

# 対称構造を利用した表面応力センサ

○清田 翔平, 篠田 裕之 (東京大学)

## Surface force Estimation Using Symmetrical Stress Sensing Cube

○Shohei Kiyota, Hiroyuki Shinoda (The University of Tokyo)

Abstract: We propose a cubic stress tensor sensor that has a rectangular rigid body with symmetrically-located stress sensors. The cubic sensor is embedded in an elastic body, and measures stress tensor applied to the surface of the elastic body. The special feature of the proposed sensor is that it can distinguish between shear stress and non-uniformly distributing normal stress.

### 1. はじめに

弾性体表面に働いている応力を、弾性体内に埋め込んで用いるセンサ素子によって計測することが出来るようになれば、接触情報を必要とする工学分野で幅広い応用が期待できる。例えばロボットの人工皮膚に埋め込んでより豊かな接触情報を得ることや、靴底・床に埋め込んで人や物の滑りを検知することなどが考えられる[1]。

弾性体に埋め込んで使用し、その周囲の応力テンソルを計測するセンサをテンソルセンサと呼ぶこととする。従来のテンソルセンサ研究においては、素子の周囲に均一なせん断応力が生じている場合と不均一な垂直応力が生じている場合とを見分けることができないという問題が存在した[2]。

本発表では、テンソルセンサキューブの対向する面に対称な構造を導入することでこの問題が解決されることを示す。

### 2. 計測原理

前節で述べたように、従来のテンソルセンサにおける問題点は不均一な垂直応力とせん断応力を区別できないことである。図1はこのことを模式的に示している。図1はセンサ素子が基板の上に配置されているため、厳密にはテンソルセンサではないが、直観的にはむしろ理解しやすいためこの構造を例にとりて説明する。まず図1の右の図は、せん断応力の検出原理を示している。せん断応力によって弾性体に浮遊する部品が回転し、せん断応力に比例して素子上2つの検出子の出力差が生じる。この出力差からせん断力が逆算できる。弾性体の表面に与えられる応力が常に空間的に均一であればこの計測法で問題は生じない。しかし図1左側のように不均一な垂直応力分布が発生する可能性がある場合、これら2種類の応力が同一のセンサ出力を与えてしまうという問題が発生する。

本研究では、弾性体内に浮かせた立方体の剛体と、各面に二つずつ配置された垂直応力センサによってこの問題を解決する。簡単のため、以降は二次元モデルで議論を行う(図2)。テンソルセンサ素子周囲の応力状態(センサ素子を取り除いたときの応力状態)としては、センサ素子を十分に小さくすれば、垂直・せん断応力の平均  $\sigma_{z0}$ ,  $\sigma_{x0}$  と垂直応力の一次勾配にのみ注目すればよい。線形弾性の仮定をおけば幾何的な対称性から、各垂直応力センサの出力を用いて、センサ素子周囲の応力を逆計算できる。垂直応力に比例する  $P_{normal}$ , せん断応力に比例する  $P_{shear}$ , そして表面垂直応力勾配  $P_{grad}$  を以下のように計算する。

$$P_{normal} = -a_1 - a_2 - a_3 - a_4 \quad (1)$$

$$P_{grad} = a_1 - a_2 + a_3 - a_4 \quad (2)$$

$$P_{shear} = -a_1 + a_2 + a_3 - a_4 \quad (3)$$

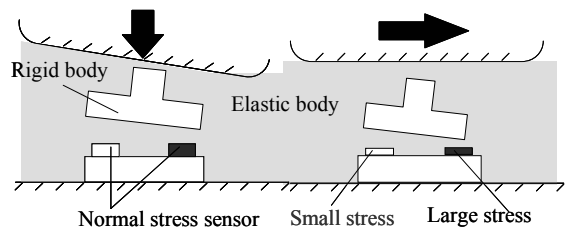


Figure 1. The problem of the previously reported stress tensor sensor.

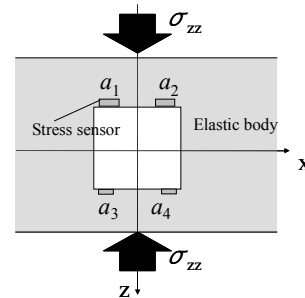


Figure 2. (a) Schematic drawing. The white square indicates the rigid body. The even normal stress applied to the elastic body " $\sigma_{z0}$ " acts on  $a_i$  equally.

### 3. 実験

#### 3.1 プロトタイプ

以上の考察を基にプロトタイプを作成した(図3)。センシング部分はアクリルの立方体と、4隅の静電容量型応力センサとで構成した。静電容量センサの電極には銅板、誘電体にはスポンジを使用した。片方の極板をGNDに、もう片方をシュミットインバータの入力に接続して発振回路を形成した。RC発振の周波数  $f$  は静電容量センサの極板間距離  $d$  によって決定され、次のような関係を持つ。

$$f = \frac{k}{RC} = \frac{k}{R(\epsilon'S + C'd)} \quad (4)$$

ただし  $\epsilon'$  はスポンジの誘電率,  $S$  は極板面積,  $R$  は帰還抵抗,  $C'$  は寄生容量,  $k$  は電源電圧などによって決まる比例定数を表す。この静電容量センサに垂直応力  $a$  が加えられると、スポンジのポアソン比がほぼゼロなので、発振周波数変化  $\Delta f$  と極板間距離の変化  $\Delta d$  の間には以下の関係が成り立つ。

$$a = \frac{E}{d} \Delta d = \frac{Ek}{dR} \frac{(C'd + \epsilon'S)^2}{\epsilon'S} \Delta f \quad (5)$$

ただし、 $E$  はスポンジのヤング率である。これを踏まえ、以降  $P_{normal}$ 、 $P_{shear}$  および  $P_{grad}$  は  $\Delta f$  を用いて計算する。

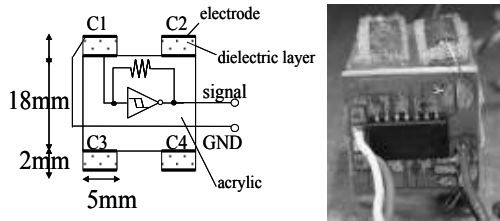


Figure 3. Structure of the prototype

### 3. 2 実験

図4に示すようにキューブをシリコンゴムの中に埋め込み、銅板で上下を挟んで固定した。上の銅板はx軸方向、下の銅板はz軸方向にのみそれぞれ動く。この実験では入力を応力の代わりに銅板の変位で制御した。

まず最初に上側のプレートのみをz方向に動かして、シリコンゴムに垂直方向の応力を加えた。図5(a)に結果を示す。横軸は上側プレートの変位、縦軸は計算された  $P_{normal}$ 、 $P_{shear}$  および  $P_{grad}$  を示す。 $P_{normal}$  はz方向変位とともに増加している。一方  $P_{shear}$  と  $P_{grad}$  に関しては、多少揺れているものの、ほぼゼロである。

次に、シリコンゴムに一樣なせん断応力を与える実験を行った。あらかじめ上側プレートをz方向に3mm動かしてシリコンゴムをひずませておき、その状態で下側のプレートをx方向に動かした。図5(b)にその結果を示す。横軸は下側プレートのx方向変位を表している。 $P_{shear}$  がx方向変位とともに増加しているのが見て取れる。一方  $P_{grad}$  は同様の傾向を示していない。 $P_{normal}$  が減少しているのは、予めシリコンゴムに与えておいた垂直歪みが、せん断大変形によって軽減されたためと考えられる。

最後に不均一な垂直応力をシリコンゴムに加える実験を行った。幅5mmの角柱を上側プレートとシリコンゴムの間に挟みこみ、一つの静電容量センサの真上におき、点状の垂直応力を加えるようにした。実験結果を図5(c)に示す。 $P_{grad}$  はz方向変位とともに増加しているが、 $P_{shear}$  も同様の傾向を示している。考えられる理由としては、加えた応力が点接触だった為に、原理において仮定した応力分布の幾何対称性が満たされていなかった可能性があげられる。

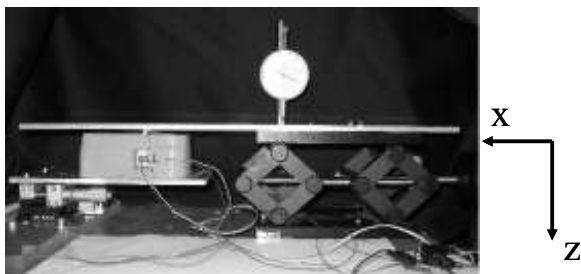
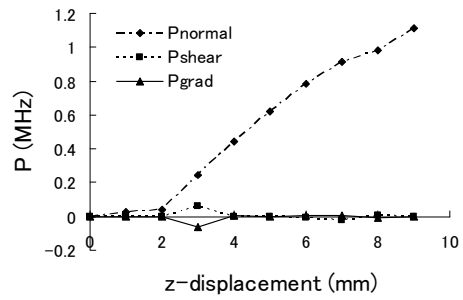
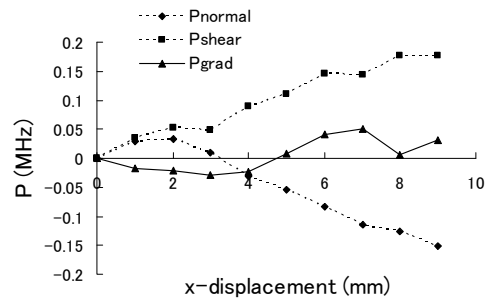


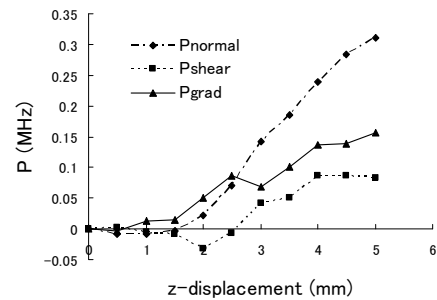
Figure 4. Experimental setup



(a)



(b)



(c)

Figure 5. Sensor outputs. (a): Normal stress was uniformly applied. (b): Shear stress was uniformly applied. (c): Linearly varied distribution of normal stress was applied.

## 4. おわりに

本稿では弾性体表面に加えられた応力を、弾性体内で計測するセンサ素子を提案した。キューブ状の剛体表面に検出子を対称配置することで、せん断応力と不均一な垂直応力を分離して計測することが可能になった。

また、理論の確認の為、プロトタイプを作成し実験を行った。理論と異なる挙動も見られたが、作成したプロトタイプはせん断応力と不均一な垂直応力に対して異なる出力パターンを示した。

現在は1cm角のキューブを作成し基礎データの蓄積に取り組んでいる。また、キューブは信号伝送・給電の為配線が必要としているが、将来的には二次元通信技術[3]を利用することで、そのどちらも無配線で行う予定である。

## 参考文献

- [1] M. H. Lee and H. R. Nicholls, "Tactile sensing for mechatronics—a state of the art survey", *Mechatronics* 9 (1999), pp. 1-31.
- [2] H. Shinoda, K. Matsumoto and S. Ando, "Acoustic Resonant Tensor Cell for Tactile Sensing", *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation Albuquerque, New Mexico - April 1997*, pp. 3087-3092.
- [3] 篠田裕之, "素材表面に形成する高速センサネットワーク," 計測と制御, vol. 46, no. 2, pp. 98-103, 2007.