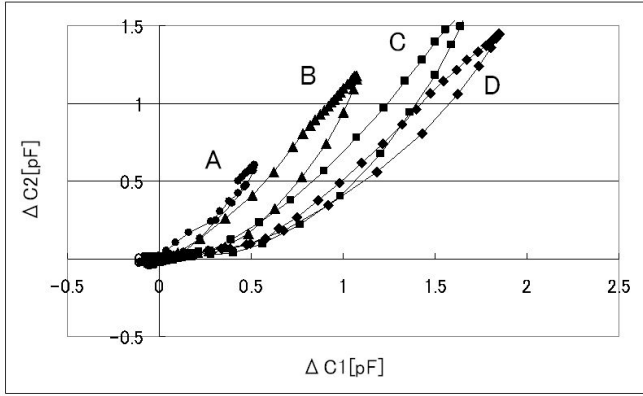


Figure 11. Experimental result on effect of surface configuration. Measured trajectories of $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ s for stimulators A: $D=0.5$ mm, B: $D=1$ cm, C: $D=2$ cm, and D: $D=4$ cm.

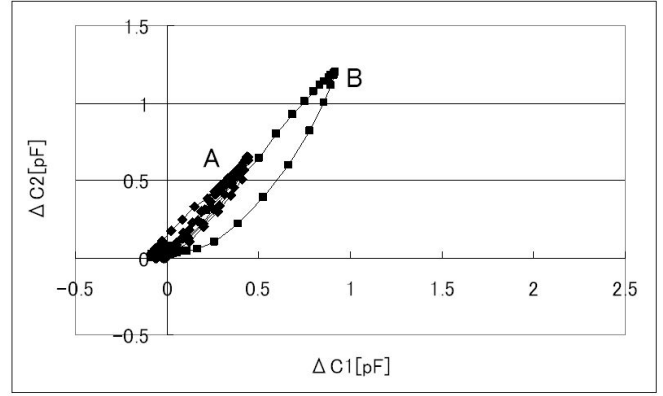


Figure 14. Experimental result on effect of force direction. Measured trajectories of $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ s for stimulators A: $D=0.5$ mm and B: $D=1$ cm.

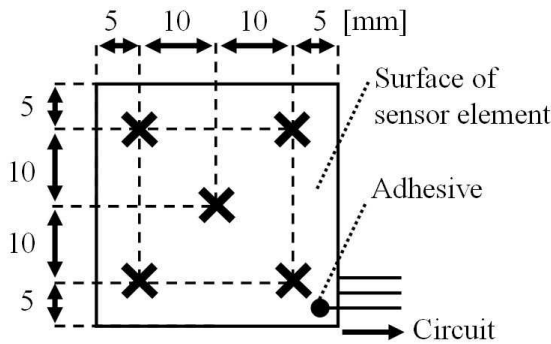


Figure 12. Pressed positions; the center and the four corners.

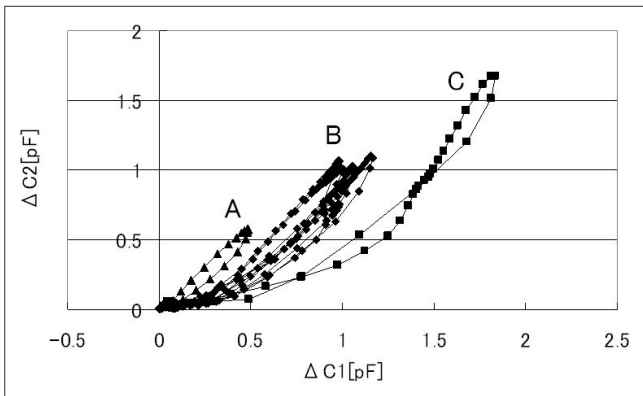


Figure 13. Experimental result on effect of contact position. Measured trajectories of $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ s for stimulators A: $D=0.5$ mm, B: $D=1$ cm, and C: $D=2$ cm.

4.3. 接触位置の影響

センサ素子上の接触位置によって感度にばらつきがないかを確認した。図 12 に示すようにセンサ素子の中央と四隅に対象物体 B を押し当てた。また、参照刺激として対象物体 A と C もセンサ素子中央に押し当てた。その他の実験条件は 4.1. と同様とした。

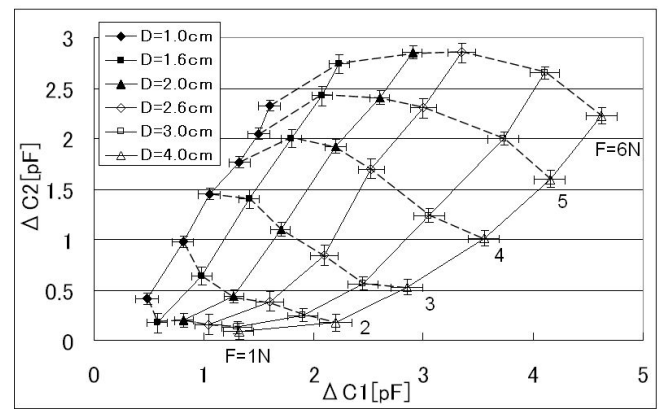


Figure 15. Experimental result on reproducibility. Averaged trajectories of $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ s for various (F, S) s with error bars representing the maximal deviations.

計測した $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ を図 13 に示す。この結果から、センサ素子に押し当てる位置によらず対象物体 B と対象物体 A、C の識別が可能であることがわかる。

4.4. 力の方向の影響

センサ素子上に加えられる力がせん断方向の成分を持っていても識別に影響がないかを確認した。センサ素子表面に対して垂直からと 45 度の角度から対象物体 A を押し当てた。また、参照刺激として対象物体 B も垂直に押し当てた。その他の実験条件は 4.1. と同様とした。

計測した $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ を図 14 に示す。この結果から、押し当てる角度、すなわち力のせん断方向成分によらず、対象物体 A と対象物体 B の識別が可能であることがわかる。

4.5. 再現性

センサ素子の出力に再現性があるかを確認した。 $D=1.0$ cm、 1.6 cm、 2.0 cm、 2.6 cm、 3.0 cm、 4.0 cm の対象物体をセンサ素子の中央へ機械式アームで支持しながら垂直に、5 回ずつ準静的に押し当てた。また同時に押し当て力の計測も行った。

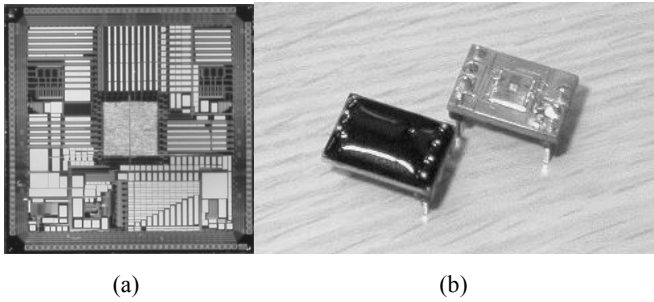


Figure 16. (a) Closeup top view of current version of CMOS LSI chip. (b) CMOS LSI chip after bonding (right) and molding (left).

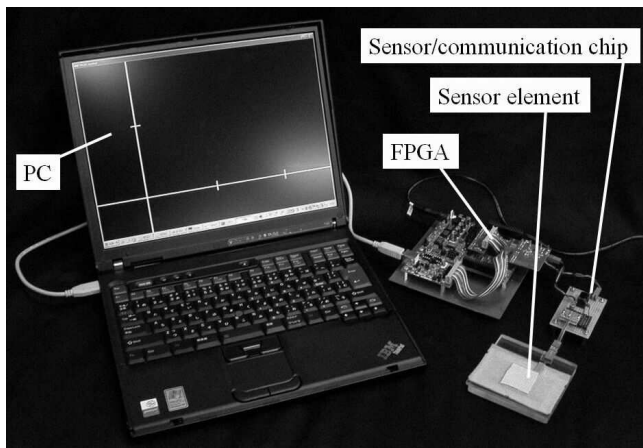


Figure 17. Examination system using LSI sensor/communication chip.

計測した $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ の平均値を図 14 に示す。最大偏差をエラーバーとして示してある。5 回分の出力が毎回ほぼ同じであり、それぞれの対象物体の識別と押し当て力の推定が可能であることがわかる。

5. データの伝送

我々は、静電容量を計測し、そのデータを含むパケットを送信する計測/通信チップを開発中である。このチップはセンサ素子を構成する導電層を通信路としても用いるため、アレイ状に並べた各センサ素子へ個別に配線することなくホストコンピュータへデータを送信することができる。配線の必要がなくなることにより、柔軟な人工皮膚が実現できる。

回路チップは $0.35 \mu\text{m}$ プロセスで製造された CMOS LSI である (図 16)。アナログ・デジタル混載回路の総面積は 1.5 mm^2 以下、動作周波数は 50 MHz である。静電容量を計測し、8 ビット A/D 変換を行う。そしてそのデータを含むパケットを送信する。試作品を製造し、現在はチップが計測した静電容量のデータを PC に読み込む動作確認まで完了している (図 17)。センサ素子をアレイにするため、図 18 のような構造を計画している。現在の試作品では、5 枚の導電層を用いる。上から 1 枚目の導電層はグラウンド層、2 枚目と 3 枚目がセンサ素子、

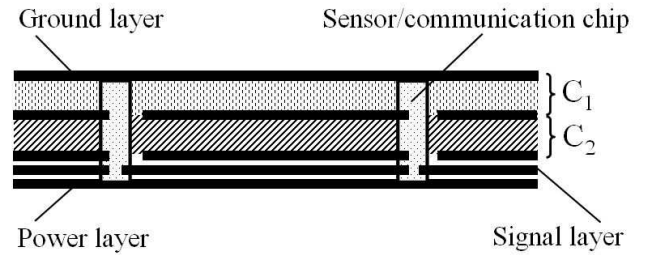


Figure 18. Cross-section of robot skin using current version of LSI chip. The signal layer will be removed in the next version of the prototype.

4 枚目が信号層、5 枚目が電源層となっている。計測/通信チップはグラウンド層と電源層から電力供給を受け、 C_n を計測し、信号層を通してデータパケットを送信する。データパケットはセンサ素子の境界に配置されたチップによりマルチホップされ、ホストコンピュータまで伝送される。

次のバージョンでは、信号層をセンサ素子と共通化した 4 枚の導電層でセンサアレイを構成する予定である。データパケットはセンサ素子を構成する導電層を通して送信されることになる。

6. おわりに

本稿で我々は、人間の触覚特性にもとづいた、新しい触覚センサ素子を提案した。そのセンサ素子は接触力と同時に接触面積を取得する。それら 2 つのパラメータの取得には材料の非線形弾性を利用する。さらにセンサ素子を構成する導電層を通信路としても使い、個別配線が不要となる信号伝送法を紹介した。これら 2 つの技術を組み合わせることにより、対象物体の細かい表面形状の特徴を知覚し、ロボットのような大面積を被覆する柔軟な人工皮膚を実現することができる。

謝辞

株式会社セルクロスの浅村氏、湯浅氏、箱崎氏、王氏、板井氏には、CMOS LSI チップの開発において多大なご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] M. H. Lee, and H. R. Nicholls: Tactile sensing for mechatronics - a state of the art survey, *Mechatronics*, Vol. 9, pp. 1-31, 1999.
- [2] Y. Hoshino, M. Inaba, and H. Inoue: Model and Processing of Whole-body Tactile Sensor Suit for Human-Robot Contact Interaction, *Proc. of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA '98)*, pp. 2281-2286, 1998.

- [3] R. Kageyama, S. Kagami, M. Inaba, and H. Inoue: Development of Soft and Distributed Tactile Sensors and the Application to a Humanoid Robot, Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 2, pp. 981-986, 1999.
- [4] O. Kerpa, K. Weiss, and H. Worn: Development of a Flexible Tactile Sensor System for a Humanoid Robot, Proc. of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003), Vol. 1, pp. 1-6, 2003.
- [5] T. Hoshi, and H. Shinoda: Tactile Sensing Using Nonlinear Elasticity, Proc. of SICE Annual Conference 2005, pp. 2978-2981, 2005.
- [6] Y. Makino, N. Asamura, and H. Shinoda: Multi Primitive Tactile Display Based on Suction Pressure Control, Proc. of IEEE 12th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (Haptic Symposium 2004), pp. 90-96, 2004.
- [7] A. Okada, Y. Makino, and H. Shinoda: Cell Bridge: A Signal Transmission Element for Networked Sensing, Proc. of SICE Annual Conference 2005, pp. 3826-3831, 2005.
- [8] G. R. Strobl: The Physics of Polymers: Concepts for Understanding Their Structures and Behavior, Springer, 1997.