

材料の非線形特性を利用する触覚センシング

星貴之 (東京大学) 篠田裕之 (東京大学)

Tactile Sensing Using Non-Linear Property of Elastomer

*Takayuki HOSHI(The University of Tokyo)
and Hiroyuki SHINODA(The University of Tokyo)

Abstract— We propose a new tactile sensor which covers a large area with a small number of sensor elements. The element acquires not only the average of surface stress but a parameter related to the concentration of stress field by using the non-linear property of the elastomer. The size of one element is as large as the human two-point-discrimination threshold and the element detects the sharpness of the object surface smaller than the element. This paper describes the theory of our tactile sensing and presents the experimental results.

Key Words: Tactile sensor, Concentration of stress field, Non-linear property

1. はじめに

人間の触覚機能を工学的に実現するためには、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。ロボットの全身を覆う人工皮膚を目指した研究としてはすでにいくつかの報告があるが、それらのセンサアレイの解像度は比較的粗いものであり、そこに多様な触感を検出可能な能力も付与することは現時点での大きな課題である。[1]

触覚の能力を高める一つの方向性はセンサアレイの解像度を高めることであるが、本研究ではアレイの密度は低いままでも、皮膚が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する。その方法とは、表面応力分布については前腕部の二点弁別閾と同程度の分解能で取得し、さらにもう1つの自由度として表面応力分布の広がりに関するパラメータをサンプル点ごとに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。また、センサ素子の構造は内部に導電領域を配置するだけの簡単なものである。人間は二点弁別閾4[cm]程度の前腕部においても、例えば鉛筆のおしりか先端かの区別ができる。人間の皮膚触覚も集中度を感度よく検出しており、それが触感を決定する主要因となっていると予想される。

本稿では、最初に集中度取得の原理について述べ、次に表面応力に対する材料の非線形特性を利用した集中度、表面応力の同時取得について考察する。最後に試作したセンサ素子の評価実験の結果を報告する。

2. 応力分布集中度検出の原理

2.1 集中度の定義

センサ素子表面 (x - y 平面) 上の領域 S (面積 S [m^2]) に表面応力分布 $\sigma(x, y)$ [Pa] が加えられたとき、その集中度 D [m^{-2}] を

$$D = \frac{\iint_S \{\sigma(x, y)\}^2 dx dy}{\{\iint_S \sigma(x, y) dx dy\}^2} \quad (1)$$

と定義する。この定義は、領域 s (面積 s [m^2]) 以外では0であるような表面応力分布

$$\sigma(x, y) = \begin{cases} F/s & \text{if } (x, y) \in s \\ 0 & \text{if } (x, y) \notin s \end{cases} \quad (2)$$

が加えられたとき s の逆数になるよう定められている。ここで F [N] は表面応力の総和である。

2.2 集中度検出の原理

弾性体内に深さの異なる面状の導電領域を配置し、その導電領域を極板とするコンデンサを形成する。弾性体表面に加えられた表面応力分布によって生じる静電容量変化を計測することで、表面応力の集中度を取得する。以下、その原理を説明する。

前述の様な表面応力分布 σ がセンサ素子表面に加えられた場合を考える。弾性体の誘電率を ε [F/m]、導電領域間の初期間隔を H [m] とする。領域 s のみが h [m] だけ押し込まれたと仮定すると、静電容量 C [F] は

$$C = \frac{(S-s)\varepsilon}{H} + \frac{s\varepsilon}{H-h} \quad (3)$$

となる。これにゴムの応力 - 伸長関係式 [2]

$$\sigma = \frac{E}{3} \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) \quad (4)$$

を適用すると、Fig. 1 のような容量変化 ΔC [F] のグラフが得られる。ここで E [Pa] は弾性体の弾性率、 λ は伸長比 ($1 - h/H$) である。また簡単のためにこれ以降は s を円と仮定し、その半径 r [m] を集中度を表すパラメータとして用いる。条件は後述の実験と同様とする。

Fig. 1 から半径が小さくなると容量変化が2~3倍に大きくなり、集中度が容量変化に反映されることがわかる。しかし容量変化の大きさは表面応力の総和にも依存するので、これだけでは集中度を取得することができない。

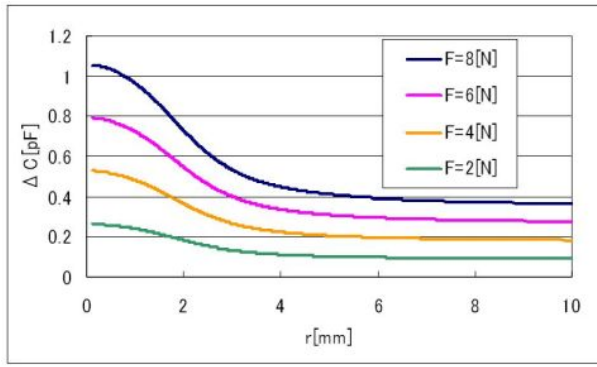


Fig.1 Theoretical relationship between radius and variation of capacitance

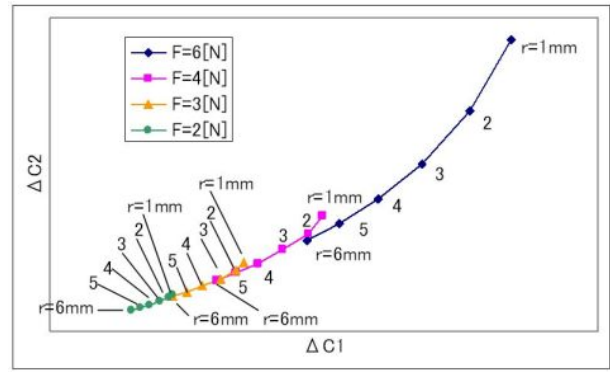


Fig.3 Relationship between ΔC_1 and ΔC_2 with linear model

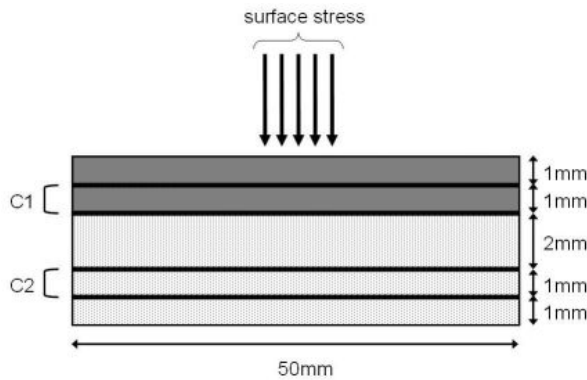


Fig.2 Structure of finite element model

2.3 材料の非線形性の利用

そこで我々は弾性体の空間的ローパスフィルタ効果に注目する。これは、弾性体の深部における応力分布が表面応力分布よりも広がることを表している。したがって深部にもコンデンサを配置すれば、その容量変化は集中度の影響を受けにくくなり、浅部のコンデンサの容量変化と比較することで表面応力の集中度と総和がわかる。なお実際にロボットの全身を覆う際には薄い構造のセンサ素子が望まれるので、弾性体の表面近くを他より硬くしてローパス効果を強める構造を採用する。これは人間の皮膚構造とも合致している。浅部、深部のコンデンサをそれぞれ C_1 、 C_2 と呼び、その容量変化を ΔC_1 、 ΔC_2 とする。Fig. 2 に示す線形弾性体の平面歪モデルを有限要素解析し、生じた変位分布から容量変化の仕方を計算した。2つの層のヤング率の比を10、ポアソン比を0.49とした。

まずは材料の応力 - 歪特性を線形と仮定した場合の結果を Fig. 3 に示す。添え字は各点における半径 r を表している。表面応力の集中度と総和の変化ほぼ同一曲線上に載っており、 $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ から (D, F) へのマッピングが困難である。つまりこのままでは表面応力の集中度と総和がうまく分離できないことがわかる。

次に、ここに材料の応力 - 歪特性の非線形性を導入する。線形の場合と同じ応力分布が弾性体内に生じると仮定し、前述の有限要素解析で得られた歪の値を用いる。具体的には、線形の応力 - 歪関係式

$$\sigma = E' \frac{h'}{H} \quad (5)$$

と (4) 式を連立させて非線形の場合の変位を計算した。 E' [Pa] は線形弾性体のヤング率である。このとき $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ のプロットは Fig. 4 のようになった。表面応力の集中度と総和の変化がそれぞれ異なる曲線上に載り、 $(\Delta C_1, \Delta C_2)$ から (D, F) へのマッピングが容易になっている。これならば容量変化のある一組に対して一意に表面応力の集中度と総和を求めることが可能である。

ここでの結果はある恣意的に選んだ非線形特性に基づくものではあるが、表面応力に対する材料の非線形特性を利用することによって表面応力の集中度と総和が同時に取得できる可能性があることがわかった。

3. 実験

3.1 試作

今回は、均一なシリコンゴム内に構成したコンデンサの容量変化に表面応力の集中度が反映されることを確認するために、極板2枚による1層構造のセンサ素子を試作した。(Fig. 5, Fig. 6)

30 [mm] × 30 [mm] の導電繊維の布を2枚使い、1枚目をシリコンゴムの表面から深さ 2 [mm]、2枚目を深さ 3 [mm] の位置に配置した。シリコンゴム全

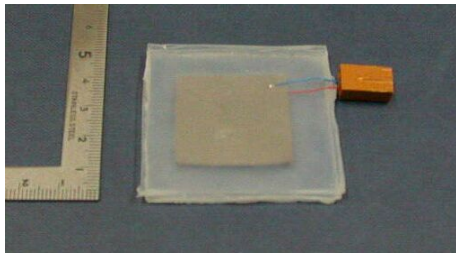


Fig.5 Prototype of sensor element

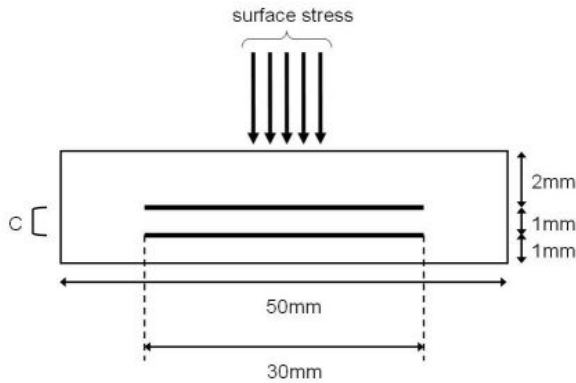


Fig.6 Structure of prototype

体の厚さは $4 [mm]$ とした。それぞれの導電布には端子として導線を接続し、1組のコンデンサとした。

3.2 実験装置

センサ素子と抵抗とインバータで発振回路を構成し、その発振周波数の変化によって容量変化 $\Delta C [pF]$ を計測した。シリコンゴム表面へ加える表面応力は、接触面の半径を $1 [mm]$ から $10 [mm]$ まで $1 [mm]$ 刻みで変えた 10 本の亚克力棒によって加えた。センサ素子を上皿はかりの上に載せ、そのはかりでセンサ素子に加えられる表面応力の総和を計測した。(Fig. 7)

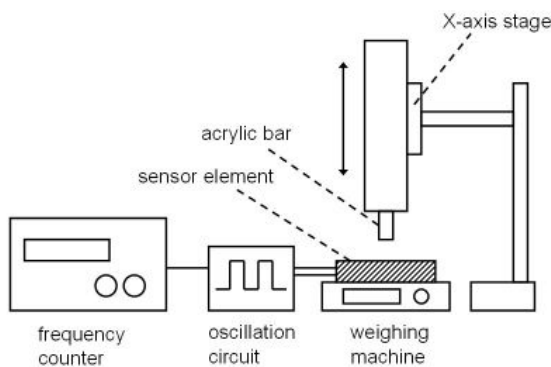


Fig.7 Experimental apparatus

3.3 結果

実験結果を Fig. 8 に示す。

集中度が大きくなると静電容量の変化が $10 \sim 15$ 倍に大きくなることが実際に確認できた。Fig. 1 と容量

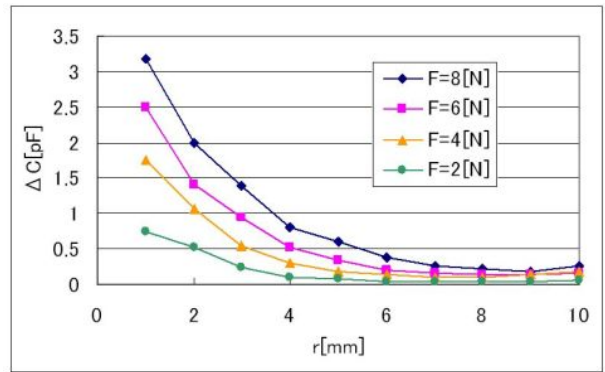


Fig.8 Experimental relationship between radius and variation of capacitance

変化の大きさが異なる点については、実際の極板変位がモデルで仮定したように矩形にはならないこと、導電布を配置したことによる弾性特性の変化などが原因として考えられる。

4. おわりに

本稿では、少ない素子数で大面積を覆うことのできる新しい触覚センサを提案した。それは、表面応力分布そのものは数 $[cm]$ 程度の分解能で取得し、さらに触覚形成の主要因と思われる集中度を取得することで様々な触感を得ようというものである。

センサ素子の構造は、シリコンゴム内に導電布を配置するという簡単なものである。実験で集中度が容量変化に反映され、容量変化の大きさが $10 \sim 15$ 倍の変化をすることを確認した。また、線形弾性のままでは表面応力の集中度と総和が縮退してしまうが、表面応力に対する材料の非線形特性を利用することにより表面応力の集中度と総和をうまく分離して取得できる可能性を示した。

今後、本稿で述べた表面応力の集中度と総和を同時に取得するセンサ素子を実際に作成し、理論の正当性及び触覚センサとしての性能を確認する予定である。

参考文献

- [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] G. R. ストロープル: 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.