

ピエゾ抵抗型両持ち梁を用いた3軸触覚センサに関する研究

A TRIAXIAL TACTILE SENSOR USING PAIRS OF PIEZORESISTIVE BEAMS WITH SIDEWALL DOPING

2021016



研究代表者

東京大学 IRT 研究機構

特任研究員

高橋 英俊

[研究の目的]

我々の生活する環境の中でロボットが安全に活動するためには、人間や周囲の物体を傷つけないように、多くのセンサが必要となる。なかでも物体に接触したときの力を計測・制御するため、物体との接触面に加わる圧力及びせん断力を検知する MEMS 触覚センサが重要であると考えられる。

しかし、従来研究における MEMS 触覚センサは、平面構造の上に突起や直立したカンチレバーを必要とし、これらの構造と平面との間の変形を検知して、せん断力としていたため、センサに一定の高さが必要であった。また製作プロセス上個体差が大きく、またセンサ素子が検出方向以外の力にも反応するため実用化が困難であった。

そこで本課題では、側面にピエゾ抵抗層を持つビーム構造をせん断力検出素子として用いることで、製作上の個体差が少なく、また3軸方向の力を独立分離して計測できる MEMS 触覚センサの実現を目指す。また構造が単純であるため、全ての工程を半導体プロセスで製作することができる利点を有する。

[研究の内容, 成果]

本課題で提案するセンサの原理を図1に示す。

せん断力検出素子として、側面にピエゾ抵抗層を形成したビーム2対、圧力検出素子として表面にピエゾ抵抗層を形成したビーム1対を用いる。せん断方向用のビームは側面にピエゾ抵抗層が形成されている。これらのビームが弾性体に埋められており、弾性体表面に加わる3軸方向の力を計測することができる。

せん断力検出素子の1対のビームに対して垂直方向のせん断力を弾性体表面に加えた場合、弾性体の変形に倣って、2本のビームは図2(a)に示すように変形する。このとき対になったビームの対称な側面にピエゾ抵抗層が形成されているため、それぞれの側面が伸長及び圧縮されて、抵抗値がそれぞれの伸縮にあわせ正負逆方向に増減する。その抵抗値変化をブリッジ回路により計測し、せん断力を検出する。また、2本のビームの抵抗値変化を計測しているため、温度変化や他軸との干渉をキャンセルすることが可能である。

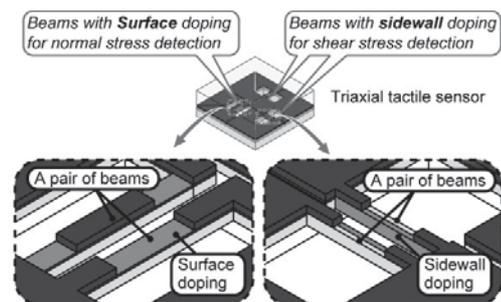


図1 本課題で提案する3軸触覚センサのコンセプト図

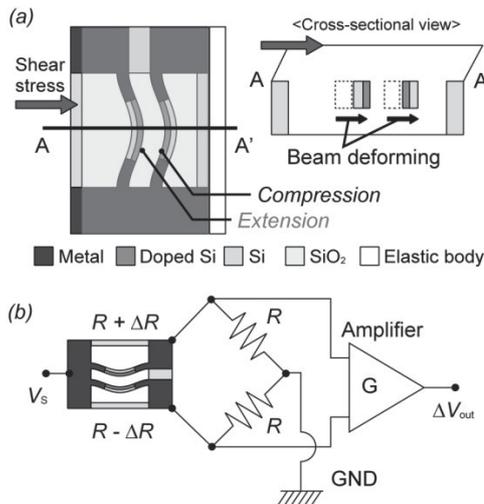


図2 (a) せん断力の検出原理 (b) 計測回路図

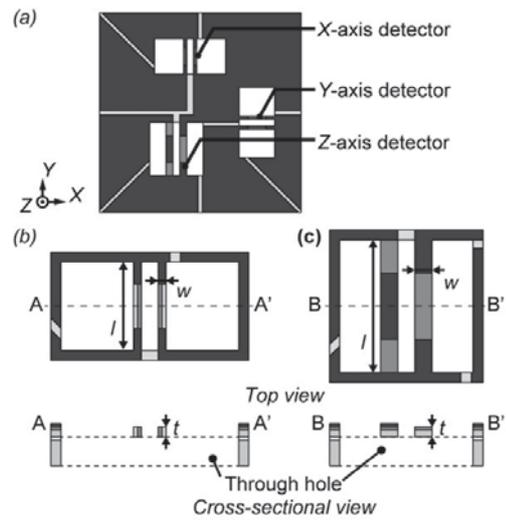


図3 触覚センサの各ビームの設計図

圧力検出素子は2つのビームに対して、圧力を加えた場合、抵抗値が正負逆方向に変化する位置にpiezo抵抗層を形成している。せん断力検出素子同様、温度変化や他軸との干渉をキャンセルできる。

センサチップの設計値を図3及び表1に示す。センサチップにはそれぞれx軸方向せん断用、y軸方向せん断用、z軸方向圧力用のセンサ素子が配置されている。せん断力検出素子のビームは大きさ $180\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ に設計した。また圧力検出素子のビームは大きさ $250\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ に設計した。センサチップの大きさは $2.0\ \text{mm} \times 2.0\ \text{mm} \times 0.3\ \text{mm}$ に設計した。

センサの製作プロセスを図4に示す。基板材料に、PタイプのSOIウェハを用いた。ウェハはアクティブ層厚さ $20\ \mu\text{m}$ 、BOX層厚さ $2\ \mu\text{m}$ 、ハンドリング層厚さ $300\ \mu\text{m}$ のものを利用した。始めに、ICP-RIEによりアクティブ層を $20\ \mu\text{m}$ 掘ることでトレンチを形成する(図4(a))。このトレンチはサイドウォールドーピングの際に不純物を注入するための穴である。トレンチの側壁がせん断力計測用のビームのpiezo抵抗層になる。次にドーパントをスピコートによりデバイス表面に塗布し、窒素雰囲気化で炉に入れ、熱拡散を行う。その後、リフトオフプロセスにより、金薄膜を蒸着し、

表1 各ビームの設計値

	Length l	Width w	Thickness t
Sidewall-doped beam	$180\ \mu\text{m}$	$15\ \mu\text{m}$	$20\ \mu\text{m}$
Surface-doped beam	$250\ \mu\text{m}$	$50\ \mu\text{m}$	$20\ \mu\text{m}$

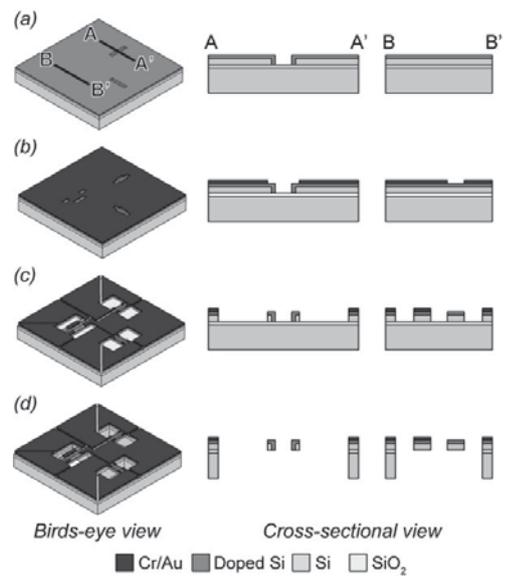


図4 プロセスフロー

配線のパターンニングを施す(図4(b))。次にアクティブ層を再びICP-RIEによりエッチングする。これにより、ビーム構造が形成される。その後、裏面からハンドリング層及びBOX層をエッチングする(図4(d))。

試作したセンサの写真及び各ビームのSEM

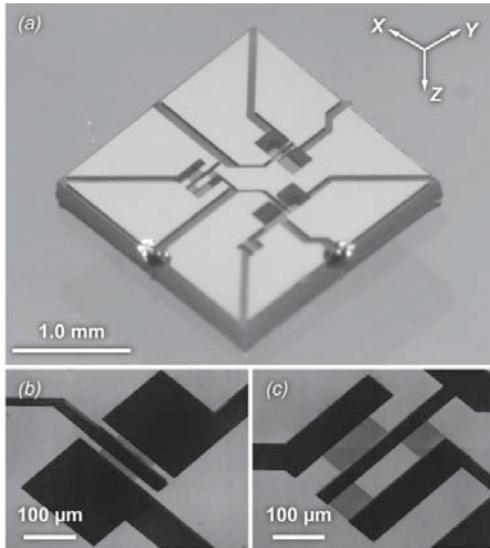


図5 (a) 製作したセンサチップの写真
(b) (c) 各ビームのSEM写真

写真を図5に示す。せん断力検出素子及び圧力検出素子のビームのピエゾ抵抗層の抵抗値はそれぞれ1.0 kΩ及び0.5 kΩ程度であった。センサチップを基板に貼り付け、センサチップの外側に形成されている電極と基板間にワイヤボンディングし、その後弾性体に埋め込むことで触覚センサを作製した(図6(b))。

製作した触覚センサの3軸方向の力に対する応答を評価した。触覚センサの各ビーム対はそれぞれブリッジ回路に接続し、アンプ回路を通じてオシロスコープで応答を計測した。圧力及びせん断力を与える方法として、図6(a) (c)に示すよう、触覚センサ表面をアクリルプレートに押し付け、6軸力センサの応答を計測した。力のレンジとして、0から400 kPaまでの圧力に対する抵抗値変化を、また0から100 kPaまでのせん断力に対する抵抗値変化をそれぞれ計測した。

圧力に対する応答を図7(a)に示す。圧力検出用のビームの抵抗変化率が最も大きく、圧力に対して線形に変化した。 x , y 軸方向せん断力検出用のビームの抵抗変化率は若干変化した、これはせん断力検出用のビームがPDMSの中心からずれた場所に位置しており、そのため、圧力を加えた時にPDMSが外側に広がる際の

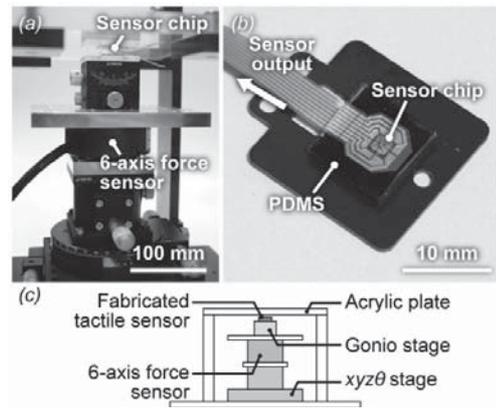


図6

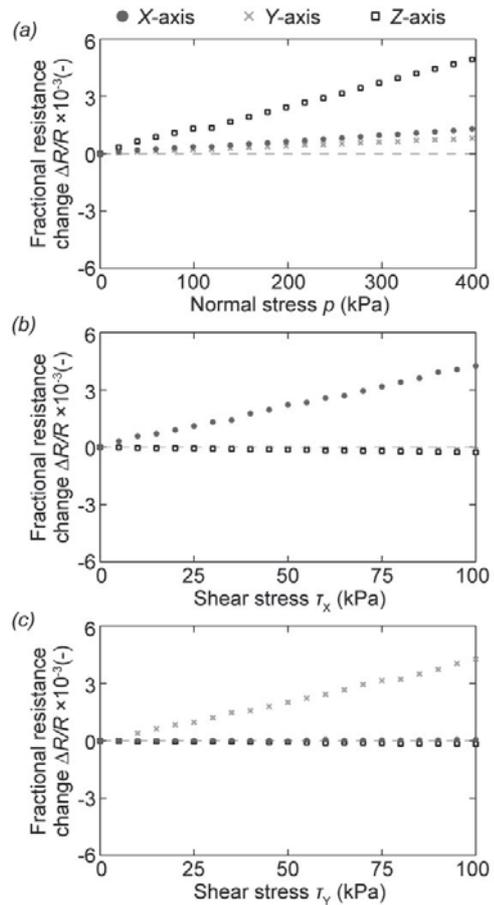


図7 各軸に対する応答

せん断力を検出しているためと考えられる。

x 軸方向せん断力及び y 軸方向せん断力に対する応答をそれぞれ図7(b) (c)に示す。各せん断力に対して、対応するビームの抵抗変化率が最も大きく、せん断力に対して線形に変化した。また圧力検出用のビームはほとんど反応し

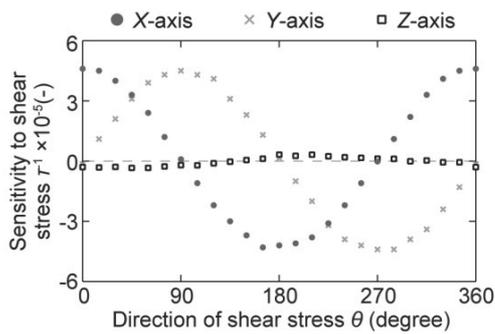


図8 せん断力方向を変化させた時の応答

なかった。

また図8に示すように、せん断力の方向を変化させた場合のそれぞれの応答を計測した。 y 軸方向検出用のビームに対して垂直方向を0 degreesと定義し、せん断力に対する感度を評価した。各角度に対するビームの抵抗変化率を図8に示す。せん断力検出用のビームは角度に応じて、正弦波的に応答が出ていることが分かる。また x 軸方向せん断力検出用ビームと y 軸方向せん断力検出用ビームは応答が90 degrees位相がずれている。一方、全ての角度において、圧力検出用のビームはほとんど反応しなかった。

これらの結果から、製作した触覚センサは3

軸方向の力を各軸に対応したビームでそれぞれ独立に計測できることを示した。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究では、MEMS 3軸触覚センサを試作し、その有用性を示した。今後は目的でも述べたように、実際のロボットなどに取り付け、実際の環境での使用を見据えて、研究を推進する予定である。

[成果の発表, 論文等]

高橋英俊, 中井亮仁, 松本 潔, 下山 勲, “サイドウォールドーピングを用いた3軸触覚センサ,” 第29回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, P.4-3, 北九州国際会議場および西日本総合展示場, 福岡, Oct. 22-24, 2012.

Hidetoshi Takahashi, Akihito Nakai, Nguyen Thanh-Vinh, Kiyoshi Matsumoto and Isao Shimoyama, “A triaxial tactile sensor without crosstalk using pairs of piezoresistive beams with sidewall doping,” *Sens. Actuators A: Phys.* (2013), Vol. 199, pp. 43-48.