

## 非線形弾性を利用する触覚センシング

## Tactile Sensing Using Non-Linear Elastic Property

○星貴之 正 篠田裕之 (東京大学)

Takayuki HOSHI and Hiroyuki SHINODA, University of Tokyo, {star, shino}@alab.t.u-tokyo.ac.jp

We propose a new sensor element for a tactile sensor skin which covers a large area such as a whole surface of a robot. One strategy to improve the ability of a tactile sensor is to make sensor elements very small and to array them in high density. But there are difficulties in the wiring of vast amount of elements. Our sensor elements are based on another strategy; the density of sensor elements remain low and the element acquires not only contact force but contact area. The non-linear elastic property of urethane foam is used to realize such performance. This paper provides the structure and theory of our tactile sensor element, and presents experimental results.

**Key Words:** Tactile sensor, Contact area, Non-linear elastic property

## 1. はじめに

近年、人間と共存するロボットを目指す研究が盛んになされており、その全身を覆う触覚センサへの期待が高まっている。人間のような皮膚触覚を工学的に実現するためには、対象物体との接触によって生じる圧力や変形に関する何らかのパラメータを検出するセンサ素子を多数配列する必要がある。ロボットを覆う人工の皮膚を目指した研究はすでにいくつか報告されているが、それらのセンサアレイの解像度は比較的粗く、そこに多様な触感を検出する能力を付加することは現時点での大きな課題である。[1]

触覚センサの能力を向上させるために試みられる一つの方針は、センサ素子を微小化し高密度に配置することで触覚の分解能を高めることである。この方針ではロボットの全身という大面積を覆う際に、センサ素子数の増加にともなう膨大な配線が解決すべき大きな問題となる。

その問題を避ける新たな方針として、我々はセンサ素子アレイの密度が低いまま検出する触感のバリエーションを大きく向上させる方法を提案している。[2] その方法とは、前腕部などの二点弁別閾と同程度の分解能で表面応力分布を取得し、さらにもう一つの自由度として各センサ素子上での表面応力分布の広がりに関するパラメータを取得することで人間の皮膚に近い十分な触感を得ようとするものである。これは、人間が二点弁別閾 40 [mm] 程度の前腕部においても鉛筆のおしりと先端を容易に判別できるという触感特性に注目した方法である。この特性から人間は皮膚触覚で対象物体の鋭さをよく検出しており、それが触感を決定する主要因になっていると推測される。

本稿ではこの提案手法を実現するセンサ素子を紹介する。材料である発泡ウレタンの表面応力に対する非線形弾性を利用することにより、表面応力の強さと広がりを同時に取得することが可能となる。本稿ではそのセンサ素子の構造と非線形弾性を利用する計測の原理について述べ、試作したセンサ素子の基本的な動作を確認した実験結果を示す。

## 2. センサ素子構造

本稿で紹介するセンサ素子の構造は非常に簡単なものとなっている。図 1 に断面図を示す。センサ素子は二つの発泡ウレタンの層から成り、浅部が密度 15 [kg/m<sup>3</sup>] の軟らかい層、深部が密度 60 [kg/m<sup>3</sup>] の硬い層である。30×30 [mm<sup>2</sup>] の導電繊維が各層を挟むように三枚配置され、発泡ウレタンと基材なし両面テープで接着されている。一辺の長さ 30 [mm] は、人間の前腕部などの二点弁別閾と同程度の大きさを意図したものである。それぞれの導電繊維には導線がつながれ、向かい合う導電繊維を極板とするコンデンサが各層に構成される。浅部に構成されるコンデンサを C<sub>1</sub>、深部のコンデンサを C<sub>2</sub> と呼ぶことにする。また硬いロボット表面に触覚センサを貼付することを想定し、試作センサ素子の底面をアクリル板に貼付する。

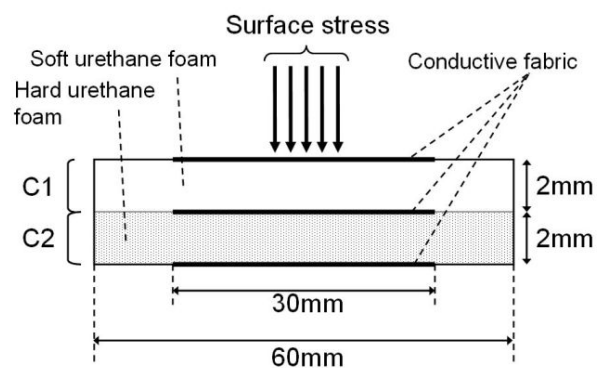


Fig. 1 Cross-section of the sensor element.

## 3. 計測原理

前章で示したセンサ素子構造によって表面応力の強さと広がりを取得する触覚センシングの原理を説明する。図 2 のようにセンサ素子表面に対して垂直に加えられ、接触面 S 内で一様な表面応力分布  $\sigma(x, y)$  [Pa] を仮定する。そのような表面応力分布は、 $F$  [N] を接触力、 $S$  [m] を S の面積として

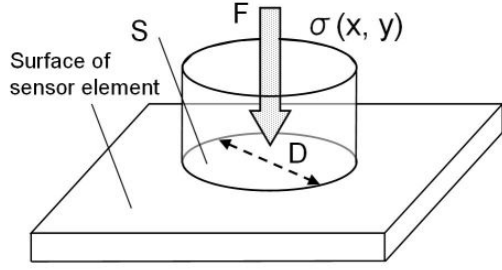


Fig. 2 Supposed surface stress  $\sigma(x,y)$ .

式(1)のように表される。S は円であると仮定し、その直径  $D$  [m] を  $S$  を表すパラメータとして用いる。

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

センサ素子の材料として用いた発泡ウレタンはヤング率が非常に小さいため、押し込みが大きいほどそれ以上押し込みづらくなるという非線形な弾性を容易に示す。その非線形弾性が式(2)に従うと仮定する。式(2)はエントロピー弾性を表す式である。[3]

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

$$\lambda_n = 1 - \frac{\Delta d_n}{d_n} \quad (3)$$

$E_n$  [Pa] は弾性率、 $\lambda_n$  は伸長比、 $d_n$  [m] は層の厚さ、 $\Delta d_n$  [m] は変位である。また  $n$  はセンサ素子の層を表す添え字であり、1 が浅部を、2 が深部を表す。実測した結果、 $E_1$  が 4,800 [Pa]、 $E_2$  が 15,400 [Pa] 程度であった。問題を簡単化するため、導電繊維は引き伸ばされても張力を生じないとし、また発泡ウレタンのポアソン比が 0 であると仮定する。この二つの仮定により発泡ウレタンでの横方向の干渉が無視でき、 $\Delta d_n(x,y)$  は直上の  $\sigma(x,y)$  のみによって決定されることができ、 $E_n$  が層によって異なるため、ある  $(F,D)$  を持つ表面応力に対してそれぞれの層に生じる  $\Delta d_n(x,y)$  も異なった分布となる。

その  $\Delta d_n(x,y)$  を検出するため、我々は各層をはさむ導電繊維の間の静電容量を計測する。その容量の変化  $\Delta C_n$  [F] は式(4)のように書かれる。 $\epsilon_n$  [F/m] は発泡ウレタンの誘電率である。

$$\Delta C_n = \frac{S\epsilon_n}{d_n - \Delta d_n} - \frac{S\epsilon_n}{d_n} \quad (n=1,2) \quad (4)$$

容量変化は  $F$  と  $D$  両方の影響を受けるため、容量変化を一つの層に関して計測するだけではどちらの量も取得することができない。しかし二つの層について  $(\Delta C_1, \Delta C_2)$  を計測し、センサ素子表面に加える表面応力の  $(F, D)$  とのマッピングをうまくとることができれば、 $F$  と  $D$  を同時に取得することが可能となる。

以上の議論に基づき 2 章で示したセンサ素子構造に関して数値計算を行った。式(2)を用いる際、現実の物体は無限に圧縮される ( $\lambda_n$  が無限に 0 に近づく) ことはないので、厚みに 0.2 [mm] のオフセットを考えている。 $F$  と  $D$  を変化させたときの  $\Delta C_1, \Delta C_2$  を図 3、図 4 にそれぞれ示す。 $C_1$  は軟らかい層なので容易に圧縮され、すぐに  $\Delta C_1$  が一定値に漸近し始める。一方、 $C_2$  は硬い層なので  $C_1$  のグラフの原点付近を接触力の軸に関して拡大した形のグラフとなっている。図 5 は  $(\Delta C_1, \Delta C_2)$  をプロットしたものである。異なる  $(F, D)$  がそれぞれ異なる  $(\Delta C_1, \Delta C_2)$  に対応しており、マッピングが可能であることがわかった。

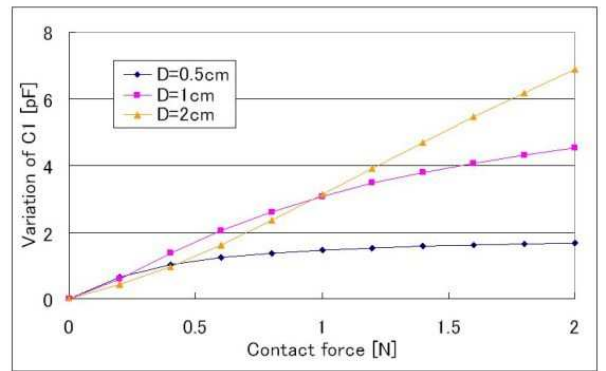


Fig. 3 Simulation results. Calculated  $\Delta C_1$  for various  $(F, S)$ s.

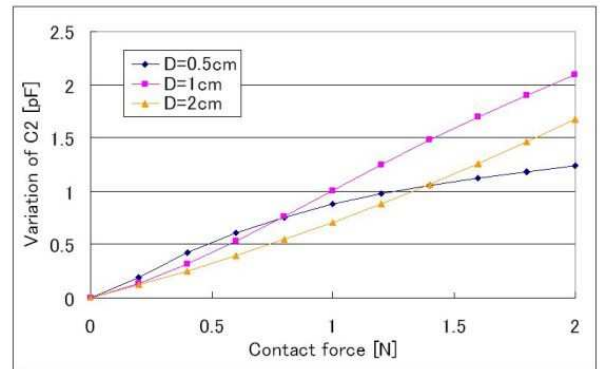


Fig. 4 Simulation results. Calculated  $\Delta C_2$  for various  $(F, S)$ s.

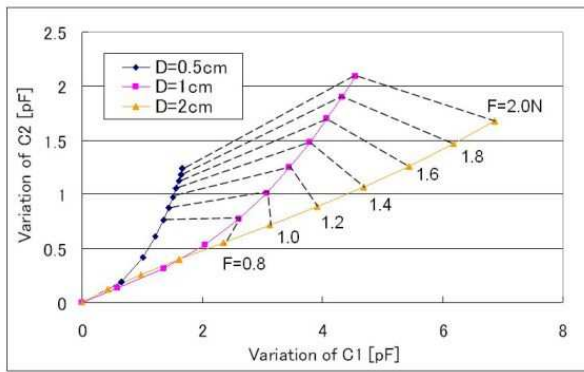


Fig. 5 Simulation results. Calculated ( $\Delta C_1$ ,  $\Delta C_2$ ) for various ( $F$ ,  $S$ )s.

#### 4. 実験

図 4 に実験系を示す。センサ素子をコンデンサとする RC 発振を起こし、一定時間カウントしたパルス数から各層の静電容量を計算で求めた。デジタル I/O を介してカウント値を回路から PC に取り込んだ。サンプリング周波数は約 80 [Hz] であった。

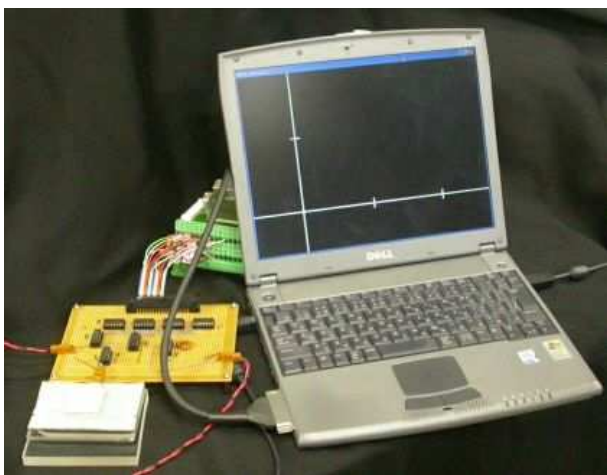


Fig. 6 Experimental setup.

##### 4.1 実験 1: 平面上に素子を貼付した場合

試作したセンサ素子によって異なる直径の刺激が識別可能であることを確認する基礎的な実験を行った。用意したテスト刺激は直径 0.5 [mm]、1 [cm]、2 [cm]、そして全面荷重の四種類で、それぞれの刺激をセンサ素子表面の中央に垂直に提示した。10 [N] 程度までの接触力を加えた。

図 7 に実験結果を示す。図 5 の理論曲線と同様に  $D$  一定の曲線が互いに離れており、A、B、C、D それぞれの識別が可能であることが確認できた。各試行においてヒステリシスが見られるが、識別には影響がない程度である。理論曲線よりも容量変化が小さいのは、導電繊維に張力が存在して変位の妨げとなっていることや発泡ウレタンのポアソン比が実際には 0 ではないことなどが原因として考えられる。

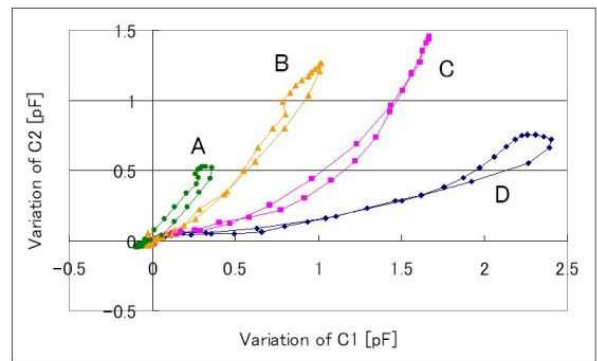


Fig. 7 Experimental results with the flat base. Measured ( $\Delta C_1$ ,  $\Delta C_2$ ) for various ( $F$ ,  $S$ )s. A:  $D=0.5$  [mm], B:  $D=1$  [cm], C:  $D=2$  [cm], D: whole area.

##### 4.2 実験 2: 曲率のある面上に素子を貼付した場合

ロボットの表面は平面とは限らず、球面のように曲率を持つ場合も考えられる。そこで、曲率のある面にセンサ素子を貼付した場合にも刺激の識別が可能であることを確認する実験を行った。実験で用いた土台を図 8 に示す。アクリル板に高さ 6 [mm]、曲率半径 45 [mm] の球面状の隆起を作り、その上に試作センサ素子を貼付した。実験 1 と同様に四種類の刺激を曲面上のセンサ素子に提示した。

図 9 に実験結果を示す。センサ素子が曲面上に貼付されているため、全面荷重用の  $D$  の刺激素子が実際に接触している面積が小さくなり C と識別しづらくなっている。しかしそれでも A、B、C は識別可能であることが確認できた。

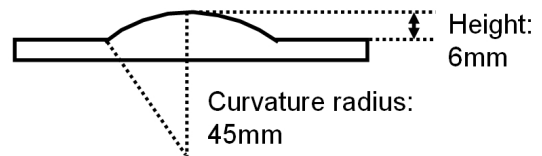


Fig. 8 Cross-section of the curved base.

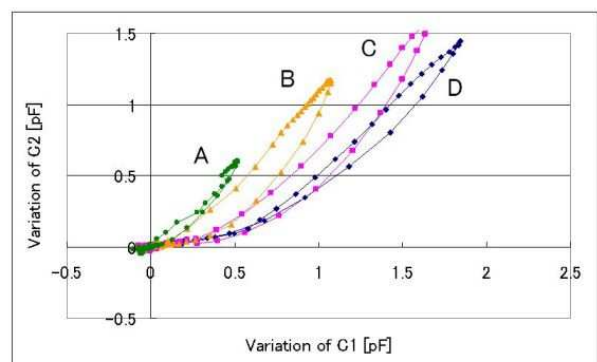


Fig. 9 Experimental results with the curved base. Measured ( $\Delta C_1$ ,  $\Delta C_2$ ) for various ( $F$ ,  $S$ )s. A:  $D=0.5$  [mm], B:  $D=1$  [cm], C:  $D=2$  [cm], D: whole area.

## 5. おわりに

本稿では、我々が開発した表面応力の強さと広がりを同時に取得するセンサ素子を紹介した。それを用いることで人間の前腕部の二点弁別閾程度の分解能でも十分な触感が得られる触覚センサが実現できると考えている。センサ素子の構造は非常に簡単で、二層の発泡ウレタンを導電繊維ではさむだけである。発泡ウレタンは層によって硬さが異なり、同一の表面応力分布に対してそれぞれ異なる変位分布を生じる。その変位分布を、導電繊維の間の静電容量を計測することによって検出する。表面応力の強さと広がりという二つの未知パラメータに対し二つの出力が得られ、それらの間に一対一対応が成り立つことを数値計算で示した。その対応関係により、表面応力の強さと広がりを取得することができる。試作センサ素子を用いた実験で、異なる広がりを持つ刺激の識別が可能であることを確認した。

本稿で述べた実験は基礎的なものであり、これから計測精度や発泡ウレタンの持つ粘性やヒステリシスによる誤差などを詳しく調べる必要がある。

## 文献

- [1] 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. 767-761, 2000.
- [2] 星貴之, 篠田裕之, "材料の非線形特性を利用した触覚センシング", 第 22 回日本ロボット学会学術講演会, CD-ROM, 2004.
- [3] G. R. ストローブル, "高分子の物理- 構造と物性を理解するために", シュプリンガー・フェアラーク東京, 1998.