

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

Deformation response of a magnetic type tactile sensor with a two-layered surface made of a non-magnetic and a magnetorheological elastomer

川節 拓実(学生員), 堀井 隆斗, 石原 尚, 浅田 稔

Takumi KAWASETSU (Stu. Mem.), Takato HORII, Hisashi ISHIHARA, Minoru ASADA

Recently, flexible tactile sensors have been studied as whole body skin for personal robots. However, these sensors are suffering from the problems that wiring contained in flexible coverings is easily disconnected, and that replacing of flexible coverings is difficult. In this study, we propose a new magnetic type flexible tactile sensor using a magnetorheological elastomer. The sensor does not contain any wiring in flexible covering layers, therefore, wiring disconnection is not the problem. Further, it is easy to replace flexible coverings because its positioning is not needed. The sensor is composed of a magnetorheological elastomer, a non-magnetic and low rigidity elastomer, a permanent magnet, and a magnetic sensor. The simulations and real experimental results show that the prototype sensor can measure normal force, and that sensitivity and measuring range of the prototype sensor depend on the thickness of the both elastomers.

Keywords: tactile sensor, magnetorheological elastomer, flexible sensor, magnetic sensor, magnetic simulation

1 緒言

人との物理的接触の際に危害を与えず、また自身の身体の破壊を防ぎ、操作対象の形状に馴染むような接触を実現するために、ゴムやエラストマ、弾性発泡体のような柔軟素材がロボットの被覆として多く用いられている [1,2]. そして、このような柔軟素材の被覆に接触感知機能を持たせるため、数多くの触覚センサが開発されてきた [3-5]. しかし、センサの感度向上や高密度化、被覆内外の膨大な配線の扱い、外力によって長期間変形させられることに対する耐久性を始めとする様々な技術的困難により、ロボットの全身被覆に適した柔軟かつ高感度で、耐久性やメンテナンス性に優れた触覚センサの統一形は未だ存在しない [6].

これまで開発されてきた柔軟触覚センサも、素材の柔軟さに由来する技術的問題を抱えている。例えば 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. [2]は、ひずみセンサや

連絡先: 川節 拓実, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1, 大阪大学大学院 工学研究科 知能・機能創成工学専攻,
e-mail: takumi.kawasetsu@ams.eng.osaka-u.ac.jp
大阪大学大学院 工学研究科

圧力センサを柔軟素材の内側表面に設置した、人型ロボットの全身被覆を開発した。しかしながら、このように被覆の内側表面の歪みや応力を感知する方式では、被覆表面に生じた応力が深部まで伝達することが必要であるため、センサ感度を高める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、Goka et al. [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した。これは柔軟素材の変形を、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は、柔軟素材中に配線を通すことなく、被覆のより表面に近い位置の変位を検出可能なことである。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、劣化し易い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。また、人が被覆に触れた際に異物感を感じさせないようにするためには、このような大きな固形物は柔軟素材中に配置されていないことが望ましい。

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、柔軟素材中に配線や大きな固形物を配置する必要がなく、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、押下力によって生じた表面の深さ方向の変位が、磁気センサを設置した箇所の磁束密度を二次曲線的に増加させることを磁界シミュレータで確認した。また、実際にこの方式のセンサを作成し、シミュレーションと同じ磁束の変化を磁気センサで捉えることで表面の押下深さを検出可能であることを確認した。さらに、センサを構成する各層の厚みを変えた条件でも同様にシミュレーションと実機による実験を実施し、厚みの変更によって感度と測定範囲の調整が可能であることを明らかにした。

2 提案する磁気式触覚センサ

2.1 提案センサの概要

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、磁性エラストマと非磁性の低剛性エラストマを層状に重ねた二層のエラストマ、永久磁石および磁気センサから構成される。

磁性エラストマは、シリコー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ーンにシンナーを配合して硬度を調整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、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 50 mm、奥行き 50 mm、高さ 12 mm（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 μm のカルボニル鉄粉（BASF 社製ハードグレード HQ）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を決定する一つの要因となる。含有率が高いほどその感度が向上すると思われるが、一方でエラストマに不純物が多く含まれるため固化し難くなる。そのため今回の実験での鉄粉含有率は、エラストマが固化することを確認でき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 3 mm、厚み

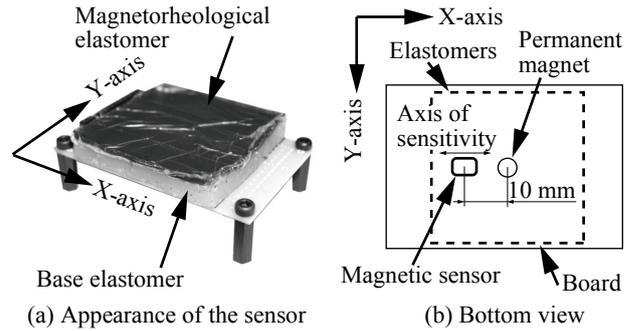


Fig. 1 Overview of a prototype magnetic type tactile sensor. (a) Appearance of the sensor prototype. Black magnetorheological elastomer is laminated on a white translucent base elastomer. Its top surface is covered by a thin protective plastic film. (b) Schematic drawing of the sensor viewed from the bottom. The sensor is composed of a magnetorheological elastomer, a base elastomer, a permanent magnet, and a magnetic sensor (giant magnetoresistance sensor: GMR sensor).

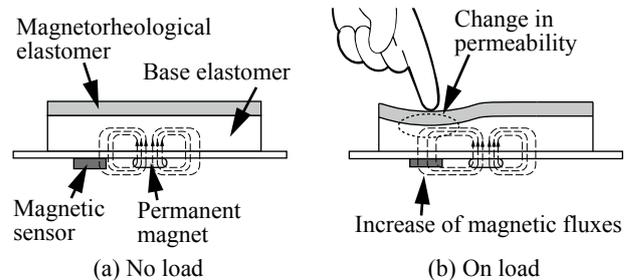


Fig. 2 Diagram of sensing mechanism. (a) No load. (b) Load is applied. Magnetic sensor detects deformation of the elastomer as changes of magnetic fluxes.

1.5 mm の円柱形状、表面磁束密度 0.2 T) 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。磁気センサの感度軸は Fig. 1(b)に示すとおり、磁石に向かう方向である。

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磁気センサに近づく。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磁気センサ

直上の透磁率が増加し、その結果磁気センサを貫く磁束が増加する。このように磁性エラストマの押下方向への変形を、磁気センサを貫く磁束量の変化として検出することで、押下力と押下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、シミュレーションによる評価および試作センサによる実験を行った。ここでは、センサ表面に対して垂直方向の押下力と押下深さを与え、そのときのセンサ出力を測定した。

3.1 シミュレーションによる評価

はじめに、提案するセンサの振る舞いを磁界シミュレータによって評価した。シミュレーションには、フリーウェアの2次元静電磁界シミュレータであるSATE(株式会社アドバンスト・サイエンス・ラボラトリー社製)を用いた。

Fig. 3 にシミュレーションに用いた提案センサのモデルを示す。モデルは、支持エラストマ (BE), 磁性エラストマ (ME), 基板, 永久磁石 (PM), 磁気センサおよびそれらを取り巻く大気から構成されている。シミュレーションに用いた実験パラメータは、Table 1 の通りである。本シミュレーションにおいては簡単化のため、磁性エラストマは物体の全域において均一な透磁率を持つものとして扱った。

このモデルに対して、センサ直上 ($x=25$) に直径 20 mm の圧子で 0 mm から 8 mm まで 0.5 mm 毎に押下深さを与えた場合のシミュレーション結果を、Fig. 4 に示す。横軸は圧子の押下深さを表し、縦軸はセンサ位置においてセンサ感度軸方向の磁束密度成分から磁束量を算出したものであり、この磁束量がセンサ応答に相当する。提案するセンサは無負荷時からの磁束量の変化分をセンサの検出量とするため、Fig. 4 における縦軸の値は押下深さ 0 mm からの差分として表示した。シミュレーション結果より、磁束量は押下深さに対して二次曲線的に増加することが分かった。これより、磁束の変化を磁気センサで検出することで、押下量の測定が可能であることが示唆された。

3.2 実機による実験

3.2.1 実験環境

Fig. 5 に本研究で用いた実験環境を示す。試作した

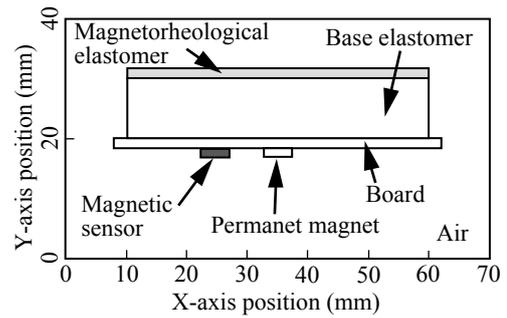


Fig. 3 Simulated model consisting of a magnetorheological elastomer, a base elastomer, a board, a permanent magnet, and a magnetic sensor.

Table 1 Parameters of each materials. BE, ME, and PM stand for base elastomer, magnetorheological elastomer, and permanent magnet, respectively.

	Size (mm) W×H	Relative permeability μ_r	Magnetic flux density of surface (T)
Air	Other region	1	
BE	50×10	1	
ME	50×2	100	
Board	54×1.6	1	
Sensor	5×1.5	1	
PM	5×1.5		0.2

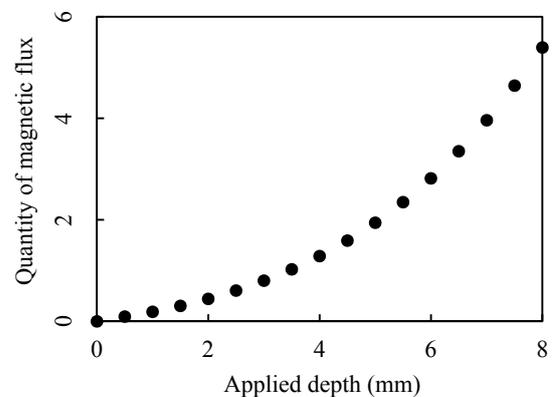


Fig. 4 Simulated difference of magnetic fluxes penetrating the magnetic sensor against applied depth. Magnetic fluxes increased like quadratic curve.

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 50N 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 20 mm 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

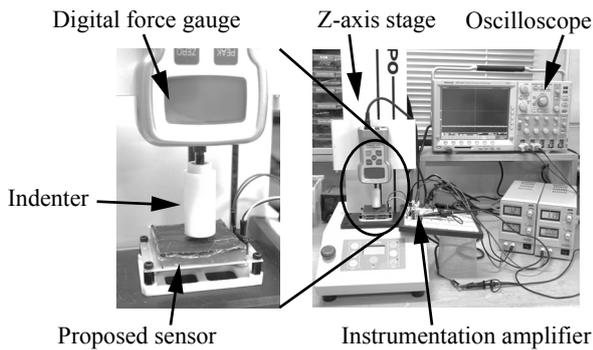


Fig. 5 Experimental setup for examining relationships between applied force and sensor output. Applied force is measured by using a digital force gauge mounted on a Z-axis stage. A cylindrical indenter (diameter = 15 mm) is mounted to the force gauge. Both output are simultaneously measured by an oscilloscope.

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基に算出した。

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。

3.2.2 センサ応答とヒステリシス

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 の降下速度でセンサに押し込んでいき、シミュレーションと同様に深さがおよそ 8 mm 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。

Fig. 6 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、左向きが除去を意味する。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。今回作成したセンサは、ある程

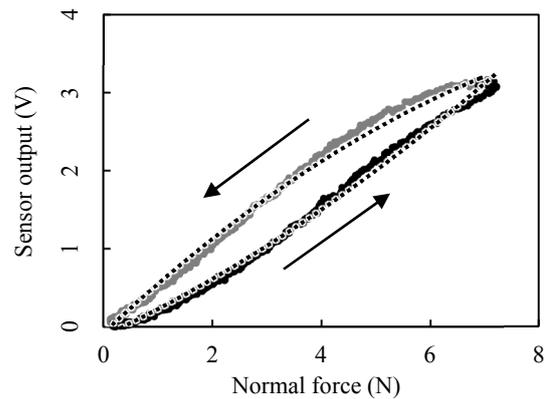


Fig. 6 Change of sensor output voltage against the normal force that increased from 0 N to 7 N and then decreased to 0 N.

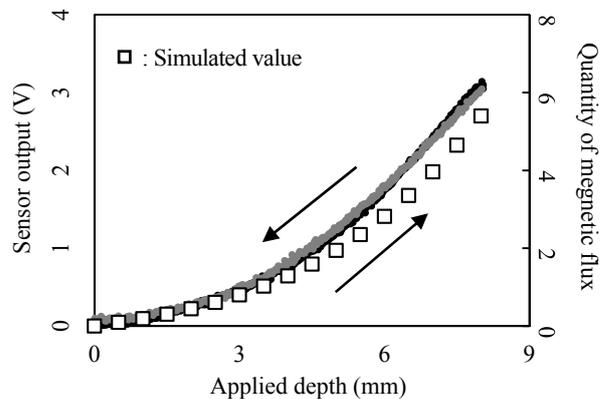


Fig. 7 Depth of the sensor surface vs. sensor output. The sensor output increased like quadratic curve. White square represents simulated value calculated in section 3.1.

度以上の力で押し付けた場合、エラストマの形状の回復までに要する時間が急激に長くなる。このエラストマの粘性が、センサ応答に見られるヒステリシスをもたらすと考えられる。

Fig. 7 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 0.5 mm 程度まではセンサ出力が得られていないものの、Fig. 6 の応答に比べてヒステリシスの少ない二次曲線的な応答を示すことがわかった。

また、シミュレーション結果と試作センサによる実測値の比較を行った。Fig. 7 中の白抜き四角プロッ

トは、3.1 項のシミュレーションにより算出した値である。押下深さに対するセンサ応答が、二次曲線的に増減する同様の傾向を見せており、シミュレーションと試作センサによる実験結果が一致することが確かめられた。

3.2.3 層の厚みの影響

センサに用いるエラストマの構成を変化させた場合、そのセンサ応答に変化が生じると推測される。特に、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場合、センサの感度や測定範囲に変化が生じると考えられる。

そこで、センサに用いる二層構造のエラストマの厚みを変更した場合の、押下力、押下深さとセンサ応答の関係を測定した。Table 2 に、本研究で使用した3つのエラストマの各層の厚みを示す。なお、先の Fig. 6 および 7 に示した実験で用いたエラストマは、Table 2 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深さはおよそ Type A が 2 mm、Type B が 4 mm、Type C が 8 mm である。これらの最大の押下深さは、各エラストマの形状の回復時間に大きな変化を起こさない範囲で最大の深さとした。

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 Fig. 8 に、押下深さとセンサ応答の関係を Fig. 9 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、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。

同様に、シミュレーション結果と試作センサによる実測値の比較を行った。Fig. 9 中の白抜き四角、三角、丸のプロットは、Type A、Type B および Type C のセンサに関するシミュレーション値である。シミュレーションの方法は 3.1 項と同様である。

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 から Fig. 7 に示したシミュレーションと試作センサによる実験では、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. 6 より、試作センサでは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。押下力を完全に除去した直後のセンサ応答を詳しく見ると、数

Table 2 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	10 mm	2 mm
Type B	5 mm	2 mm
Type C	5 mm	4 mm

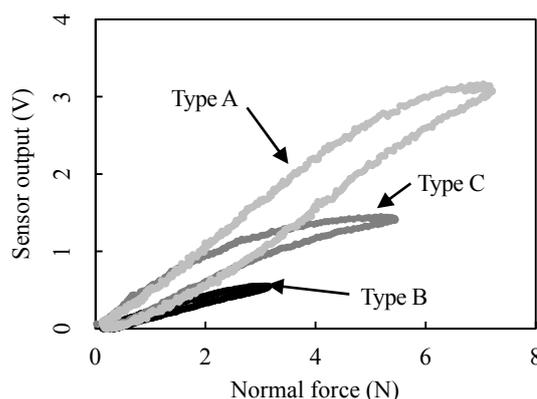


Fig. 8 Comparison of sensor output changes against the applied force between the three types of sensors.

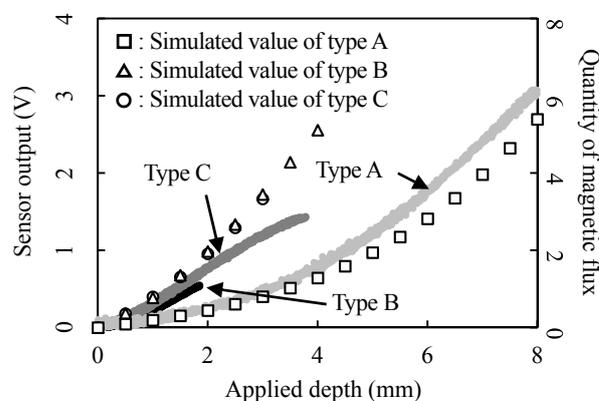


Fig. 9 Comparison of sensor output changes against the depth of each sensor surface between the three types of sensors. White squares, circles, and triangles indicate simulated value of type A, type B, and type C sensor, respectively.

十 mV の応答が残っていることがわかった。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 B と Type C を比較すると、Fig. 8 より Type B より Type C 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. 9 からは同じ押下深さに対して Type C の方が大きなセンサ応答を得ていたことがわかる。すなわち、磁性エラストマ層が厚いほど、センサの感度が高かった。

一方、シミュレーションによる Type B と Type C の結果を見ると、実測とは異なり同じ押下力に対するセンサ応答には大きな変化はない。これは、シミュレーションにおいて磁性エラストマを、物体全域において均一な透磁率を持つものとして扱ったことに起因すると考えられる。磁性エラストマ中の鉄粉を均一分布させることは困難であり、実際はエラストマ下面に鉄粉が集中分布していると推察される。そのため、磁性エラストマを厚くした場合は、より下面に鉄粉が集中するためその箇所の透磁率のみが非常に高くなる。この透磁率の不均一が、シミュレーション値と実測値の違いをもたらしていると考えられる。

Fig. 8 や Fig. 9 に示されるように、Type A は Type B 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 A 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、磁束密度が距離に応じて二次関数的に減少するからであると考えられる。

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 結論

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、磁界シミュレータと実機による評価実験を行った。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がわかった。また、センサを構成するエラストマの厚み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、提案センサの磁石とセンサの位置関係を変えることや、押下力を与える位置や圧子

の大きさを変えた場合も含めたさらなる定量的な評価、解析、それに基づくセンサ応答の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がセンサ応答に及ぼす影響の検証や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 テニユアトラック普及・定着事業の補助を受けたものである。

事務局記入—(20??年??月??日受付)

参考文献

- [1] 國吉康夫, 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.
- [2] 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.
- [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] 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.
- [5] P. Maiolino, M. Maggiali, G. Cannata, G. Metta, and L. Natale, “A Flexible and Robust Large Scale Capacitive Tac-tile System for Robots,” IEEE Trans. Sensors, Vol.13, No.10, pp.3910–3917, 2010.
- [6] 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.
- [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] M. Goka, H. Nakamoto, and S. Takenawa, “A Magnetic Type Tactile Sensor by GMR elements and inductors,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.885–890, 2010.
- [10] 堀井隆斗, 長井志江, 浅田稔, “磁性エラストマ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, IP1-X08, 2014.