

対称構造を利用した応力テンソルセンサ素子

Stress Tensor Sensor Based on Symmetric Structure

○ 清田 翔平 (東京大) 正 篠田 裕之 (東京大)
 Shohei KIYOTA, Tokyo University
 Hiroyuki SHINODA, Tokyo University

We propose a tactile sensor that is a rectangular rigid body with symmetrically-located stress sensors and embedded in an elastic body. The electrical power for the sensor and signal will be transmitted without wires in the future. The sensor measures six-degree-of-freedom stress tensor in the body and can distinguish between shear and normal stress on the surface of the body. The previously reported tactile sensors can not distinguish these stresses. In this paper, we verify the detection principle qualitatively by FEM simulation of two-degree-of-freedom model and we show the result in basic experiments using a prototype.

1. はじめに

触覚センシングにおける理想は、接触表面における応力 3 成分をそれぞれ分離して計測することである。弾性体内の任意の場所に埋め込むことが可能なセンサ素子によって、せん断応力を計測しようと試みたものに箱崎ら[1]や、武縄ら[2]の研究がある。どちらも弾性体内に T 字型の剛体を埋め込み、その剛体に変位センサを配置してその傾き具合を計測するものだが、弾性体における表面の変形を完全に記述できるものではなかった。例えば滑りを生じることの無い垂直応力の不均一な分布と、滑りを生じるせん断応力を区別できないという問題が残された。

そこで本研究では上記の問題を解決したうえで、6 自由度の応力テンソルを計測するセンサ素子を提案する(図 1)。図 1 は六面体の剛体の各面に二つずつ応力センサを配置した構造を持つセンサ素子で、弾性体内に埋め込んで用い、このセンサ素子の向かい合う二面一組に作用する垂直応力とせん断応力をそれぞれ 3 組計測する。これにより弾性体内の応力 6 成分を完全に計測することで、センサ素子の座標系を考慮する事無く表面における応力 3 成分を再構成することが可能になるだけでなく、よりリッチな情報を得ることができると考えられる[3]。各センサからの信号伝送や電力の供給は、将来的には文献[4]の二次元通信シートを用いて無配線で行うことを考えている(図 2)。これをロボットの人工皮膚や靴底など、任意の弾性体内に埋め込むことで、滑りを簡単に検出することができるようになる。

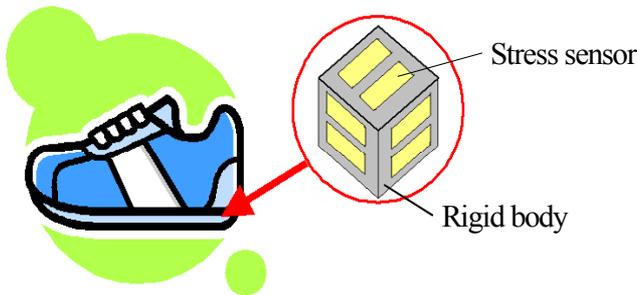


Fig.1 Stress tensor sensor.

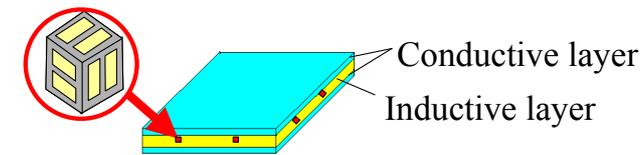


Fig.2 Two-dimensional signal transmission sheet[4]

2. 検出原理

提案する応力テンソルセンサ素子(図 1)の検出原理について説明する。簡単のためにここでは図 1 に示した六面体の向かい合っている二面一組について考えていく。

まずセンサ素子を構成する剛体周辺の応力を計測するため、弾性体中の応力分布をモデルを立てて考える。

弾性体内に直方体の剛体を配置し、弾性体内の剛体近傍における平行面と剛体の四隅がバネで繋がっているモデルを考える(図 3)。ここで図 3 における各バネの縮みを a_1, a_2, a_3, a_4 とし、 P_n をバネの縮みの x 軸方向の勾配に対応する値、 P_s を a_1 から a_2 へ向かうせん断応力に対応する値として以下のように定義する。

$$P_n = (a_1 - a_2) + (a_3 - a_4) \quad (1)$$

$$P_s = (a_1 - a_2) - (a_3 - a_4) \quad (2)$$

この剛体近傍の平面に a_1 から a_2 方向のせん断応力が加えられた場合(図 3(a))、モデルから $a_1 = a_4 > a_2 = a_3$ とすることができ、

$$P_n = 0 \quad (3)$$

$$P_s = 2(a_1 - a_2) > 0 \quad (4)$$

となる。(3) 式は垂直応力の x 軸方向勾配に対応する P_n が存在しないことを示しており、また(4) 式は a_1 から a_2 方向のせん断応力に対応する P_s の値が正になっている。したがって弾性体に加えられている応力はせん断応力であることが出力から判断できる。

同様に空間勾配のある垂直応力をかけた場合(図 3(b))、 $a_2 = a_4 > a_1 = a_3$ とすることができ、

$$P_s = 2(a_1 - a_2) < 0 \quad (5)$$

$$P_n = 0 \quad (6)$$

となる。(5) 式は a_2 から a_1 方向の垂直応力の勾配 P_n が存在することを示しており、(6) 式はせん断応力 P_s が存在しないことを示している。したがって弾性体に加えられている応力は垂直応力の勾配であることが出力から判断できる。

以上のように、センサ近傍の 4 箇所におけるひずみから弾性体内における垂直応力分布とせん断応力を区別することができる。

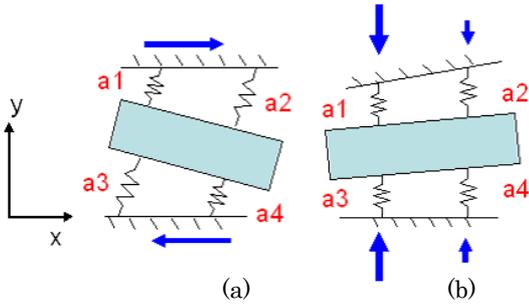


Fig.3 Physical model in detection principle:(a)applied shear stress and (b)nonuniform normal stress.

3. 数値シミュレーション

図 3 に示した構造を元に、シリコンゴム層の中に、金属の四角い剛体を配置した有限要素モデルを作成し、せん断応力を加えた場合と垂直応力を加えた場合のシミュレーションを行った。図 4 は鉛直方向の断面図である。

図 5(a) は弾性体上面(図の上面)に対して、一様な右向きせん断応力(赤い矢印)を加えた時に生じる上下方向の応力をプロットしたものである。赤が伸び方向、青が縮み方向の応力をあらわしており、図 3(a)で示したものと同様の応力の分布が生じていることがわかる。

図 5(b)は弾性体上面に対して、空間的な勾配のある垂直応力を加えたものである。剛体周辺における上下方向の応力勾配と、弾性体上面における応力勾配の向きが一致しており、図 3(b)と同様の状況が見て取れる。

以上により物理モデルの正しさを定性的に確認した。

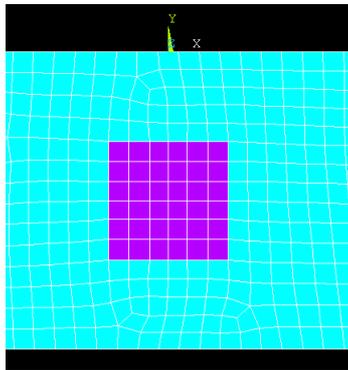


Fig.4 Simulation model.Blue: silicon rubber layer.Purple:rigidbody.

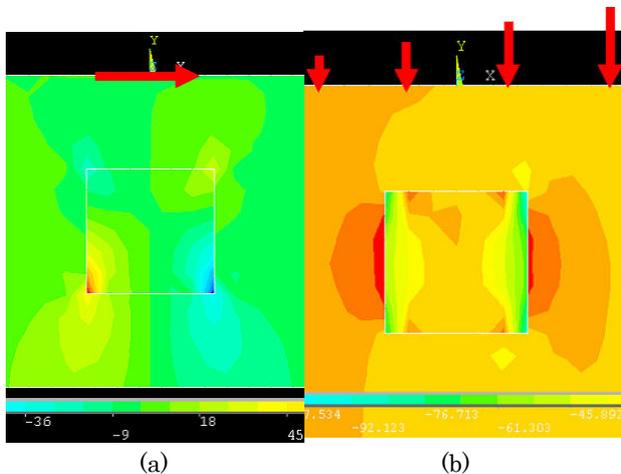


Fig.5 Simulation results: (a)applied shear stress and (b)nonuniform normal stress.

4. 実験

シミュレーション結果を元に応力が集中している剛体の四隅に静電容量型の変位センサを配置してプロトタイプを作成した。中央の剛体にアクリル、弾性体にはシリコンゴム(信越化学工業、KE-1308,CAT-1300-L3)を用いた。静電容量センサの極板には銅、誘電体にはスポンジを使用した(図 6(a))。図 6(a)の回路の出力は、コンデンサの静電容量と外付け抵抗の値によって決定される周波数で発振している。すなわち発振周波数を f とすると

$$f = \frac{k}{RC} = \frac{k}{R\epsilon'S}d \quad (7)$$

(d :極板間距離, ϵ' :誘電体の誘電率, S :極板面積, k :比例定数)で表される。表 1 に弾性体に対して何も負荷をかけてない状態での各コンデンサの発振周波数を示す。

図 6(a)の変位センサに Δd の変位を入力したとき、発振周波数の変化 Δf は

$$\Delta f = \frac{k}{R\epsilon'S} \Delta d \quad (8)$$

で表される。実際には回路自体に寄生容量が発生するため、厳密には線形の関係に無いが、ここではその影響は無視する。そこで式(1),(2)において弾性体の変位で定義した値 P_s, P_n を、図 6(a)の各コンデンサによる発振の周波数 f_1, f_2, f_3, f_4 を用いて以下のように定義しなおす。

$$P_{nf} = (f_1 - f_2) + (f_3 - f_4) \quad (9)$$

$$P_{sf} = (f_1 - f_2) - (f_3 - f_4) \quad (10)$$

P_n と P_{nf} , P_s と P_{sf} は単位は違うものの、本質的に等価な値である。

以上の議論を踏まえ図 6(b)の実験系において、シリコンゴムの上下面への変位を入力し、RC 発振の周波数の変化を計測、各々せん断方向の勾配 P_{sf} と垂直応力の勾配成分 P_{nf} を計算した。

まず弾性体上面から与えた一様な y 方向の変位に対する P_{sf}, P_{nf} をプロットした結果を図 7(a)に示す。せん断応力 P_{sf} と垂直応力の勾配 P_{nf} がほぼゼロであることがわかる。これは垂直応力を面全体に一様にかけているため、垂直応力の勾配やせん断応力は存在していないという事実を正しく示している。

次に弾性体下面から与えた一様なせん断方向の変位に対する P_{sf}, P_{nf} をプロットした結果を図 7(b)に示す。垂直応力の勾配 P_{nf} がほとんど存在せず、せん断応力 P_{sf} が大きな働きをしていることが図 7(b)の出力から読み取れ、弾性体にかけている応力がせん断応力であると判断できる。

最後に y ステージを裏返して、幅 5mm の金属角柱を用いて極板 C2 の直上のみ垂直方向の変位を与え、変位に応じた P_{sf}, P_{nf} をプロットしたものを図 7(c)に示す。せん断応力も出ているが、垂直応力勾配のほうが寄与が大きく支配的であることが見て取れ、垂直応力の勾配がかけられていることがわかる。図 7(c)において、せん断応力を加えていないにもかかわらず P_{sf} が 0 にならなかった要因としては、弾性体上面における垂直応力の空間パターンが、C3,C4 に伝播するまでの間に平均化され、 f_3, f_4 出力に f_1, f_2 ほどの差がつかなかったことで、式(5),(6)における仮定 $a_2 = a_4 > a_3 = a_1$ が成り立たなかったことが考えられる。また、二種類の応力を同時にかけた場合のこ

となども考慮した上で、今後はより現象に即した物理モデルを考えていくことが必要となる。

以上により今回試作したセンサによって、従来判別できなかったせん断応力と垂直応力の勾配を区別することが可能であると考えられる。

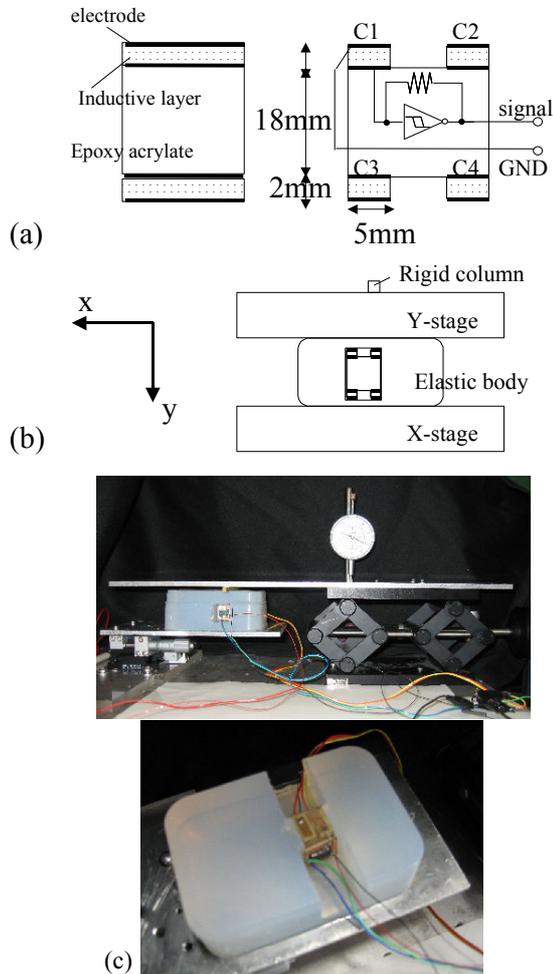


Fig.6 (a) Sensing of the capacitance. We measure the oscillation frequency of each capacitor. (b)(c) Experimental setup.

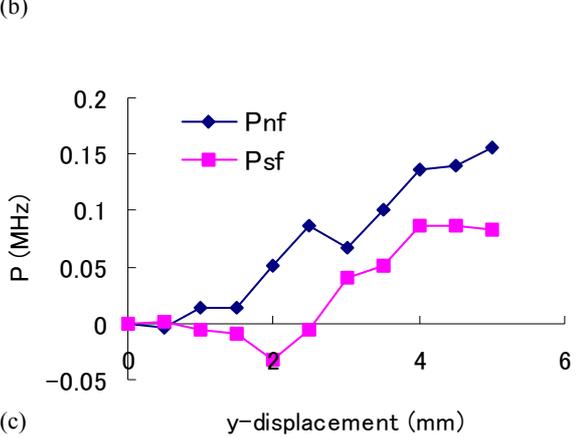
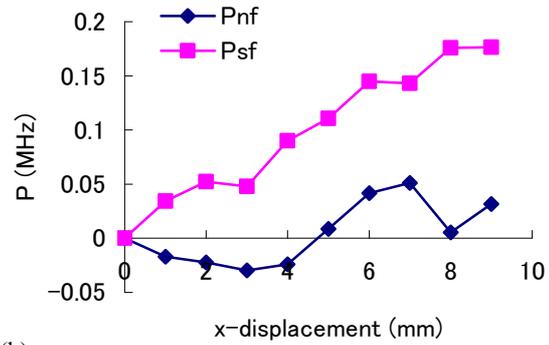
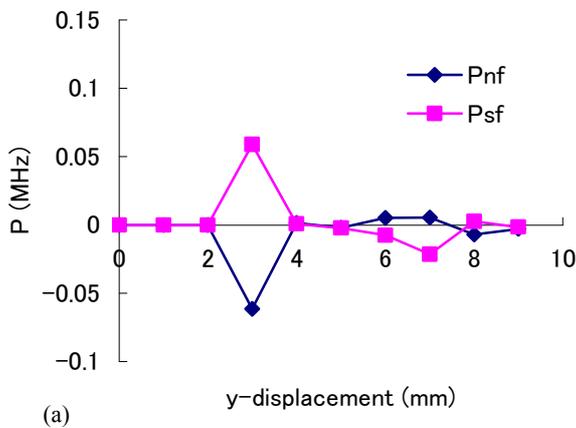


Fig.7 Experimental results. (a): The oscillation frequencies while we moved the stage in y direction. (b): The case of movement in x direction. (c): The case of movement in y direction by rigid column for asymmetric normal stress distribution.

Table 1 The oscillation frequency of each capacitor.

Capacitor	Frequency(MHz)
C1	1.30
C2	1.30
C3	1.37
C4	1.37

5. まとめ

弾性体内に剛体の構造物を埋め込み、その上に変位センサを対称的に配置した応力テンソルセンサを提案した。センサ近傍の面に対してせん断応力と、垂直応力の勾配を加える実験を行い、その二つを区別することが可能であることを示した。

文献

- [1] Mitsuhiro Hakozaki and Hiroyuki Shinoda, "Digital Tactile Sensing Elements Communicating through Conductive Skin Layers," Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp3813-3817, 2002.
- [2] 武縄悟, 中本裕之, 一森和之, 今村信昭, "感圧導電性ゴムを用いた分布型圧力センサによるせん断力検出に関する一考察," 第7回システムインテグレーション部門講演論文集(SI2006), pp478-479, 2006.
- [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.18-6, pp.767-771, 2000.
- [4] Hiroyuki Shinoda, "Sensor Networking based on Two-Dimensional Signal Transmission Technology," Proc. SICE-ICASE International Joint Conference, 2006.