

# 磁性エラストマを用いた柔軟な3軸力覚センサ

○川節拓実 堀井隆斗 石原尚 浅田稔(大阪大学大学院 工学研究科)

## 1. はじめに

ロボットの手先や全身に触覚を与えるため数多くの触覚センサ(総説として[1]などを参照)が開発されてきたが、耐久性、感度、メンテナンス性、製造の容易さなどの点で多くの課題が残されている。これらの課題を解決するため、筆者らは磁性エラストマ(Magnetorheological elastomer, 以下MRE)を用いた磁気式柔軟触覚センサを提案してきた(磁石と磁気センサを用いたタイプ:[2, 3], コイルを用いたタイプ:[4])。後者のセンサ[4]は、透磁率の高い鉄粉を含有するMREを非磁性のエラストマに積層した二層構造の接触層直下にコイルを配置した構造を持つ。この構造においてMREはコイルに対する磁気コアとして働くため、MREの接近に応じてコイルのインダクタンスが変化する。従って、このインダクタンスの変化を取得することにより、MREに加えられた力を測定することができる。

先行研究[4]において、筆者らは提案センサが垂直力、すなわち押込方向の力を測定可能なことを示した。提案センサでは接触層のMREを空間的に一様に分布させることで、接触層交換時の正確な位置決めを不要とする工夫がなされている。一方で、この構造は垂直力の測定を可能にするものの、剪断力すなわち接触層を横ずれさせる方向の力を測定することが困難であった。しかしながら、触覚センサを複雑なタスク(例えば物体の把持やすべり検知など)に利用するためには、垂直力に加えて剪断力、すなわち3軸力を取得することが重要である。

本研究では、空間的に局在化させたMREと4つの平面コイルを用いて、それらのインダクタンス変化から3軸力を推定可能なセンサを提案する。提案するセンサを実際に作成し、3軸方向の力を独立に印加する実験を行った。実験の結果、印加した力の方向に対して4つのコイルが異なった傾向で応答を示し、3軸力の弁別が可能であることを確認した。

## 2. 関連研究

本節では、これまでに提案されてきた柔軟な3軸力覚センサの特徴と解決すべき課題を示し、提案センサの位置づけを述べる。

接触層となる柔軟物体中に、ひずみゲージやピエゾ抵抗素子などのセンサ素子を内包させ、それらの変位から3軸力を推定するセンサが提案されている[5]。接触層の3次元的な変位を直接測定する手法であり、MEMS技術と組み合わせて高密度、小型化を実現可能である。一方で、センサ素子自体を変形させる必要があるため非接触で変位を測定する手法に比べて構造的に耐久性が低いといえる。また、センサ素子に繋がる配線が柔軟層に内包される場合、大変形に対する配線の断線も問題となり得る。耐久性を高めるためには接触層にセンサ素子やその配線を含ませない構造にすることが

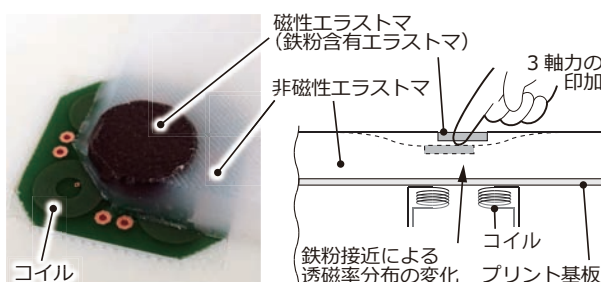


図1 提案センサの外観と断面構造の模式図。センサは、複数のコイルが配線で実装された基板上に円盤形状の磁性エラストマを非磁性エラストマに埋め込んだ接触層を設置した構造である。左側の写真ではエラストマを一部切除して基板面を露出させている。

一つの解決策である。

接触層に磁石を埋め込み、基板に複数の磁気センサを配置した3軸力センサが提案されてきた[6, 7]。与えられた3軸力が接触層内の磁石を変位させ、それによる磁場の変化を磁気センサで捉えることで3軸力の測定を可能としている。この方式では、磁石の変位を非接触で取得でき、センサ素子には接触力がかからない構造のために耐久性を高くできる。しかしながら、柔軟なエラストマ内に磁石を埋め込む必要があるため、大変形を与えた際にエラストマと変形特性が異なる磁石付近からクラックを生じさせうる。また、接触層中に固形物が埋め込まれていると、接触層を触った際に異物感(局所的な硬さの違い)が生じうる。そのため接触層には固形物は埋め込まず、柔軟なエラストマのみで構成されているほうが望ましい。

同様に、接触層にマーカを埋め込みその変位をイメージセンサで捉えることで3軸力を推定するセンサも提案されている[8, 9]。例えば指先の全域など、マーカを内包させた柔軟物をカメラで撮像することにより、広い領域に加わった3軸力を一度に測定することができる。課題としては、マーカの撮像に光学系を構築する必要があるため構造が複雑になりやすく、また小型化も困難であることが挙げられる。

これらのセンサに対し、本研究で提案する3軸力覚センサは次の特徴を有する。

1. センサ素子が接触層に含有されておらず、接触層が大変形した際の素子破損や配線断線の問題を回避し耐久性に優れる。
2. MREを用いることで接触層に固形物を含有させる必要がなく、接触層自体の耐久性を高めることができる。また、固形物がないため接触層を触った際に異物感(局所的な硬さの違い)が無い。
3. 平面コイルのみによって3軸力を推定できるため、構造が単純で小型である。

### 3. 提案する3軸力覚センサ

#### 3.1 動作原理

図1に提案する3軸力覚センサの基本構造を示す。このセンサは、複数の平面コイルを実装した基板上に円盤形状のMREを非磁性エラストマに埋め込んだ接触層から構成される。MREは、シリコンゴムなどの柔軟素材に鉄粉などの高い透磁率を持つ磁性粒子を含有させた磁気応答性材料である。

提案センサに接触力を加えると、その方向に従って円盤形状のMREが変位する。その結果、各平面コイルとMREの距離および上面から見た際のコイルとMREが重なり合う面積が変化する。コイルから見たMREは空気に比べて高い透磁率を有しているためインダクタンスを増加させる磁気コアとして機能し、コイルとMREの位置関係により各コイルのインダクタンスが増減する。従って、MREの変位を3次元的に捉えられるようコイルを複数実装しそれらコイルのインダクタンスの変化を測定することで、MREの3次元的な変位およびセンサに与えられた3軸力を推定できる。

図2に示すように4つのコイルとMREを配置した場合には、各コイルのインダクタンスは次のように変化すると予想される。(1)z軸方向の押込力 $F_z$ を与えた時、4つ全てのコイルに対してMREが近づくため全てのコイルのインダクタンスが増加する。(2)+x軸方向へ剪断力 $F_x$ を与えた時、コイル1, 4に対してMREが近づき、コイル2, 3からはMREが離れるようなMREの変位が生じる。従って、コイル1, 4のインダクタンスは増加し、コイル2, 3のインダクタンスが減少する。(3)+y軸方向へ剪断力 $F_y$ を与えた時、コイル1, 2に対してMREが近づき、コイル3, 4からはMREが離れるようなMREの変位が生じる。従って、コイル1, 2のインダクタンスは増加し、コイル3, 4のインダクタンスが減少する。以上より、4つのコイルのインダクタンスの変化を測定することにより、センサに与えられた3軸力が推定できると考えられる。

#### 3.2 製作したセンサ

前節の動作原理に従って製作した3軸力覚センサを図2に示す。図2(a)に示すように、平面コイルを4つ実装したプリント基板上に、円盤形状のMREを埋め込んだ非磁性エラストマを置いた構造とした。本研究では、測定コイルとして図2(b)に示す設計パラメータに従った直径10mmの二層平面コイルを用いた。このコイルを、図2(c)に示すように15mm間隔で4つ配置した基板を製作した。

この4つのコイルを実装した基板上に、接触層となるエラストマを置いた。非磁性エラストマは、白金を触媒とする付加重合により硬化するシリコン (Smooth-on社製 Ecoflex30) を用いて製作し、サイズは150 × 150 × 10mmとした。直径15mm、厚み3mmの円盤形状MREを、その中心が原点O (4つのコイル中心から等距離となる位置) と一致するように非磁性エラストマに埋め込んだ (図2(c) および (d))。MREも同様のシリコン素材を用いて製作し、粒子径300 $\mu$ mの鉄粉を体積比20%で含有させた。

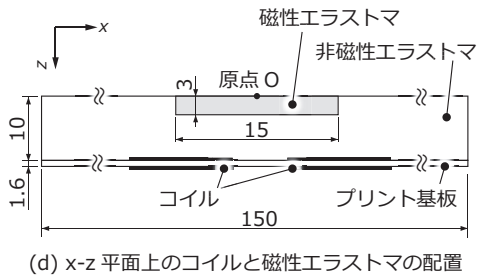
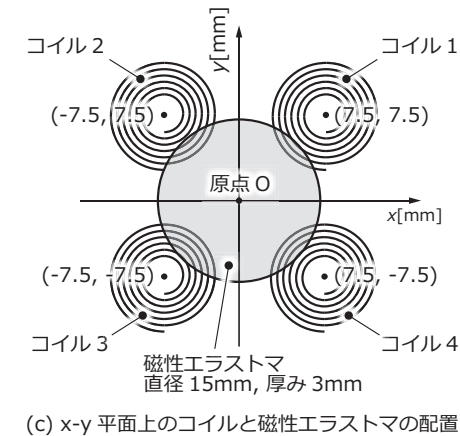
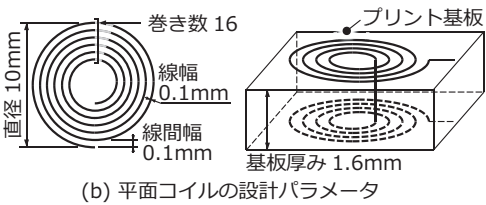
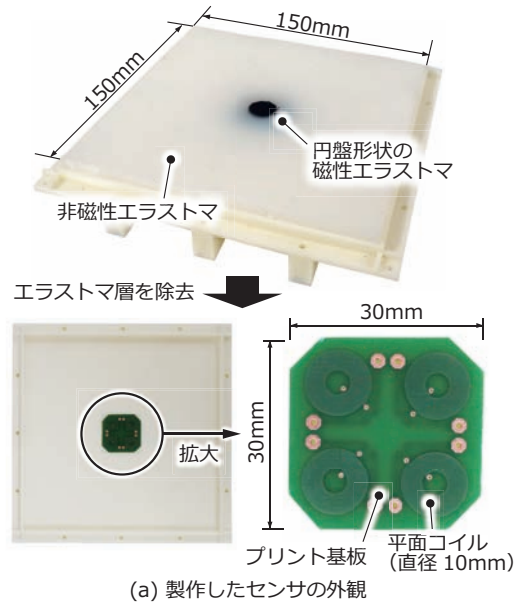


図2 製作したセンサ。(a) センサの外観。(b) 平面コイルの設計パラメータ。コイルはプリント基板両面に描かれた二層の平面コイルである。(c)x-y平面上的平面コイルと磁性エラストマの配置。原点Oが位置 $(x, y) = (0, 0)$ に対応する。4つのコイルを15mm間隔で実装し、4つのコイル中心から等距離となる位置に円盤形状の磁性エラストマを埋め込んだ。(d)x-z平面上的平面コイルと磁性エラストマの配置。原点Oが位置 $(x, z) = (0, 0)$ に対応する。

## 4. 実験

### 4.1 実験環境

提案センサを3軸ステージ (IAI 製 TTA-C3-WA-30-25-10) 上に取り付け、任意の3軸力を印加可能なセットアップを構築した (図3)。3軸ステージにはフォーストルクセンサ (BL オートテック社製 Mini 2/10-A, 以下 F/T センサ) を取り付け、F/T センサの先端には円柱形状で直径 15mm のプラスチック製圧子を取り付けた。F/T センサの出力は、16bit アナログ/デジタル変換器 (CONTEC 社製 AI-1664LAX-USB) を介してパソコンで取得した。4つの平面コイルのインダクタンスは、28bit インダクタンス/デジタル変換 IC (テキサスインスツルメンツ社製 LDC1614) を用いて測定した。

今回製作した4つの平面コイルの初期インダクタンス (すなわち無負荷時のインダクタンス)  $L_i [\mu\text{H}]$  はそれぞれ、 $L_1 = 6.11544$ ,  $L_2 = 6.03938$ ,  $L_3 = 6.4970$  および  $L_4 = 5.99555$  であった。以降の実験では、この初期インダクタンス  $L_i$  から変化後のインダクタンス  $L'_i$  の差分を取った変化量  $L'_i - L_i$  を測定値として表示している。

### 4.2 押込力に対するインダクタンスの変化

はじめに、提案センサに  $z$  軸方向の垂直力  $F_Z$  を与えた際のインダクタンスの変化を調べた。圧子の中心が円盤型の MRE の中心と一致する位置において、 $z=0\text{mm}$  (MRE 表面) から  $z=4\text{mm}$  の深さまで 0.5mm 毎に MRE を押し込み、その際の垂直力とインダクタンスの変化を測定した。図4に与えた垂直力  $F_Z$  と、インダクタンスの変化を示す。垂直力が増加するに従って、全てのコイルのインダクタンスがほぼ等しく単調増加していることがわかる。

### 4.3 剪断力に対するインダクタンスの変化

次に、提案センサに  $x$  軸、 $y$  軸方向の剪断力  $F_X$ ,  $F_Y$  を与えた際のインダクタンスの変化を調べた。圧子の中心が円盤型の MRE の中心と一致する位置において、圧子が表面で滑らないよう  $z=1\text{mm}$  の深さに MRE を押し込んだ状態で、圧子を  $x$  軸、 $y$  軸それぞれの方向に移動させた。

圧子を  $x$  軸に沿って  $\pm 3\text{mm}$  の範囲で 0.5mm 毎に移動させた時の剪断力  $F_X$  とインダクタンスの変化を図5に示す。剪断力  $F_X$  に対して、コイル1, 4のインダクタンスは単調増加しており、一方でコイル2, 3のインダクタンスは単調減少していることがわかる。コイル1, 4およびコイル2, 3の間でインダクタンス値の変化量はばらついていた。

同様に、圧子を  $y$  軸に沿って  $\pm 3\text{mm}$  の範囲で 0.5mm 毎に移動させた時の剪断力  $F_Y$  とインダクタンスの変化を図6に示す。剪断力  $F_Y$  に対して、コイル1, 2のインダクタンスは単調増加を示し、一方でコイル3, 4のインダクタンスは単調減少している。この結果では、図5と比較してコイル1, 2およびコイル3, 4の間でインダクタンス値のばらつきが小さい。

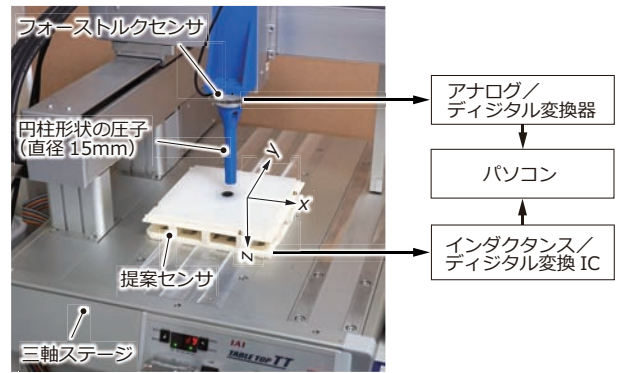


図3 提案センサに3軸力を与えるための実験環境。提案センサを3軸ステージ上に取り付け、円柱形状の圧子で3軸力を与えた。与えた3軸力はフォーストルクセンサで測定した。コイルのインダクタンスは、インダクタンス/デジタル変換 IC で取得した。

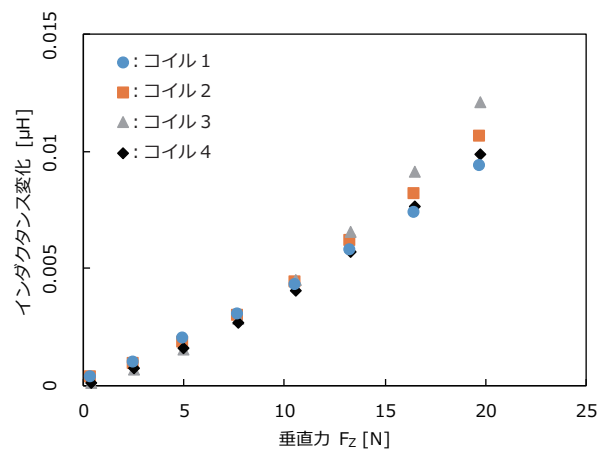


図4  $z$  軸方向への垂直力  $F_Z$  とインダクタンス変化の関係。4つ全てのコイルのインダクタンスが垂直力に対して単調増加している。

## 5. 議論

実験結果より、加えたそれぞれの3軸力に対して4つのコイルのインダクタンスは、3.1節で予想した通り MRE の近接に応じて単調に増減することがわかった。また、各コイルのインダクタンス値は 1) MRE とコイルとの距離、2)  $Z$  軸方向から見た際のコイルと MRE の重なり度合い、の二つの要因によって変化することを確認した。従って、これら4つのコイルのインダクタンスを測定することによって、それらの変化量や比からセンサに加えられた3軸力の推定が可能になると考えられる。

実験結果より、コイル1~4のインダクタンスの変化量は与えた接触力に対して必ずしも同じ変化量を示していないことがわかる。特に、この違いは図5に示す剪断力  $F_X$  を与えた実験において顕著に表れた。これは主に、1) コイル自体の個体差、2) MRE 位置の4つのコイルの中心位置からのわずかなずれ、3) MRE 自体が柔軟素材であるために生じた形状変化、が原因として挙げられる。実際に3軸力を推定する際にはこれら

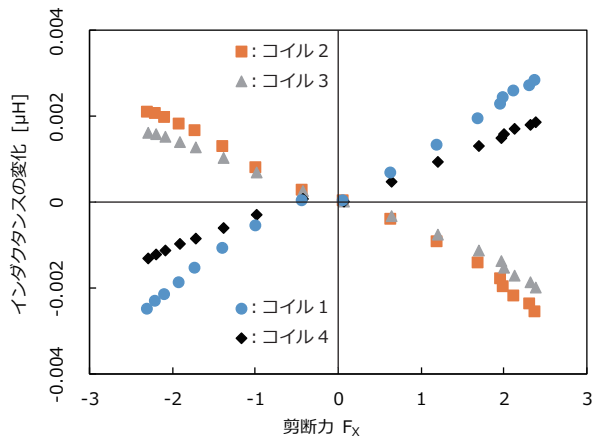


図5 x 軸方向への剪断力  $F_x$  とインダクタンス変化の関係。コイル1, 4のインダクタンスが剪断力に対して単調増加し, 逆にコイル2, 3は単調減少している。

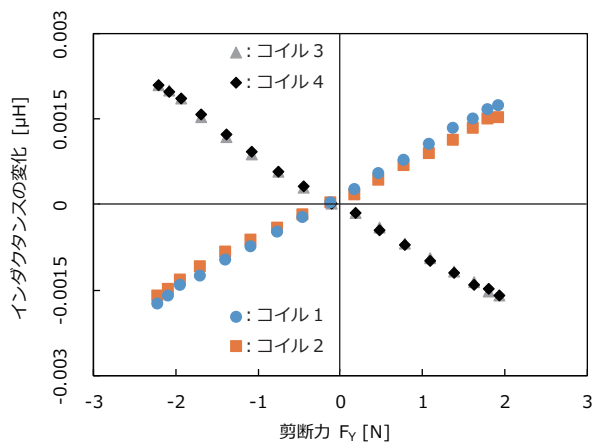


図6 y 軸方向への剪断力  $F_y$  とインダクタンス変化の関係。コイル1, 2のインダクタンスが剪断力に対して単調増加し, 逆にコイル3, 4は単調減少している。

の影響を排除するために、インダクタンス値の校正が必要になると考えられる。

## 6. 結論

本研究では、円盤形状の磁性エラストマを非磁性エラストマに埋め込んだ接触層の直下に4つの平面コイルを設置した柔軟な3軸力覚センサを提案した。基板に等間隔で実装した4つのコイルのインダクタンス変化を測定することで、3軸力の推定可能性を実機実験により検討した。実験結果より、4つのコイルのインダクタンスは独立して与えた3軸力の方向に応じて増減することを確認し、3軸方向の接触力がインダクタンス変化の組み合わせを用いることで弁別可能であることを確認した。今後の課題は、これらの結果を用いてインダクタンスの変化を定式化することにより、印加した3軸力の推定を行うことである。

提案センサは、基板上に実装した複数のコイル上に柔軟なエラストマを配置したのみの非常に単純な構造

である。測定レンジや感度などのセンサ特性は、エラストマの硬さや厚み、MREの大きさや鉄粉含有比、コイル形状やその配置などのパラメータによって調整可能であると考えられる。今後の課題の一つは、これらのパラメータを変えた時のセンサ応答特性を評価し、3軸力覚センサの設計指針を導出することである。また、本研究ではコイルを硬いプリント基板上に実装して実験を行ったが、このコイルは柔軟なフレキシブル基板へ実装することも可能である。基板を柔軟にすることにより、曲面など複雑形状にも貼り付け可能な3軸力覚センサを構築可能であると考えられる。このような提案センサのフレキシブル基板への実装や小型化を今後行い、ロボット手先などへの実装も行う予定である。

## 謝辞

本研究は、科学研究費補助金 特別研究員奨励費 (JP17J01443) および科学技術人材育成費補助金 テニユアトラック普及・定着事業、科学技術振興機構 研究成果展開事業 センター・オブ・イノベーション (COI) プログラム、科学技術振興機構 さきがけ (JPMJPR1652) の補助を受けたものである。

## 参考文献

- [1] R. S. Dahiya, et al.: "Tactile sensing—from humans to humanoid", IEEE Trans. Robot., vol. 26, no. 1, pp. 1–20, 2010.
- [2] 川節 他: "磁性・非磁性エラストマを積層した磁気式触覚センサの基礎特性解析", 日本 AEM 学会誌, vol.24, no.3, pp.204–209, 2016.
- [3] 川節 他: "Difference of Gaussian 様空間応答を示す磁気式柔軟触覚センサ", 第34回日本ロボット学会学術講演会予稿集, vol.DVD-ROM, 3F2-03, 2016.
- [4] T. Kawasetsu, et al.: "Size dependency in sensor response of a flexible tactile sensor based on inductance measurement", IEEE Sensors Conf. 2017, submitted.
- [5] H. Takahashi, et al.: "A triaxial tactile sensor without crosstalk using pairs of piezoresistive beams with sidewall doping", Sensors and Actuators A: Physical, vol.199, pp.43–48, 2013.
- [6] 中本 他: "磁気抵抗素子とインダクタを用いた磁気式触覚センサ", 日本機械学会論文集 (C 編), 76 巻, 766 号, pp.84–90, 2010.
- [7] T. P. Tomo, et al.: "Design and Characterization of a Three-Axis Hall Effect-Based Soft Skin Sensor", Sensors, 16(4), 491, 2016.
- [8] A. Takagi, et al.: "Sensitivity-enhancing All-in-type Optical Three-axis Tactile Sensor Mounted on Articulated Robotic Fingers", Procedia Computer Science, 76, pp.95–100, 2015.
- [9] K. Kamiyama, et al., "Vision-based sensor for real time measuring of surface traction fields", IEEE Comput. Graph. Appl., vol. 25, no. 1, pp.68–75, 2005.