

## 第11回

## 触覚センサ

東京大学 下山 勲<sup>\*1</sup> 中井亮仁<sup>\*2</sup> 岡谷泰佑<sup>\*3</sup>

## 1. はじめに

本稿で、触覚センサとは、皮膚を通して働く力を計測するセンサのことをいう。生き物は皮膚に歪センサを持っていて、皮膚に働いた力によって生じる歪を知って、触った感覚や滑る感覚などを得ている。

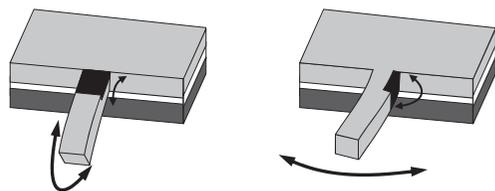
触覚のおかげで、手でものを操れるし、滑りやすい風呂の床でも転倒しない。また、スポーツなどの運動では、地面などから受ける力と重力のみが外力として身体に働き重心運動を決めるので、地面などの界面での触覚が巧みな運動に貢献していると考えられる。

われわれの触覚センサは、有機材料の皮膚にピエゾ抵抗型歪ゲージを埋めている。有機材料皮膚に力が加わると、有機材料が変形し、その中の歪ゲージも変形する。このとき、歪ゲージを形成している梁のばね定数が有機材料のばね定数と同じ程度あるいはそれより小さいときに、梁は有機材料にならって有機材料とともに変形する。寸法が小さいので、スポーツ靴の靴底やロボットの手や足のような限られた面にも埋め込める。また、触覚センサの時間分解能は有機材料皮膚の固有振動の周期程度で、我々の場合には、数kHz程度になるので、撃力のような瞬間的な力の計測もできる。

## 2. ピエゾ抵抗型歪ゲージ

歪ゲージとは、歪によって抵抗値が変わるものである。片持ち梁や両持ち梁に歪ゲージを形成し、梁に力を加えると、力に対応して歪が生じ抵抗値が変わるので、歪ゲージの抵抗値から力を逆算できる。歪が小さいときには歪ゲージの抵抗値と力には線形

関係があるので、抵抗値に定数を単純に掛けることによって力を計算することができる。また、図1に示すように、梁の上面とともに側面にも歪ゲージを形成できるので、力の大きさと方向をともに計測できる。直交する座標軸xyz方向の力を計測するため、3対の両持ち梁の上面および側面に歪ゲージを形成したチップを図2に示す。



(a) 上面を不純物半導体とした縦方向の歪計測 (b) 側面を不純物半導体とした横方向の歪計測

図1 不純物半導体（黒い部分）を形成したひずみ計測片持ち梁

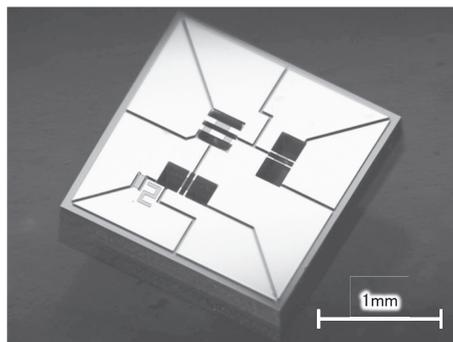


図2 シリコン基板面に形成された両持ち梁の歪センサ

ベクトルである力が  $\vec{F} = (F_1, F_2, \dots)$  として加えられるとき、ある点  $i$  での歪  $\epsilon_i$  は、力の成分  $F_1, F_2, \dots$  の線形和で表される。すなわち、歪を並べたベクトルを  $\vec{\epsilon}$ 、線形和の係数からなる行列を  $P$  として、以

\*1 しもやま いさお 大学院 情報理工学系研究科  
知能機械情報学専攻 教授  
\*2 なかい あきひと 大学院 情報理工学系研究科  
知能機械情報学専攻 特任助教

\*3 おかたに たいゆう 大学院 情報理工学系研究科  
知能機械情報学専攻

下のように表される。

$$\vec{\epsilon} = P\vec{F}$$

$P$ は対角成分以外にも、0とならない要素をもち、いわゆる干渉する系であるが、センサの校正時に $\vec{F}$ と $\vec{\epsilon}$ のデータを多数とり最小2乗法で $P$ を精度よく求めたり、 $P$ ができるだけ直行列に近づくよう梁の位置や構造と歪ゲージを形成する場所を決めると、歪に逆行列をかけることによって、力を精度よく算出できる。

$$\vec{F} = P^{-1} \vec{\epsilon}$$

ピエゾ抵抗型歪ゲージとは、たとえばシリコンにヒ素(As)をドーピングして得られるn型不純物半導体が歪むとき生じる抵抗変化を利用して歪みを計測するものである。抵抗率を $\rho$ 、長さを $L$ 、断面積を $A$ とすると抵抗 $R$ は(1)式で表される。

$$R = \rho L / A \quad (1)$$

この抵抗 $R$ に歪を与えたときの抵抗変化 $\Delta R$ は(2)式で表され、 $\Delta R/R$ を抵抗変化率と呼ぶ。

$$\Delta R/R = \Delta\rho/\rho + \Delta L/L - \Delta A/A \quad (2)$$

この右辺が $\epsilon$ について線形な範囲では、右辺が $K\epsilon$ と書け、感度 $K$ をゲージファクタと呼ぶ。

$$\Delta R/R = K\epsilon$$

金属歪ゲージを引っ張ると、抵抗の長さが長くなり、断面積が小さくなるので抵抗が増加するが、この効果に加えて、不純物半導体では歪に対して抵抗率 $\rho$ が大きく変化するので、金属歪ゲージに比べて歪に対する大きな抵抗変化、つまり大きなゲージファクタが得られる。金属の場合 $K$ はおおよそ2であるのに対して、半導体歪ゲージでは $K$ は100程度の大きな値となる。

半導体歪ゲージの抵抗値は、図3のブリッジ回路を使って電圧値として読み取ることができる。半導体歪ゲージを含む4つの抵抗 $R$ を図のようにつなぎ、歪ゲージを歪ませて抵抗が $R + \Delta R$ になると、出力電圧の変化 $\Delta V_{out}$ は以下になる。

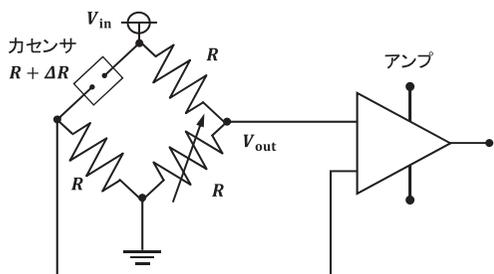


図3 抵抗変化を読むためのブリッジ回路

$$\Delta V_{out}/V_{in} = \Delta R/(4R + 2\Delta R) \quad (3)$$

われわれの触覚センサでは、ブリッジの出力電圧 $V_{out}$ をアンプで200~1,000倍に増幅している。このとき、アンプの入力端をショートすると、アンプの出力端で、標準偏差 $\sigma = 0.5(\text{mV})$ のノイズが観測される。アンプの倍率 $a$ が200倍、歪ゲージのゲージファクタが $K = 100$ 、ブリッジの印加電圧 $V_{in} = 1(\text{V})$ のときに、歪信号がこのノイズに埋もれない条件は、以下となる。

$$a(1/4 K\epsilon) V_{in} = \sigma$$

$$200 \times (1/4 \times 100\epsilon) \times 1 = 0.5 \times 10^{-3}$$

$$\epsilon = 10^{-7}$$

つまり、有機材料皮膚に生じる $10^{-7}$ という小さな歪が検出できる。通常、触覚センサではこのような小さな歪を計測している。

片持ち梁や両持ち梁を作り、その梁表面にピエゾ抵抗層を形成するプロセスは、シリコンの微細加工である。これによって作られたデバイスをMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)と呼んでいる。

### 3. 3軸触覚センサを用いた歩行・運動計測

運動靴のインソールの複数箇所に小型・薄型の3軸触覚センサを埋め込むことで、歩行・運動時にひとの足裏にかかる3軸力分布を計測することができる。

3軸触覚センサは、図2に示した2mm角のセンサチップを、図4に示した直径10mm、厚さ1.3mmのシリコンゴムの中に埋め込んだ構造となっている。センサ表面にかかる3軸力を抵抗値の変化として検出し、較正行列を掛けて他軸干渉と温度ドリフトを補償することで、垂直力は40N(応力換算で800kPa相当)、せん断力は8Nまで計測することが可能である。この3軸触覚センサを、運動靴のイン

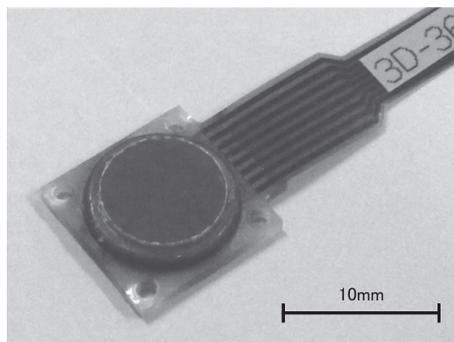


図4 3軸触覚センサ

ソールの拇趾球, 拇趾, 第3趾付け根, 小趾球, 第5中足骨底, 踵中央左, 踵中央右, 踵後端に相当する8箇所を図5のように配置した。

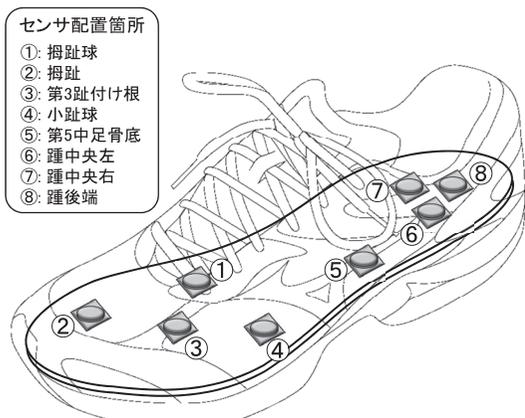


図5 インソール上のセンサの配置箇所

実験の第一段階として、図6に示すように屋内で水平に設置されたフォースプレート上を歩き、各センサの出力とフォースプレートの出力の比較をおこなった。フォースプレートは地面反力、すなわち靴裏全体にかかる合力として3軸力ならびに3モーメントを計測することができ、歩行や運動の計測・解析でよく用いられる計測器である。図7に左足接地時の (a)垂直方向, (b)前後方向, (c)左右方向の力と応力のグラフを示す。いずれのグラフも横軸が時間軸, 右縦軸がフォースプレートの力出力, 左縦軸が3軸触覚センサの出力を応力換算したものとなっている。

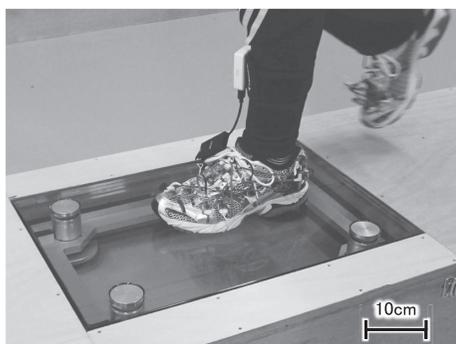


図6 フォースプレート上を歩行する実験の様子

水平歩行時の垂直方向のグラフは二峰性と呼ばれる特徴的な波形となっており、一つ目の峰が踵接地時のピーク, 二つ目の峰が前足部で蹴り出す際のピークとなる。各センサの出力に着目すると、踵の3

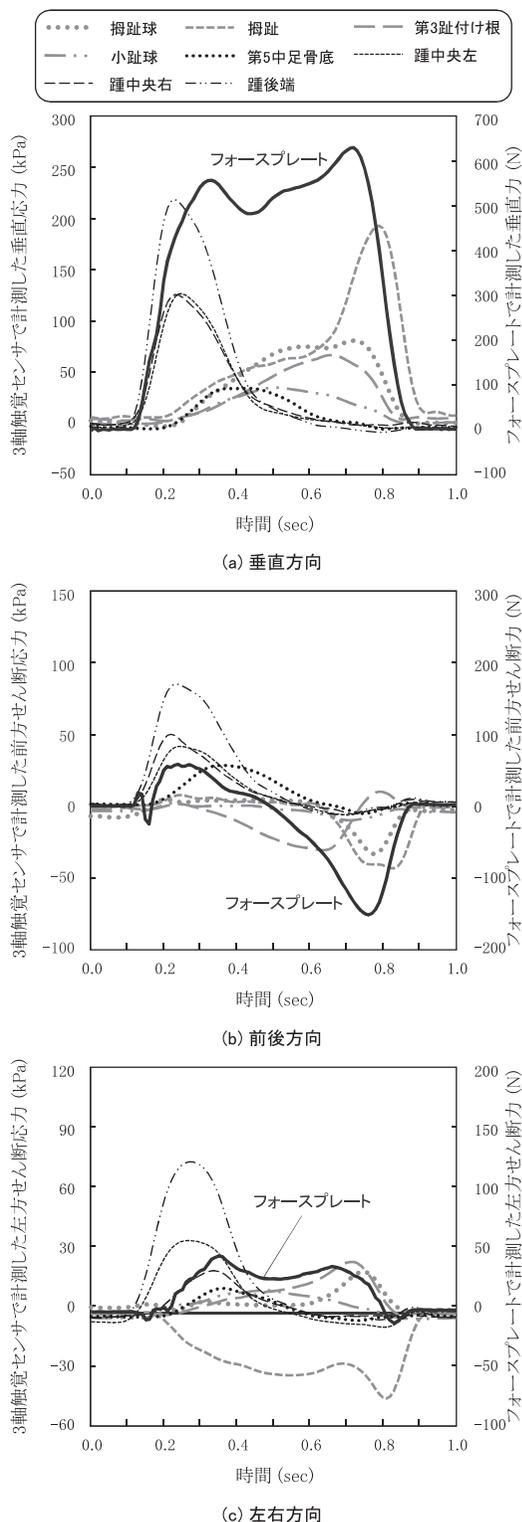


図7 フォースプレートと3軸触覚センサの出力比較

箇所が一つ目の峰の形成に大きく寄与していること、踵接地後は中足部から前足部へと順番にピークを迎えること、二つ目の峰は拇趾の影響が大きいことなどが見てとれる。

前後方向のグラフについては、踵接地時に前向き of セン断力、すなわちブレーキがかかり、前足部離地時に蹴り出しによる後ろ向き of セン断力が観察される。各センサの出力に着目すると、踵の3箇所と第5中足骨底が前向き of セン断応力を、拇趾球周囲の3箇所では後ろ向き of セン断応力がそれぞれ出力されている。

左右方向のグラフについては、踵接地からつま先離地直前までのほぼ全ての時間帯で左向き（外側向き） of セン断力が観察される。各センサの出力を見ても、拇趾以外の全ての箇所と同じ向き of セン断応力が出ていることがわかる。ひとが歩行する際には、重心位置よりも外側にそれぞれの足を接地することから、外側向き of セン断力 / 応力が観察されることは合理的である。

フォースプレートの出力と比較した結果、試作した計測システムで足裏にかかる3軸力分布を計測できることが確認できたため、この計測システムを用いて様々な歩行・運動の計測を行なった。具体的には、トレッドミルを用いて歩行速度や路面傾斜角を変化させ、足裏各部にかかる3軸力がこれらのパラメータによってどのように変化していくかを確認した。また、階段昇降やジョギング、ダッシュ、ジャンプといった様々な運動の計測も行った。現在は屋外フィールドで歩行実験をおこない、路面環境が歩行に対してどのような影響を及ぼすかについてデータを取得している段階である。

#### 4. 滑りやすさの計測

本稿の触覚センサを使うと、滑りやすさを計測できる。皮膚のように変形する弾性体を対象物に押し付けると、図8のように最大静止摩擦力を超えた一部の弾性体が局所的に滑る。押し付け力に対して、静止摩擦係数が小さく、対象物に対して局所滑りする面積が大きくなればなるほど、せん断方向の歪が大きくなる。したがって、対象物の静止摩擦係数が小さくなれば、押し付け力に対するせん断歪が増加する。

センサの中央部の歪ゲージは面に垂直方向の歪、つまり、押し付け力を計測できるように梁上面にピエゾ抵抗層を形成し、その両端の歪ゲージは面に平行

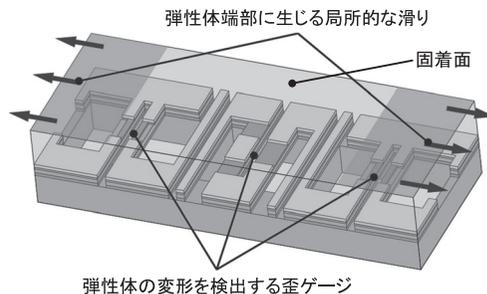
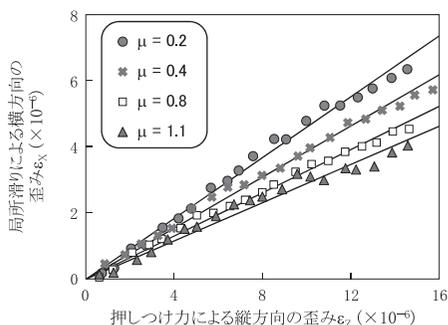


図8 局所滑りを利用した滑りやすさのセンサ

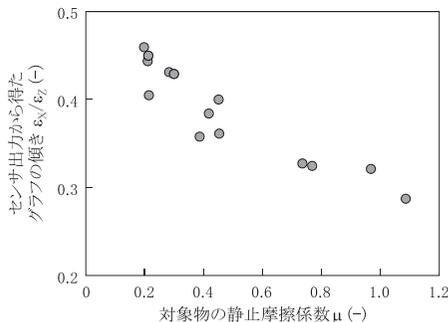
な方向のせん断歪、つまり、局所滑りに対応したせん断歪を計測できるように、梁の側面にピエゾ抵抗層を形成している。

図9(a)は、押し付け力により生じる、面に垂直方向の歪 $\epsilon_z$ 、局所滑りによるせん断歪 $\epsilon_x$ を、静止摩擦係数をパラメータとしてプロットしたものである。また、図9(b)は、静止摩擦係数に対する図9(a)のグラフの傾き $\epsilon_x/\epsilon_z$ をプロットしたものである。この結果から、このセンサを対象面に次第に押し付けたとき $\epsilon_x/\epsilon_z$ を計算することで、対象面の最大静止摩擦力を計算することができる。

さらに、このセンサの寸法が小さく、アレイ状につくることができるので、静止摩擦係数が一樣でな



(a) センサを押し付けたときの垂直方向の歪とせん断方向の歪



(b) 静止摩擦係数と歪の比との関係

図9 触覚センサによる最大静止摩擦力の計測

い面や、凹凸のあるような面に対しても局所滑りを計測可能だと考えている。

## 5. ま と め

シリコンに不純物をドーピングしてできるピエゾ抵抗型歪ゲージは、歪に対して抵抗が大きく変化し、また、微細加工を活用して小さな寸法で作ることができるので、これを有機材料皮膚に埋め込んで感度と時間分解能の高い触覚センサをつくることができる。界面に働くカベクトルの分布がとれるので、触覚をもつロボットの皮膚や、界面に働く外力の計測を通してスポーツの解析などに貢献するものと考えている。

## 参考文献

- 1) Hidetoshi Takahashi, Nguyen Minh Dung, Kiyoshi Matsumoto and Isao Shimoyama: Differential pressure sensor using a piezoresistive cantilever, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 22 (5), article no. 055015 (2012)
- 2) 大宮知起: MEMS 3軸力センサを用いた細胞の接着力計測, 東京大学情報理工学系研究科修士論文 (2016)
- 3) 中井亮仁, 下山 勲: MEMS 3軸力センサを用いた歩行・走行時の足裏応力分布計測, *スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス* 2015
- 4) Taiyu Okatani, Hidetoshi Takahashi, Kentaro Noda, Tomoyuki Takahata, Kiyoshi Matsumoto and Isao Shimoyama, "A tactile sensor using piezoresistive beams for detection of the coefficient of static friction," *Sensors*, vol. 16, issue 5, article no. 718, 2016.