

# 磁性エラストマを用いた磁気式触覚センサの特性評価

○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)

## Deformation Response of a Magnetic Type Tactile Sensor using a Magnetorheological Elastomer

○Takumi KAWASETSU, Takato HORII, Hisashi ISHIHARA, and Minoru ASADA  
(Graduate school of engineering, Osaka University)

Abstract: Recently, flexible tactile sensors have been studied as whole body skin of personal robots. In this study, we propose a new magnetic type flexible tactile sensor using magnetorheological elastomer. The sensor is composed of a magnetorheological elastomer, a non-magnetic and low rigidity elastomer, a permanent magnet, and a magnetic sensor. The experiment results show our prototype sensor can measure applied force. It was also revealed that sensitivity and measuring range of the prototype sensor depend on the thickness of the both elastomers.

### 1. 緒言

ロボットが生活空間に入り込み, 人との接触の機会や未知環境で適切に振る舞う必要性が増加するにつれ, ロボットの表面全身に渡って触覚を持たせることが重要になってくる. これまでにも数多くの触覚センサが開発されてきた[1-3]ものの, 高い空間分解能を実現するための触覚センサの高密度化, 全身を覆う触覚センサからもたらされる膨大な量の配線の扱い, 長期間の物理的な接触インタラクションに対する耐久性をはじめとする様々な技術的困難により, 全身に分布可能な触覚センサの統一形は未だ存在しない [4].

一方で, 人と同じ空間で共存するロボットには, ロボットと人との物理的インタラクションにおいて人を守るためにも, ロボット自身を守るためにも柔軟な被覆を持たせることが望ましい. そのため, エラストマやゴムなどの柔軟な素材がロボットの被覆として多く用いられており [5,6], ロボットがこのような柔軟な被覆と触覚を併せ持つことが今後より重要になると考えられる.

Hosoda et al. [7]は, PVDF フィルムを柔軟素材中に内包した触覚センサを提案し, 表面に加えられた力が柔軟素材内部のフィルムをたわませることで接触力検知が可能であることを示した. しかしながら, 柔軟素材中に内包された多くの配線は長期使用時に断線という問題を引き起こし, また劣化しやすい柔軟素材の交換を困難とするため, 実用性の点で問題を抱えている.

Minato et al. [8]や Mukai et al. [6]は, ひずみセンサや圧力センサを柔軟材料下に設置した, 人型ロボットの全身被覆を開発した. しかしながら, 被覆表面に与えられた接触力は, 被覆が柔軟であればあるほど深部に到達しにくいいため, センサ感度を高めるためには柔軟

材料をある程度硬いものにせざるをえないという制約があった.

一方, 伍賀ら [9]は柔軟素材中に永久磁石を内包させた磁気式触覚センサの提案を行った. これは柔軟素材の変位を, 永久磁石の変位がもたらす磁束の変化として磁気センサ (柔軟素材を支える基板に実装) で検出できるものである. このセンサの大きな特徴として, 柔軟素材の変位を磁気として非接触で検出できるため, 柔軟素材中に配線を通す必要がない. しかしながら, 劣化した柔軟層を交換した場合, 永久磁石とセンサ素子の位置関係が変わってしまい, センサ応答特性が大きく変わってしまうという問題が考えられる. 全身への触覚実装を考慮すると, 劣化した柔軟被覆の交換の際にも, 多数のセンサ素子と永久磁石の厳密な位置合わせが不要であることが望ましい.

そこで, 本研究では柔軟被覆の表面に磁気応答性機能性材料の一つである磁性エラストマの層を有する磁気式触覚センサを提案する. 本センサは, 柔軟素材中に配線を通す必要がなく, また永久磁石と磁気センサの位置関係が被覆交換に際しても不変であるため, 耐久性やメンテナンス性において構造的に有利である. また, 表面の磁性層の変位を感知可能であるため, 柔軟性と感度を両立できる.

本稿では, 提案するセンサの試作モデルの製作を行い, その評価実験を行ったため以下に報告する.

### 2. 提案する磁気式触覚センサ

#### 2.1 磁気式触覚センサの概要

提案する磁気式触覚センサ [10]の外観を Fig. 1 に示す. 本センサは磁性エラストマ, 非磁性の低剛性エラストマ, 永久磁石および磁気センサから構成される.

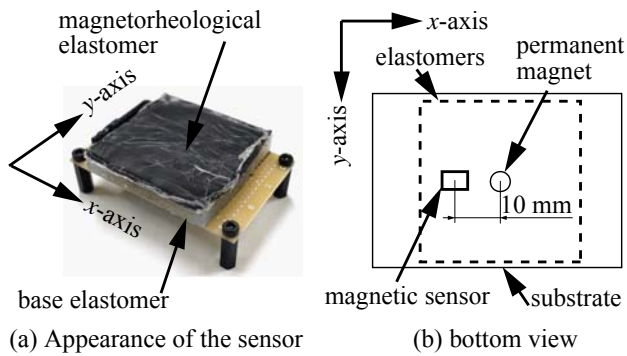


Fig. 1 Overview of a prototype magnetic type tactile sensor. (a) Appearance of the sensor. (b) Schematic drawing of the sensor viewed from the bottom. The sensor is composed of a magnetorheological elastomer, a base elastomer, a permanent magnet, and a magnetic sensor (giant magnetoresistance sensor: GMR sensor).

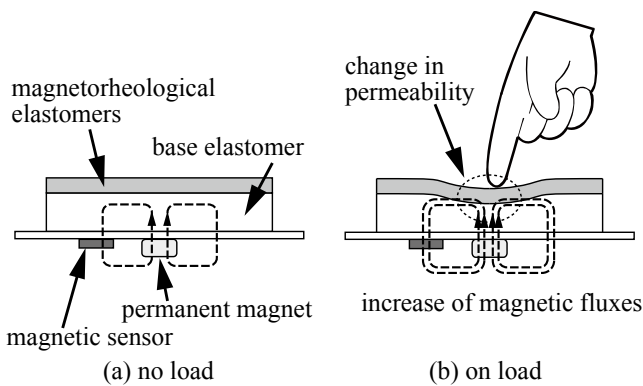


Fig. 2 Diagram of sensing mechanism. (a) No load. (b) Load is applied. Magnetic sensor detects deformation of the elastomer as changes of magnetic fluxes.

磁性エラストマは、シリコンエラストマなどの柔軟素材に微小な磁性粒子（たとえば透磁率の大きな鉄粉など）を内包させた磁気応答性機能性材料である。センサ表面の柔軟部は、層状に成形した磁性エラストマと非磁性の低剛性エラストマ（以下、支持エラストマと呼ぶ）を重ねて接着し二層構造としたものである。

本研究では、白金を触媒とする付加重合によりゲル化するシリコンにシンナーを配合して硬度を調製したものから両エラストマを作成した。今回は、シンナーを質量比 200%で配合させることにより、軽い接触で容易に変形する程度の非常に低剛性なエラストマとした。

製作したエラストマのサイズは、幅 45mm、奥行き 45mm、高さ 7mm（うち、磁性エラストマ層が 2 mm）であり、磁性エラストマには粒子径 2  $\mu\text{m}$  の鉄粉（BASF 社製ハードグレード HQ 鉄粉）を体積比 30%で含有させた。この鉄粉の含有率は、次項に示した動作原理よりセンサ押下力に対する感度へ影響を与える。含有率が高いほどその感度が向上すると考えられるが、その

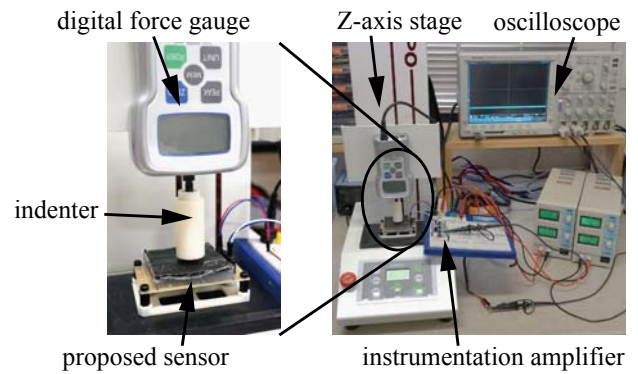


Fig. 3 Experimental setup for examining relationships between applied force and sensor output. Applied force is measured by using a digital force gauge mounted on a Z-axis stage. A cylindrical indenter (diameter = 15 mm) is mounted to the force gauge. Both output are simultaneously measured by an oscilloscope.

一方でエラストマが固化し難くなる。今回の実験では、固化化することを確認した最大の体積比である 30%とした。

センサ裏面にはネオジウム永久磁石（直径 3mm、厚み 1.5mm の円柱形状）と、巨大磁気抵抗センサ（NVE 社製 AA002-03E）が基板上に配置されている。試作モデルでは永久磁石を基板中心に、磁気センサを永久磁石と同一平面上で 10 mm 離れた位置に配置した。

## 2.2 動作原理

提案するセンサの動作原理を Fig. 2 に示す。(a)の無負荷時において、永久磁石からもたらされる磁束は直上にある支持エラストマを貫き、磁気センサで検出される。すなわちエラストマに変形が与えられていない場合は、常に一定量の磁束が磁気センサで検出される。

(b)に示すように負荷として押下力を与えた場合、支持エラストマが変形し磁性エラストマが永久磁石に近づく。ここで、磁性エラストマは透磁率の大きな鉄粉を内包しているため、磁性エラストマの接近に伴い永久磁石直上の透磁率が増加し、その結果磁束が増加する。このように、磁性エラストマの押下方向への変形を磁束の変化として検出することで、押下力と深さの測定が可能となる。

## 3. 評価実験

提案する磁気式触覚センサの検出特性を確認するために、評価実験を行った。センサ表面に対して垂直方向の押下力を与え、そのときのセンサ出力を測定した。

### 3.1 実験環境

Fig. 3 に本研究で用いた実験環境を示す。試作したセンサを Z 軸ステージ（日本電産シンボ社製 FGS-50E-H）上に設置した。Z 軸ステージに取り付けた 50 N まで測

定可能なデジタルフォースゲージ（日本電産シンボ社製 FGP5）によって、センサ押下力を測定した。今回の実験において、センサを押下するための圧子は直径 15mm の円柱形状とし、フォースゲージ先端に取り付けた。なお、今回用いた Z 軸ステージは、ステージの上昇および下降速度のみを設定可能であり、Z 軸方向の位置を検出できない。そのため Z 軸方向の位置は、ステージ速度と測定したステージの移動時間をもとに算出した。

センサ応答は、増幅率を 100 倍とした 1 段の差動増幅器（Texas Instruments 社製 INA121）からなる測定回路を通じてオシロスコープで測定した。このとき、フォースゲージにて測定された押下力に対応するアナログ電位を、オシロスコープにて同時に測定することで、押下力とセンサ応答の関係を測定した。このときのサンプリング周期は 1 ms である。

### 3.2 実験結果

はじめに、押下力と押下深さに対するセンサ応答の関係を測定した。実験手順は次の通りである。

- 1) Z 軸ステージに取り付けた圧子を、70 mm/min の速度で降下させてセンサに押し込んでいき、押下力がおよそ 3.5 N となるまで押下
  - 2) 3 秒間静止
  - 3) 同様の速度で圧子を上昇させ、押下力を除去
- 以上を一つのシーケンスとして、実験を行った。

今回作成したセンサは、ある程度以上の力で押し付けた場合、形状の回復までにかかる時間が急激に長くなり、センサ出力のヒステリシスが強くなることが判明した。そこで今回の実験では、押下力が最大でもヒステリシスがそれほど問題にならない程度になるように押下力を設定した。

Fig. 4 に測定した押下力とセンサ応答の測定結果を示す。各データ点は、フォースゲージおよびセンサ出力結果の 10 ms 毎の区間平均値である。図中の矢印は押下方向を示しており、右向きが押下力の印加を、左向きが除去を示している。二本の点線は、押下力の印加、除去時のそれぞれのデータに対する二次の近似曲線である。実験結果より、押下力に対してほぼ正の相関を持つ出力が得られ、その出力にはヒステリシスが見られることが分かった。

Fig. 5 は押下深さとセンサ応答の測定結果を示している。横軸の押下深さは前述のようにステージ速度と移動時間を基に算出するため、厳密な押下深さとは必ずしも一致しない。今回はフォースゲージの値の立ち上がりのタイミングを押下開始時点とみなした。押下深さに対するセンサ応答は、深さ 0.2 mm 程度まではセンサ出力が得られていないものの、Fig.4 の応答に比べ

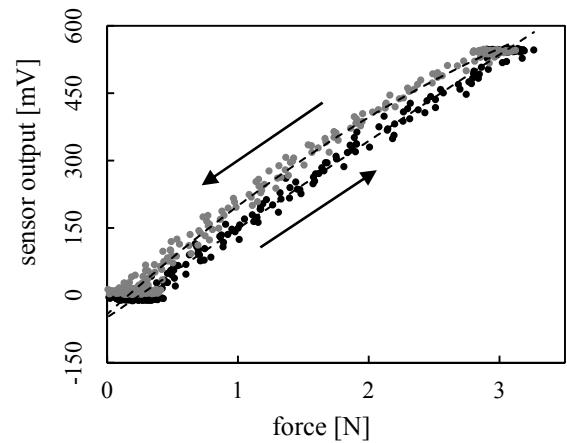


Fig. 4 Change of sensor output voltage against the applied force that increased from 0 N to 3.5 N and then decreased to 0 N.

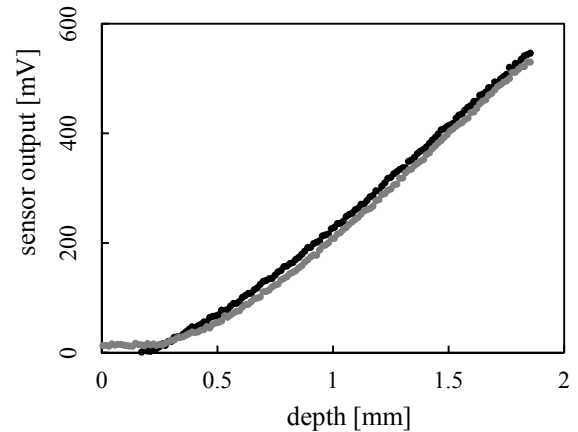


Fig. 5 Depth of the sensor surface vs. sensor output. The sensor output increased linearly to the depth.

Table 1 Thickness differences of each elastomer layer between three types of sensors. Type A is the same sensor with the one used in the first experiment.

	thickness of base elastomers	thickness of magnetorheological elastomer
type A	5 mm	2 mm
type B	5 mm	4 mm
type C	10 mm	2 mm

てほぼ線形に応答していることがわかった。

次に、センサに用いるエラストマのパラメータを変更した場合の、押下力、押下深さとセンサ応答の関係を測定した。Table 1 に、本研究で使用した 3 つのエラストマのパラメータを示す。今回は、磁性エラストマ層と支持エラストマ層の厚みを変化させたときの、センサの感度や測定範囲の変化を確認した。なお、先の

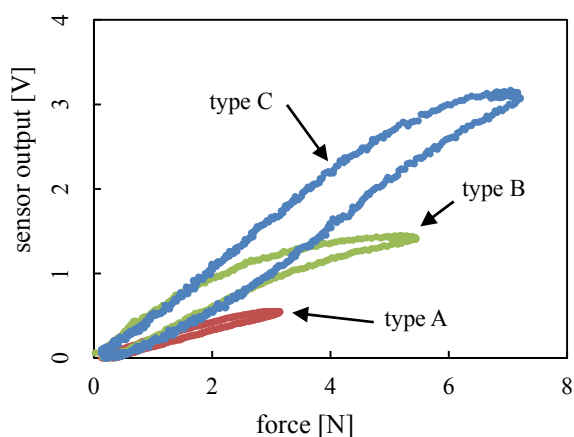


Fig.6 Comparison of sensor output changes against the applied force between the three types of sensors.

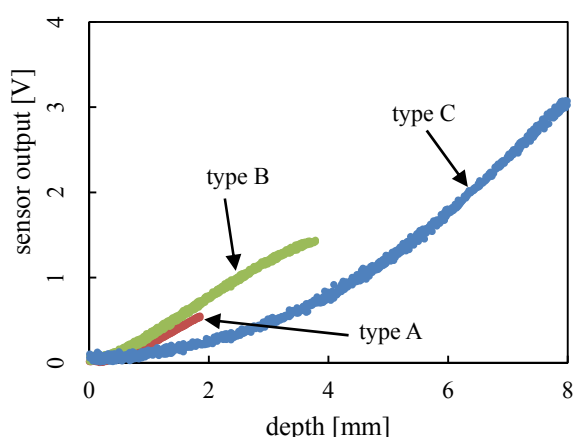


Fig.7 Comparison of sensor output changes against the depth of each sensor surface between the three types of sensors.

Fig. 4 に示した実験で用いたエラストマは、表 1 中の Type A である。実験手順は先ほどと同様であり、それぞれの最大の押下力はおおよそ Type A が 3.5 N, B が 6 N, C が 8 N である。こちらの実験においても、最大の押下力は各エラストマの変形の振る舞いに変化が起きない範囲で最大の力とした。

3 つのエラストマを用いて測定した押下力とセンサ応答の関係を図 6 に、押下深さとセンサ応答の関係を Fig. 7 にそれぞれ示す。これらの結果より、支持エラストマと磁性エラストマの厚みに応じて、力や深度に対する感度や線形性などのセンサ応答特性が変化することが確かめられた。

#### 4. 考察

本節では、3 節に示した実験にて得られた知見の総括と考察を行う。

Fig. 4 および Fig. 5 に示した実験では、提案するセンサが押下力と押下深さに対してほぼ正の相関を示す応答を見せることを確認した。Fig. 4 より、センサ押下に

際してヒステリシスが見られるが、これはエラストマの粘性によってもたらされると考えられる。Fig.5 から、押下力を完全に除去した場合でも、数十 mV の応答が残っていることがわかる。これは、先述したようにエラストマの形状の回復までに時間がかかるためであると考えられる。

次に、異なる 3 つのエラストマを用いて行った実験では、エラストマの各層の厚みにより応答特性に変化が見られた。はじめに Type A と B を比較すると、Fig. 6 より Type A より B の方が同じ押下力に対して得られたセンサ応答が大きい。同様に、Fig. 7 からは同じ押下深さに対して Type B の方が大きなセンサ応答を得ていることがわかる。すなわち、磁性エラストマ層が厚いほど、センサの感度が大きくなっていることがわかる。これは、磁性エラストマ層の厚みを増やすことで磁性エラストマ層の鉄粉含有量が増加し、より大きな透磁率の変化すなわち磁束の変化を起こすためだと考えられる。

Type B と Type C では、Fig.6 より押下後半にセンサ応答の傾き、すなわち感度に変化が見られる。これは、圧子の押下にともない支持エラストマの変形に必要な力が急激に増加する結果と考えることができる。押下によってエラストマが生じる反発力も大きくなるため押下に必要な力が増大し、その結果として押下力に対してセンサ応答の感度が小さくなるような応答となると考えられる。

Fig. 6 や Fig. 7 に示されるように、Type C は A よりも広い範囲の押下力と押下深さでセンサ出力の変化が計測できている。しかしその一方で、Type C を用いた場合、センサ応答が押下深さに対して二次曲線的に増加しており、特に深さが小さい間では出力の変化が小さいものとなった。これは、二次曲線的なエラストマの表面形状の変形がセンサ応答に影響しているからであることや、もしくは磁束密度が二次関数的に減少するからであると考えられるが、今後のさらなる検証が必要である。

以上の結果より、(1) 変形に対する感度を高めたい場合には、支持エラストマ層を薄く、磁性エラストマ層を厚くすればよい、(2) ただし、支持エラストマ層が薄ければ、測定可能な変形範囲は限られてしまい、逆に厚ければ、特に小さな変形に対する感度が低下してしまうという、感度や測定範囲といったセンサの基本的な特性を、両エラストマの厚みを変えることによって決定できることが示唆された。

## 5. まとめ

本研究では、磁性エラストマを用いた磁気式触覚センサを提案し、その評価実験を行った。本センサは、柔軟素材中に配線を通す必要がなく、また永久磁石と磁気センサの位置関係が被覆交換に際しても不変であるため、耐久性やメンテナンス性の観点から構造上有利といえる。評価実験の結果、提案するセンサは垂直方向の押下力の測定が可能であることを示した。また、センサを構成するエラストマのパラメータを変化させることにより、感度や測定範囲を変化できることを確認した。

今後の予定としては、提案したセンサのさらなる定量的な評価、解析、それに基づくモデル化が挙げられる。また、エラストマの硬度や鉄粉含有量などさらなるパラメータの変更とその検証、時空間的な応答の検証、ロボット全身への実装を見越した大規模実装なども今後行う予定である。

## 謝辞

本研究は、科学研究費補助金 特別推進研究 (24000012)、若手研究 B (15K18006)、特別研究員奨励費 (15J00671) および科学技術人材育成費補助金 テニュアトラック普及・定着事業の補助を受けたものである。

## 参考文献

- [1] P. Maiolino, M. Maggiali, G. Cannata, G. Metta, and L. Natale, "A Flexible and Robust Large Scale Capacitive Tactile System for Robots," *IEEE Trans. Sensors*, Vol.13, No.10, pp.3910-3917, 2010.
- [2] 長久保晶彦, H. Alirezaei, 国吉康夫, "逆問題解析に基づく触覚分布センサ," *日本ロボット学会誌*, Vol.25, NO.6, pp.960-969, 2007.
- [3] 吉海智晃, 福島寛子, 小林一也, 稲葉雅幸, "対人インタラクションのための伸縮可能な被覆型柔軟ニットセンサ外装の開発," *日本ロボット学会誌*, Vol.30, NO.5, pp.505-514, 2012.
- [4] R. S. Dahiya, G. Metta, M. Valle, and G. Sandini, "Tactile sensing—from humans to humanoids," *IEEE Trans. Robotics*, Vol.26, No.1, pp.1-20, 2010.
- [5] 国吉康夫, 大村吉幸, 寺田耕志, 長久保晶彦, "等身大ヒューマノイドロボットによるダイナミック起き上がり行動の実現," *日本ロボット学会誌*, Vol.23, No.6, pp.706-717, 2005.
- [6] T. Mukai, M. Onishi, T. Odashima, S. Hirano, and L. Zhiwei, "Development of the Tactile Sensor System of a

Human-Interactive Robot "RI-MAN"," *IEEE Trans. on Robotics*, Vol. 24, No. 2, pp. 505-512, 2008.

[7] K. Hosoda, Y. Tada, and M. Asada, "Anthropomorphic robotics soft fingertip with randomly distributed receptors," *J. Robotics and Autonomous Systems*, 54, pp.104-109, 2006.

[8] T. Minato, Y. Yoshikawa, T. Noda, S. Ikemoto, H. Ishiguro, and M. Asada, "Cb2: A child robot with biomimetic body for cognitive developmental robotics," In *Proc. of 7th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 557-562, 2007.

[9] 伍賀正典, 中本裕之, 武縄悟, 貴田恭旭, "磁気式触覚センサの小型化と性能評価," *日本機械学会論文集 C編*, Vol.76, No.772, pp.3640-3647, 2010.

[10] 堀井隆斗, 長井志江, 浅田稔, "磁性エラストマーを利用した磁気式触覚センサ," *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集*, 1P1-X08, 2014.