

接触力と接触面積を計測する非線形触覚素子

星 貴之*・篠田 裕之*

Nonlinear Tactile Element to Sense Contact Force and Area

Takayuki HOSHI* and Hiroyuki SHINODA*

In this paper, we propose a new tactile sensor element to realize practical robot skins. The element acquires not only a contact force but also a contact area within its several-cm-sq. sensing area. By arraying the elements, we can cover a large area with a small number of them, and collect rich tactile information. The structure of the element is very simple; two layers of compressible insulators (urethane foam) which are sandwiched between three pieces of stretchable conductive sheets (conductive fabric). The structure enables us to obtain the contact force and area from the capacitances between the conductive layers. We also propose a method to connect the elements with no long wires. Sensor/communication chips are arranged at the boundary of the elements. The chips measure the capacitances between the conductive layers and send signals through the same layers.

Key Words: tactile sensor, robot skin, haptic interface, contact area, nonlinear elasticity

1. はじめに

近年、人間社会の中で自立的に活動するロボット（ヒューマノイド^{1),2)}、ペットロボット^{3),4)}など）への関心が高まっている。それらのロボットが人間と安全にコミュニケーションしたり適切な行動選択をするためには、時々刻々と変化する周囲の環境をよく把握する必要がある。そのような環境においては特に人間や物体と接触する機会が多いため、ロボットに触覚を付与する触覚センサ（人工皮膚）が重要な役割をはたすと考えられる⁵⁾。しかしすでに標準的なデバイスが存在する視覚（カメラ）や聴覚（マイク）と異なり、実用的な人工皮膚はいまだ実現されていない。

人工皮膚に求められるのは以下のような性質である⁶⁾。

- 対象物体の形状、圧力、摩擦、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、伸縮性を有すること。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が提案されてきた。それらの多くは、圧力を何らかの方法で検出する触覚素子を配列したものであった^{7)~12)}。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、MEMS 技術などを応用した触覚素子の微細化・高密度化が挙げられる。しかしその方法はロボットハンドなど比較的小さな面積には適用しうが、ロボットの全身という大面積を覆う際には大きな問題にぶつかる。1 mm 以下の間隔で配列された数百万個という触覚素子を、センサアレイの柔軟性を保ちつつ配線する実装技術が、現在のところ存在していないのである。

そこでわれわれは、その問題を解決するための新しい触覚素子を提案する。ひとつの触覚素子は数 cm 角という広いセンシングエリアを持ち、その中で接触力と接触面積という 2 自由度のパラメータを取得する。これにより大面積を少ない素子数で覆うことができ（Fig. 1）、なおかつ人間に近い触覚情報を取得する人工皮膚が実現できる¹³⁾。

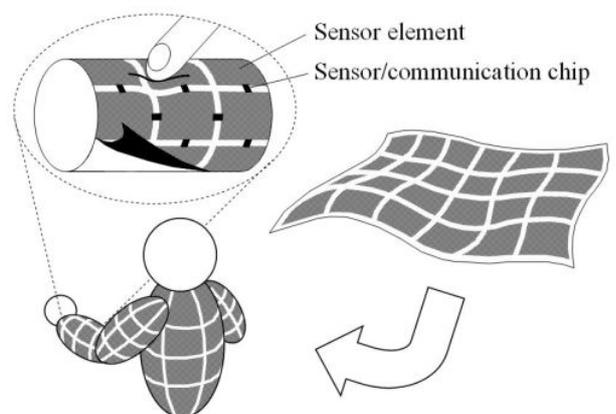


Fig. 1 Tactile sensor skin composed of proposed sensor elements. It is soft, stretchable, and capable of covering a large area easily.

* 東京大学大学院情報理工学系研究科 東京都文京区本郷 7-3-1

* Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo (Received January 19, 2006) (Revised April 12, 2006)

この計測法は、人間の皮膚触覚の特性にもとづいたものである。人間の二点弁別閾は顔や指先など繊細な部位においては数 mm 以下であるが、それ以外の多くの部位においては数 cm という大きな値をとることが知られている¹⁴⁾。これは人間の皮膚触覚の分解能が比較的粗いことを示している。しかしその一方で、そのような分解能が粗い部位においても対象物体の鋭さに関しては非常に感度よく識別することができる。そしてそのような特性の皮膚によって人間が高度な触覚情報を得ていることを踏まえ、鋭さに感度があることが人間にとって触感を形成する主要因の一つとなっている可能性がある¹⁵⁾。われわれはこの考えにもとづいて、鋭さの指標を接触面積とし、それを取得する触覚素子を開発した。

触覚素子は圧縮性のある絶縁層 2 枚を薄い柔軟な導電層 3 枚で挟む非常に簡単な構造をしている。この柔軟な絶縁層に生じる歪みは応力に対して容易に非線形性を示し、その非線形性を利用して接触力と接触面積を計測する。このように表面に与えられる応力の分布に対し非線形な出力を得る触覚素子をここでは「非線形触覚素子」と呼ぶ。一方、通常の圧力センサ素子は応力に対し線形な出力を得る「線形触覚素子」である。接触面積という特徴量は、線形触覚素子の場合には複数の素子をアレイにすることにより計測されるが、われわれが開発した非線形触覚素子の場合にはひとつの素子によって計測することができる。

また触覚素子をアレイにする際、導電層は触覚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¹⁶⁾。これにより各触覚素子への個別配線が不要となり、柔軟な人工皮膚を実現することができる。

本稿では提案する触覚素子の構造と計測原理について述べ、試作した触覚素子についての検証実験と結果を示す。さらに触覚素子をアレイにする際の、CMOS LSI チップを用いた個別配線を必要としない信号伝送法も紹介する。

2. 非線形触覚素子

2.1 構造

提案する触覚素子の構造を Fig. 2 に示す。接触面側に軟らかい発泡ウレタン (15 kg/m³)、その下側に硬い発泡ウレタン (60 kg/m³) の層があり、それぞれの厚さは 2 mm である。それらは伸縮性を持つ導電繊維の布 3 枚に挟まれている。導電繊維の面積は 30 × 30 mm² であり、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は柔軟接着剤で接着されている。硬いロボット表面を想定し、試作触覚素子の底面をアクリル板に貼付している。

2.2 計測原理

(1) 式で定義される、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] を考える (Fig. 3)。

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

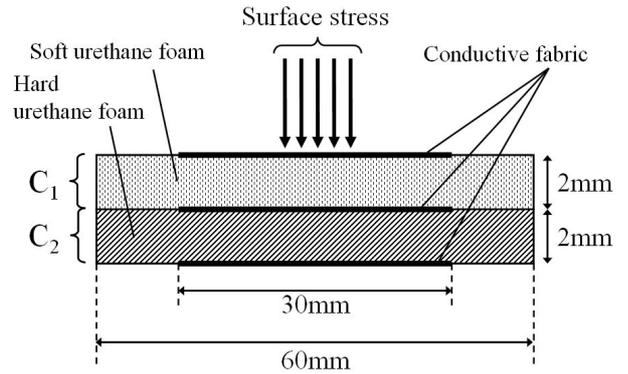


Fig. 2 Cross-section of sensor element prototype.

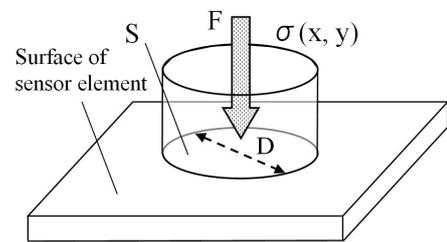


Fig. 3 Supposed surface stress distribution $\sigma(x, y)$.

F [N] は表面応力の総和、 S [m²] は S の面積である。われわれは面積のみに注目し、簡単のため S の形状は円形と仮定する。

これから議論を進めていく上で、われわれは次のような 2 つの仮定をおく。まず絶縁層の非線形弾性が (2) 式のようなエントロピー弾性¹⁷⁾ で表されると仮定する。これは本来はゴムの非線形弾性を記述するものであるが、一般の材料についてもよい近似となる。

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

$$\lambda_n \equiv 1 - \frac{\Delta d_n}{d_n - d_{0n}} \quad (3)$$

式中 n は絶縁層を区別する添え字であり、 $n = 1$ が上側の軟らかい層を、 $n = 2$ 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ヤング率、伸長比、初期厚みである。また d_{0n} [m] は実在の材料が限界まで圧縮されたときの最終的な厚みを表す定数である。文献 17) に示される厳密なエントロピー弾性では $d_{0n} = 0$ であるが、ここで使用する発泡性材料の性質に合致するよう経験的補正を行ったものである。なお表面応力 σ から伸長比 λ_n を算出する式は (2) 式を解いて

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

のように与えられる。また、それをプロットしたものは Fig. 4 のようになる。ここで $E_1 = 4.8$ kPa、 $E_2 = 15$ kPa (実測値) である。

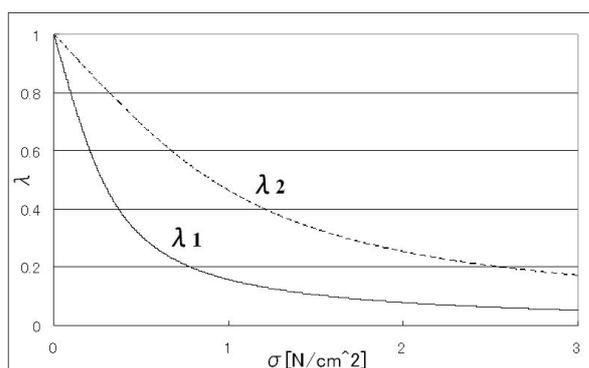


Fig. 4 Relationship between surface stress σ and extension ratio λ_n . The soft layer λ_1 is more easily compressed than the hard layer λ_2 .

さらに、導電層に生じる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による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。

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 (5) 式で表される。

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

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) 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られることになる。

表面応力による静電容量の変化を定性的に見積もるため、[1] $\sigma \ll E_n$ (小変形領域)、[2] $\sigma \gg E_n$ (大変形領域) の2通りの場合を考える。[1] $\sigma \ll E_n$ の場合、(4) 式をテイラー展開して3次以上の項を無視すると (6) 式ようになる。(計算の詳細は付録 A を参照。)

$$\lambda_n \simeq 1 - \frac{\sigma}{E_n} \quad (6)$$

これは E_n に対して σ が小さい場合、絶縁層に生じる変位が線形弾性に従うことを表している。そのとき、その絶縁層を挟む導電層間の静電容量変化 ΔC_n [F] はテイラー展開して3次以上の項を無視することにより (7) 式ようになる。 α_{mn} は F^m/S^{m-1} の係数である。

$$\Delta C_n \simeq \alpha_{1n} F + \alpha_{2n} \frac{F^2}{S} \quad (7)$$

$$\alpha_{mn} \equiv \frac{\varepsilon_n (d_n - d_{0n})^m}{d_n^{(m+1)} E_n^m} \quad (8)$$

ここで重要なのは、2次の項も無視できるほど E_n に対して σ が小さい場合には面積 S を得ることができない点である。2次以上の項を無視すると、(7) 式が $\Delta C_n \simeq \alpha_{1n} F$ のように S を含まない式になってしまうからである。

また [2] $\sigma \gg E_n$ の場合は、(4) 式において σ/E_n が支配的になるため (9) 式ようになる。

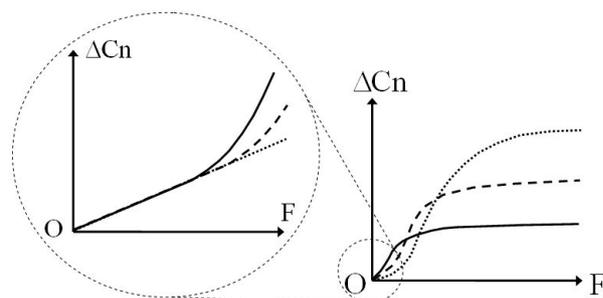


Fig. 5 Relationship between contact force F and capacitance variation ΔC_n . The solid, chain, and dotted lines mean the smallest, medium, and largest contact area, respectively.

$$\lambda_n \simeq 0 \quad (9)$$

これは E_n に対して σ が大きい場合、絶縁層に生じる変位が表面応力によらず一定値になる ($\Delta d_n = d_n - d_{0n}$) ことを表している。このように限界まで圧縮されるような状況は、柔軟な材料においては容易に起こりうる。そのとき、その絶縁層を挟む導電層間の静電容量変化 ΔC_n は (10) 式のようなになる。 β_n は S の係数である。

$$\Delta C_n \simeq \beta_n S \quad (10)$$

$$\beta_n \equiv \frac{\varepsilon_n (d_n - d_{0n})}{d_n d_{0n}} \quad (11)$$

(7) 式は接触力の増加に伴って変化量が単調増加し、接触面積が小さいほど変化量大きい。一方、(10) 式は接触力の値によらず変化量が一定であり、接触面積が小さいほど変化量も小さい。これらの異なる特性の間は、数値計算により Fig. 5 のように滑らかに繋がるのがわかる。絶縁層のヤング率 E_n は Fig. 5 の横軸 F のスケールに関係する。ここで E_1, E_2 を異なる値とすることにより、同一の表面応力 σ に対して2つの静電容量変化 ($\Delta C_1, \Delta C_2$) が異なる挙動を示す。それらの容量変化から、2つの未知パラメータである接触力と接触面積 (F, S) を求めることができる。

この計測原理を確認するため、静電容量変化のシミュレーションを行った。結果を Figs. 6, 7 に、 $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ をプロットした図を Fig. 8 に示す。 D [m] は (12) 式で定義され、円形の接触面 S の直径を表す。

$$D \equiv 2\sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (12)$$

$d_n = 2.2$ mm, $d_{0n} = 0.2$ mm として計算した。様々な (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) への対応を一意にとれることがわかる。ただしそれは接触力 F がある閾値以上のときであり、Fig. 8 においてはその閾値は約 1.0 N であると考えられる。

2.3 実験・結果

試作した触覚素子 (Fig. 9) の動作を確認する実験を行った。 C_n によって時定数が決定される 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、その発振周波数から C_n を算出した。データはデジタル I/O を介して

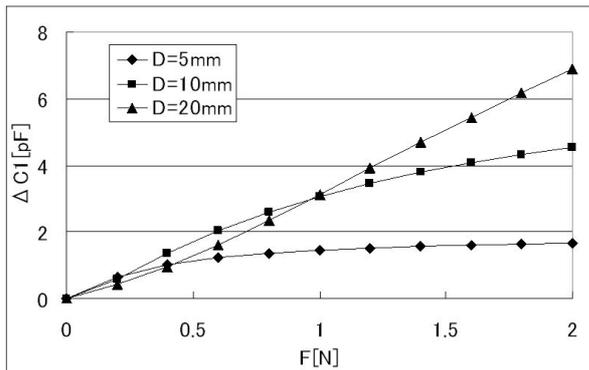


Fig. 6 Simulation results. Calculated ΔC_1 for various (F, S) s. ($E_1 = 4.8$ kPa) D is defined as $D \equiv 2\sqrt{S/\pi}$ to represent the diameter of S for a circular object.

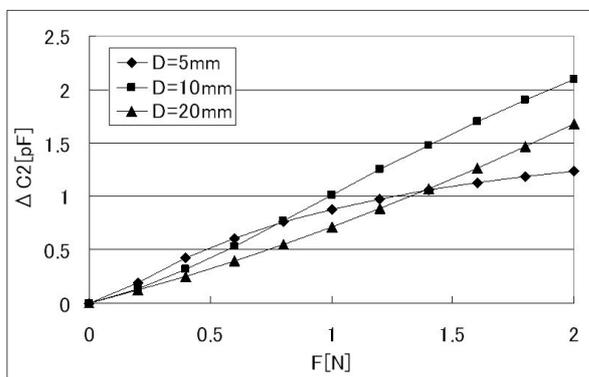


Fig. 7 Simulation results. Calculated ΔC_2 for various (F, S) s. ($E_2 = 15$ kPa)

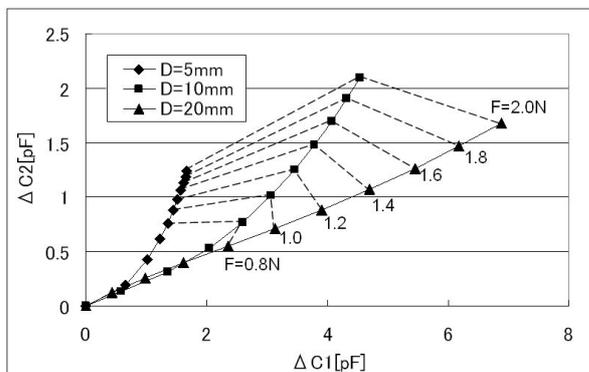


Fig. 8 Simulation results. Calculated $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ s for various (F, S) s.

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 40 Hz であった。計測された C_1 , C_2 の初期値はそれぞれ 35.7 pF, 33.7 pF であった。この値には回路内の寄生容量も含まれている。

2.3.1 基本動作

この実験では 4 種類の異なる接触面積を識別できることを確認した。なお、力についても考慮した実験は 2.3.6 で述べる。A: $D = 0.5$ mm (集中荷重), B: $D = 10$ mm, C: $D = 20$ mm, D: $D = 40$ mm (全面荷重) の円形の対象物体 (アクリル製の円柱) を触覚素子中央に手で垂直に押し当

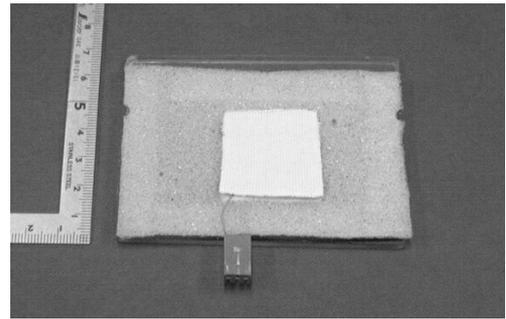


Fig. 9 Photograph of sensor element prototype.

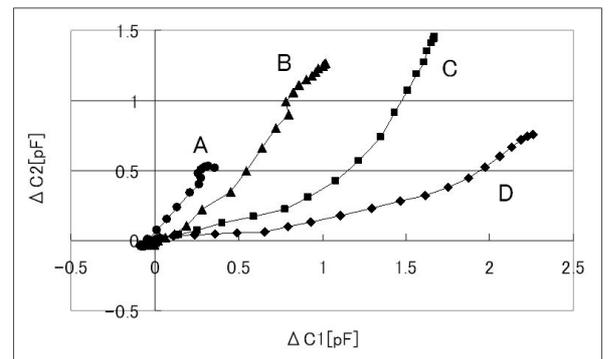


Fig. 10 Experimental results of basic performance. Measured trajectories of $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ s for the stimulators A: $D = 0.5$ mm, B: $D = 10$ mm, C: $D = 20$ mm, and D: $D = 40$ mm.

て、10 N 程度まで徐々に力を加えながら約 0.5 秒押し込んだ。このとき、 ΔC_1 , ΔC_2 は F に従って増加した。

計測した $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ の時系列データを Fig. 10 に示す。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。また対象物体 A と B の軌跡が近く、10 mm 以下の D に関する分解能が低い。これは実際の導電繊維に生じる張力が無視できず、接触面の周辺部分も引き込まれて変位することが原因と考えられる。

2.3.2 底面形状の影響

人工皮膚は、ロボット表面上の曲面で構成される箇所においても正常に動作することが求められる。この実験では、Fig. 11 に示す半球状の隆起がある土台に触覚素子が貼付された場合でも対象物体 A ~ D を識別できることを確認した。土台以外の実験条件は 2.3.1 と同様とした。

計測した $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ を Fig. 12 に示す。触覚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。なお C および D を表す軌跡が 2.3.1 の場合より B に近づいているが、これは触覚素子表面が曲面であるため底面の一部のみが接触し、等価的には本来より小さい面積で押したことになるからである。

2.3.3 接触位置の影響

C_n は空間的に積分された値なので、理論的には提案する触覚素子の感度が接触位置の影響を受けることはない。そこ

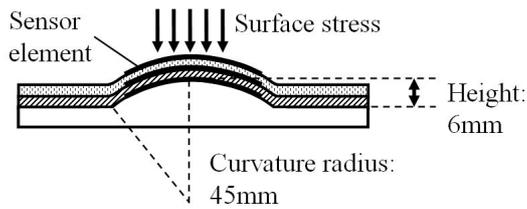


Fig. 11 Cross-section of sensor element on base with hemispherical bump.

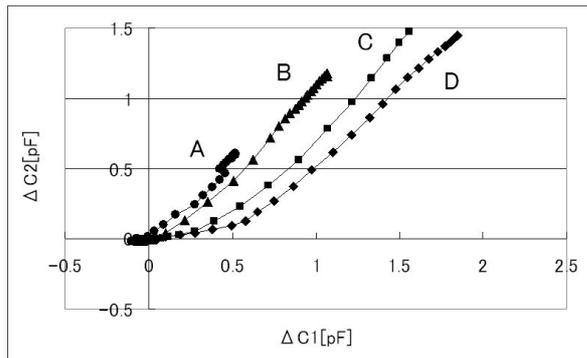


Fig. 12 Experimental results on effect of surface configuration. Measured trajectories of $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ s for the stimulators A: $D = 0.5$ mm, B: $D = 10$ mm, C: $D = 20$ mm, and D: $D = 40$ mm.

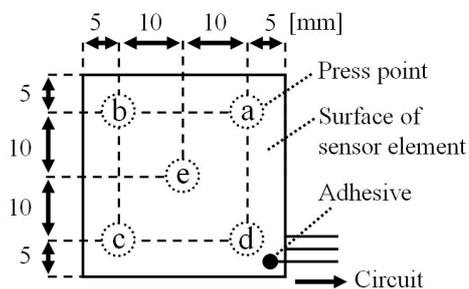


Fig. 13 Pressed positions; the center and the four corners.

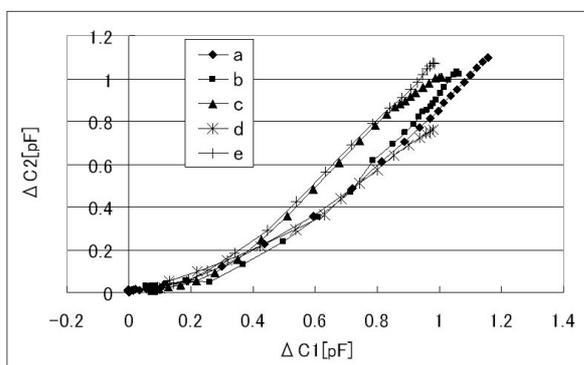


Fig. 14 Experimental results on effect of contact position. Measured trajectories of $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ s for the stimulator B: $D = 10$ mm.

でこの実験では触覚素子上の接触位置によって感度がばらつくかどうかを確認した。Fig. 13 に示すように触覚素子表面の四隅 (a ~ d) と中央 (e) に対象物体 B を押し当てた。

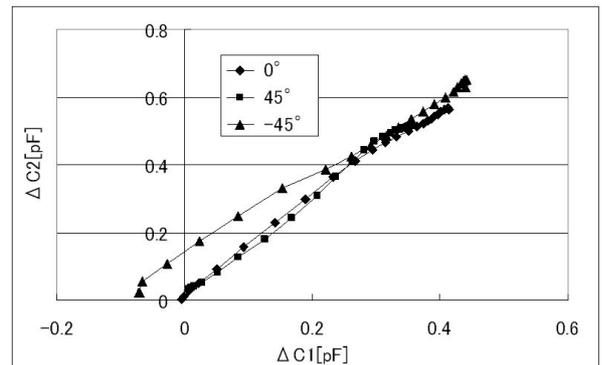


Fig. 15 Experimental results on effect of force direction. Measured trajectories of $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ s for the stimulator A: $D = 0.5$ mm.

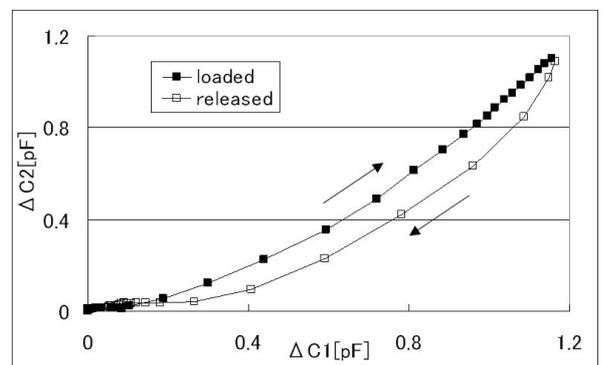


Fig. 16 Experimental results on effect of viscoelasticity. Measured trajectories of $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ s for the stimulator B: $D = 10$ mm.

その他の実験条件は 2.3.1 と同様とした。

計測した $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ を Fig. 14 に示す。対象物体を押し当てる位置によるばらつきは 0.2 pF 程度である。これは Fig. 10 において B-C 間の差が 0.6 pF 程度であることから、線形を仮定すると直径 10 mm に対して 3 mm (30%) 程度の推定誤差に相当する。このばらつきは、実際の導電繊維に生じる張力が無視できないため、中央と隅で導電繊維の変位分布が異なったものになることが原因と考えられる。

2.3.4 力の方向の影響

導電繊維間の距離は表面に垂直な方向の力によってのみ変化するため、提案する触覚素子は表面に平行な方向の力には感度を持たない。そこでこの実験では、力の表面に平行な成分が出力に影響するかどうかを確認した。触覚素子中央へ垂線に対して 0° (垂直), $\pm 45^\circ$ の角度から対象物体 A を押し当てた。その他の実験条件は 2.3.1 と同様とした。

計測した $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ を Fig. 15 に示す。押し当てる角度、すなわち表面に平行な力の成分によるばらつきは 0.1 pF 程度であり、これは 2.3.6 で述べる繰り返しによる誤差と同程度である。

2.3.5 粘弾性の影響

Figs. 10, 12, 14, 15 は押し込み動作中の容量変化をプロットしたものである。押し込んだ後に対象物体を離すと、

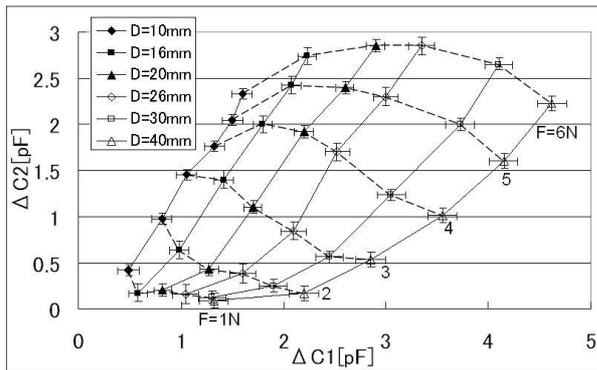


Fig. 17 Experimental results on reproducibility. Averaged trajectories of $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ s for various (F, S) s with error bars representing the maximal deviations.

初期状態に戻るまでの時間遅れが観測された (Fig. 16). これは絶縁層がもつ粘弾性のためである. 対象物体が離れた後 $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ が原点に戻るまでの時間は 1 s 程度であり, その間は (F, S) が誤推定されることになる. これより十分長い周期 (例えば 2 s 以上) で荷重・抜重を繰り返す場合には誤差は生じない.

2.3.6 再現性

この実験では触覚素子の出力に再現性があることを確認した. $D = 10, 16, 20, 26, 30, 40$ mm の対象物体を触覚素子の中央へ機械式アーム (Z ステージ) で支持しながら垂直に, 5 回ずつ準静的に押し当てた. 同時に押し当て力の計測も行った. この実験条件は, これまでの実験よりも力について詳細なデータを得るためのものである. またこの実験ではこれまでの実験と別の試作触覚素子を用いたため, 静電容量変化の大きさがこれまでとはやや異なっている.

計測した $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ の平均値を Fig. 17 に示す. 各 D に関するデータの最大偏差をエラーバーとして示してある. 5 回分のばらつきは最大でも ΔC_1 方向に 0.15 pF, ΔC_2 方向に 0.1 pF 程度であり, 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. この $F = 1 \sim 6$ N, $D = 10 \sim 40$ mm の領域は, 各軸方向の最大偏差を 1 辺とする長方形で区切ると 164 区画に分割される. これは試作触覚素子から 7 bit 強の情報量が取れることを表わしている.

3. 境界連結通信

提案する触覚素子を用いて人工皮膚を構成するための要素技術として, われわれは新しい信号伝送法を提案している. その伝送法とは, それぞれ孤立した導電領域の境界に LSI チップを配置する方法である¹⁶⁾. チップはその導電領域を介して通信を行い, パケットをマルチホップさせることにより目的地へ伝送する. 導電領域として柔軟なシート状の材料を用いることにより, システム全体に柔軟性を持たせることができる. 現在, このチップに触覚素子の静電容量を計測する機能も搭載した計測/通信チップを開発中である.

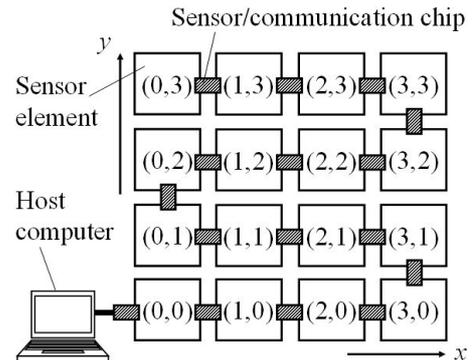


Fig. 18 Scheme of sensor skin. Each sensor element has its specific coordinate as shown in the figure.

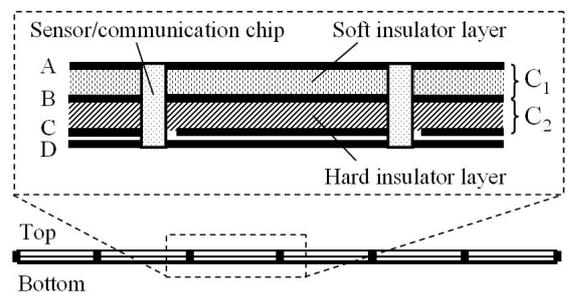


Fig. 19 Cross-section of robot skin using LSI chip. A: Ground layer, B: Sensor/signal layer, C: sensor layer, and D: Power layer.

3.1 人工皮膚の構成

人工皮膚の構成を Fig. 18 に示す. 非線形触覚素子を二次元的に配列し, それらの境界に LSI チップを配置する. 将来的には触覚素子の 4 辺すべてにチップを配置する予定であるが, ここでは通信プロトコルを単純化するため, 触覚素子をチップによって数珠繋ぎ状に接続する. 各触覚素子には固有の座標値 (x, y) が割り振られ, $(0, 3)$ がもっとも上流であり, もっとも下流の $(0, 0)$ がホストコンピュータに接続されている. チップは触覚素子を構成する導電繊維間の静電容量を計測し, 計測データをその導電繊維を通して送信する. 現在は座標値を 2 ビットで扱っているため 4×4 のアレイになっているが, 割り当てるビット数を増やすことにより容易にアレイサイズの拡張が可能である.

人工皮膚の断面を Fig. 19 に示す. 計 4 枚の導電繊維からなっており, もっとも外側のグラウンド層 (A 層) と電源層 (D 層) からチップへの電力供給を行う. またこれら A, D 層は外来ノイズを遮断する働きもする. A, B, C 層が非線形触覚素子を構成する. チップは A-B 間, B-C 間の静電容量 C_1, C_2 を計測する. そしてその計測データを B 層を介して隣のチップへ送信する.

3.2 パケットとチップの動作

チップは平常時は信号待機し, パケットを受信したときそのパケットに応じた処理を行う. 基本的にパケットは上流から下流へ伝送され, パケットの種類はデータパケットと計測指令パケットの 2 種類である.

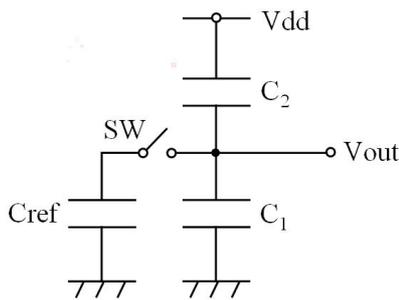


Fig. 20 Circuit of measurement system.

3.2.1 データパケット

データパケットは、触覚素子の座標と容量計測値を含むパケットである。これを受信したとき、チップはそのパケットをそのまま、下流（ホストコンピュータ側）へ送信する。

3.2.2 計測指令パケット

計測指令パケットは、チップが容量計測を行うトリガーとなるパケットである。これを受信したとき、チップは触覚素子の静電容量を計測し、その座標と容量計測値をデータパケットとして下流のチップへ送信する。さらに一定時間経過後に、下流のチップへ計測指令パケットを送信する。ただしもっとも上流に位置する座標 (0,3) のチップのみ、計測指令パケットなしに一定時間ごとに同様の動作をする。この動作を繰り返すことによって、ホストコンピュータへすべての触覚素子の計測値が伝送される。

今回は簡単のため、前述のように上流から計測を逐次行なっていく方式を採用している。しかしこの方式では、あるチップが容量計測も通信もしていない時間が長い無駄が多い。将来的にはネットワーク上に複数のパケットが同時に存在するようにしたり、できるだけ長い時間で高精度な容量計測をするなど、より高度なものにしていく予定である。

3.3 計測法

チップによる触覚素子の静電容量計測は以下のようにして行われる。計測系の等価回路を Fig. 20 に示す。触覚素子の C_1 , C_2 の接続部 (Fig. 19 の B 層にあたる) には、スイッチ (SW) を介して参照容量 C_{ref} が接続されている。SW が OFF の場合、ON の場合それぞれにおける分圧 V_{out} [V] は次のように表される。

$$V_{out}(\text{OFF}) = \frac{C_2}{C_1 + C_2} V_{dd} \quad (13)$$

$$V_{out}(\text{ON}) = \frac{C_2}{C_1 + C_2 + C_{ref}} V_{dd} \quad (14)$$

チップは V_{out} を 8 ビット A/D 変換し、その計測値をデータパケットとして送信する。(13), (14) 式を解くことにより、 C_1 , C_2 を得ることができる。計測の前には初期化のため、極板に蓄えられた電荷をすべて開放する操作を行う。

3.4 試作 LSI チップ

試作チップを Fig. 21 に示す。0.35 μm CMOS プロセスで試作されたアナログ・デジタル混載チップであり、動作

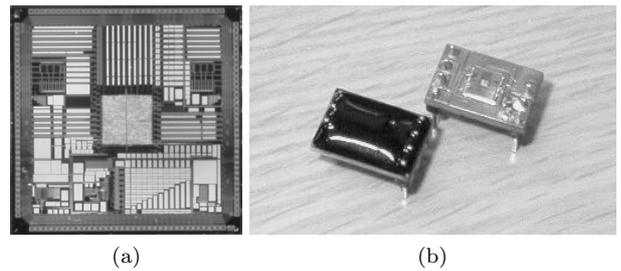


Fig. 21 (a) Closeup top view of CMOS LSI chip. The size of the chip is $5 \times 5 \text{ mm}^2$. (b) CMOS LSI chip after bonding (right) and molding (left).

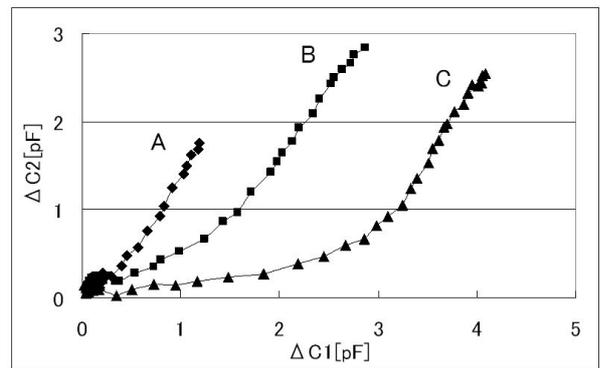


Fig. 22 Experimental results for operation check of prototype of sensor/communication chip. Measured trajectories of $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ s for the stimulators A: $D = 10 \text{ mm}$, B: $D = 20 \text{ mm}$, and C: $D = 40 \text{ mm}$.

周波数は 50 MHz である。チップサイズは $5 \times 5 \text{ mm}^2$ であり、そのうちデジタル回路部は $1 \times 1 \text{ mm}^2$ に収められている。 V_{out} を計測するため、8 ビット A/D コンバータを搭載している。このチップでは、計測したデータを 1 ms ごとに送信するように設定してある。

チップが静電容量を計測し、そのデータが正しく送信されていることを実験により確認した。チップからの信号を FPGA で受信し、USB を介して PC に取り込んだ。チップによる計測のサンプリングレートは 1 kHz であるが、受信側がまだ完全ではないため全体としての実効的なサンプリングレートは 60 Hz であった。A: $D = 10 \text{ mm}$, B: $D = 20 \text{ mm}$, C: $D = 40 \text{ mm}$ の円形の対象物体（アクリル製の円柱）を触覚素子中央に手で垂直に押し当て、5 N 程度まで徐々に力を加えながら約 1 s 押し込んだ。計測された時系列データを Fig. 22 に示す。チップによって C_1 , C_2 が計測され、その結果から A, B, C を識別できることがわかる。

4. おわりに

本稿でわれわれは、人間の触覚特性にもとづいた、新しい触覚素子を提案した。その触覚素子は接触力と同時に接触面積を取得する。接触面積（対象物体の鋭さ）は触感形成に重要なパラメータであると考えられる。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。さらに触覚

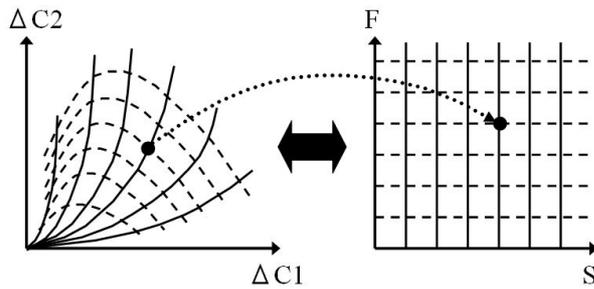


Fig. 23 Mapping from $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ to (F, S) for estimation.

素子を構成する導電層を通信路としても用い、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、ロボットの全身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。

今後、提案した触覚素子の詳細な性能評価、接触力・接触面積に対する感度の向上、容量変化から力と面積を推定するアルゴリズムの確立 (Fig. 23)、及び触覚素子と計測/通信チップによる人工皮膚の実装・改良を進めていく。

謝辞 (株)セルクロスの浅村氏、湯浅氏、箱崎氏、王氏、板井氏には、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。また実験の一部を東京大学工学部計数工学科の伊藤氏に行なってもらいました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura: The intelligent ASIMO: System overview and integration, Proc. of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2002), **3**, 2478/2483 (2002)
- 2) K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, H. Hirukawa, T. Kawasaki, M. Hirata, K. Akachi, and T. Isozumi: Humanoid robot HRP-2, Proc. of the IEEE 2004 International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004), **2**, 1083/1090 (2004)
- 3) T. Shibata, K. Wada, and K. Tanie: Tabulation and analysis of questionnaire results of subjective evaluation of seal robot in Japan, U.K., Sweden and Italy, Proc. of the IEEE 2004 International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004), **2**, 1387/1392 (2004)
- 4) M. Fujita: AIBO: Toward the era of digital creatures, The International Journal of Robotics Research, **20-10**, 781/794 (2001)
- 5) M. H. Lee and H. R. Nicholls: Tactile sensing for mechatronics - A state of the art survey, Mechatronics, **9**, 1/31 (1999)
- 6) 篠田裕之: 接触センシングの現状と今後の展開, 日本ロボット学会誌, **20-4**, 385/388 (2002)
- 7) E. S. Kolesar and C. S. Dyson: Object imaging with a piezoelectric robotic tactile sensor, IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, **4**, 87/96 (1995)
- 8) 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 Confer-

ence on Robotics and Automation (ICRA '98), 2281/2286 (1998)

- 9) 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, **2**, 981/986 (1999)
- 10) F. Castelli: An integrated tactile-thermal robot sensor with capacitive tactile array, IEEE Transactions on Industry Applications, **38-1**, 85/90 (2002)
- 11) 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), **1**, 1/6 (2003)
- 12) M. Shimojo, A. Namiki, M. Ishikawa, R. Makino and K. Mabuchi: A tactile sensor sheet using pressure conductive rubber with electrical-wires stitched method, IEEE Sensors Journal, **4**, 589/596 (2004)
- 13) T. Hoshi and H. Shinoda: A tactile sensing element for a whole body robot skin, Proc. of 36th International Symposium on Robotics (ISR 2005) (2005)
- 14) 大山正, 今井省吾, 和気典二 (編): 新編感覚・知覚ハンドブック, 1232, 誠信書房 (1994)
- 15) 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), 90/96 (2004)
- 16) A. Okada, Y. Makino and H. Shinoda: Cell bridge: A signal transmission element for constructing high density sensor networks, Proc. of 2nd International Workshop on Networked Sensing Systems (INSS 2005), 180/185 (2005)
- 17) G. R. Strobl: The Physics of Polymers: Concepts for Understanding Their Structures and Behavior, Chap. 7, Springer (1997)

《付 録》

A. 静電容量変化の近似式の導出

A.1 $\sigma \ll E_n$ (小変形領域) の場合

テイラー展開して σ/E_n の 3 次以上の項を無視すると、領域 S 内における伸長比 λ_n は以下のように近似される。

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

$$= \sqrt[3]{1 + \left(\frac{\sigma}{E_n}\right)^3} + \dots + \sqrt[3]{-\left(\frac{\sigma}{E_n}\right)^3} + \dots \quad (\text{A.2})$$

$$= \left\{ 1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\sigma}{E_n}\right)^3 + \dots \right\} - \left\{ \frac{\sigma}{E_n} + \dots \right\} \quad (\text{A.3})$$

$$\simeq 1 - \frac{\sigma}{E_n} \quad (\text{A.4})$$

そのときの静電容量変化 ΔC_n は以下のように近似される。ここで S_E [m²] は触覚素子表面の全面積である。

$$\Delta C_n = \left\{ \frac{\varepsilon_n(S_E - S)}{d_n} + \frac{\varepsilon_n S}{d_n - (d_n - d_{0n})(\sigma/E_n)} \right\} - \frac{\varepsilon_n S_E}{d_n} \quad (\text{A.5})$$

$$= \frac{\varepsilon_n(S_E - S)}{d_n} + \frac{\varepsilon_n S}{d_n} \left\{ 1 + \frac{d_n - d_{0n}}{d_n} \frac{\sigma}{E_n} + \left(\frac{d_n - d_{0n}}{d_n} \frac{\sigma}{E_n} \right)^2 + \dots \right\} - \frac{\varepsilon_n S_E}{d_n} \quad (\text{A.6})$$

$$\simeq \frac{\varepsilon_n(d_n - d_{0n})}{d_n^2 E_n} F + \frac{\varepsilon_n(d_n - d_{0n})^2}{d_n^3 E_n^2} \frac{F^2}{S} \quad (\text{A.7})$$

A.2 $\sigma \gg E_n$ (大変形領域) の場合

テイラー展開して E_n/σ の1次以上の項を無視すると、領域 S 内における伸長比 λ_n は以下のように近似される。

$$\lambda_n = \sqrt[3]{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{\sigma}{E_n}\right)^3}} + \sqrt[3]{\frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{\sigma}{E_n}\right)^3}} \quad (\text{A.8})$$

$$= \sqrt{\frac{\sigma}{E_n}} \sqrt[3]{\frac{1}{2} \left(\frac{E_n}{\sigma}\right)^{\frac{3}{2}} + 1 + \frac{1}{8} \left(\frac{E_n}{\sigma}\right)^3 + \dots} + \sqrt{\frac{\sigma}{E_n}} \sqrt[3]{\frac{1}{2} \left(\frac{E_n}{\sigma}\right)^{\frac{3}{2}} - 1 - \frac{1}{8} \left(\frac{E_n}{\sigma}\right)^3 + \dots} \quad (\text{A.9})$$

$$= \sqrt{\frac{\sigma}{E_n}} \left\{ 1 + \frac{1}{6} \left(\frac{E_n}{\sigma}\right)^{\frac{3}{2}} + \frac{1}{24} \left(\frac{E_n}{\sigma}\right)^3 + \dots \right\} - \sqrt{\frac{\sigma}{E_n}} \left\{ 1 - \frac{1}{6} \left(\frac{E_n}{\sigma}\right)^{\frac{3}{2}} + \frac{1}{24} \left(\frac{E_n}{\sigma}\right)^3 + \dots \right\} \quad (\text{A.10})$$

$$= \frac{1}{3} \frac{E_n}{\sigma} + \dots \quad (\text{A.11})$$

$$\simeq 0 \quad (\text{A.12})$$

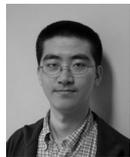
そのときの静電容量変化 ΔC_n は以下のように計算される。

$$\Delta C_n = \left\{ \frac{\varepsilon_n(S_E - S)}{d_n} + \frac{\varepsilon_n S}{d_{0n}} \right\} - \frac{\varepsilon_n S_E}{d_n} \quad (\text{A.13})$$

$$= \frac{\varepsilon_n(d_n - d_{0n})}{d_n d_{0n}} S \quad (\text{A.14})$$

[著者紹介]

星 貴之 (学生会員)



2003年東京大学工学部計数工学科卒業。2005年同大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程修了。同年同博士課程進学、現在に至る。触覚センサスキンの研究に従事。日本ロボット学会の会員。

篠田 裕之 (正会員)



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、同年同大学助手、95年同大学博士(工学)。同年東京農工大学講師、97年同助教授、99年UC Berkeley 客員研究員、2001年東京大学情報理工学系研究科助教授、現在に至る。触覚センサなどの研究と教育に従事。電気学会などの会員。