

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^{*1} (学生員), 堀井 隆斗^{*1}, 石原 尚^{*1}, 浅田 稔^{*1}

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

Flexible cushioned tactile sensors are important for safe interaction between humans and communication robots, and therefore, several types of sensors have been developed. However, these sensors have problems in durability and maintainability because they have wirings or solids in their fragile flexible part. In this study, we propose a magnetic type flexible tactile sensor that does not contain any wiring and any solid except for minute particles of iron in its surface flexible layer. The sensor has a permanent magnet and a magnetic sensor at the bottom of its flexible layer and detects deformations of the surface layer containing iron particles (magnetorheological elastomer) as changes of the output of the magnetic sensor. Simulation results and experimental results with a developed sensor showed that the proposed sensor can measure depths of surface depression produced by normal forces, and that the sensitivity and the measurement 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、様々な方式の触覚センサが開発されてきた [3-10]. 一方で、センサの感度向上や高密度化の要求と、故障の原因となりやすい配線の簡素化と衝撃耐久性向上の要求の両立という技術的課題により、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課題を抱えている。例えば Hosoda *et al.* [7]は、PVDF フィルム等のセンサ素子を柔軟素材中の様々な位置に内包する触覚センサを提案した。ただし、柔軟素材中の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課題がある。

Minato *et al.* [8]や Mukai *et al.* [2]は、ひずみセンサや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必要があるため、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得ないという制約がある。

一方、Goka *et al.* [9]は柔軟素材中に永久磁石を内包する磁気式触覚センサを提案した。これは柔軟素材を支える基板に実装した磁気センサにより、磁石の移動に伴う磁束の変化として柔軟素材の変形を検出するのである。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変形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、磁石とセンサ素子の位置関係が変わり、センサ応答特性が大きく変わってしまうという問題がある。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磁石の厳密な位置合わせが不要か、もしくはより容易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には、このような大きな固形物が柔軟素材中に配置されていないことが望ましい。

そこで、柔軟被覆の表面に磁気応答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

連絡先: 川節 拓実, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1,
大阪大学吹田キャンパス M4-202,
e-mail: takumi.kawasetzu@ams.eng.osaka-u.ac.jp

^{*1} 大阪大学大学院 工学研究科

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。また実際に触覚センサを作成し、シミュレーションと同様に表面の深さ方向の変位を二次曲線的な磁気センサ応答として検出可能なことを確認した。さらに、柔軟被覆中の磁性エラストマ層の厚み配分を変えた条件でもシミュレーションと実機による実験を実施し、磁性層の厚みの配分によって感度と測定範囲の調整が可能な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の外観を Fig. 1 に示す。本センサは、非磁性の低剛性エラストマ層の上に磁性エラストマ層を積層した二層のエラストマ、そしてそれらを支える基板上に実装された永久磁石および磁気センサで構成される。

磁性エラストマ (magnetorheological elastomer, 以下 MRE と呼ぶ) 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材料である [11]。センサ表面の柔軟部は、層状に成形した MRE 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硬化するシリコンに可塑剤を配合して硬度を調製することで両エラストマを作成した。今回は、可塑剤を質量比 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、MRE 層が 2 mm) であり、MRE 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、次項に示す動作原理に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考えられるが、一方でエラストマの硬化を阻害し、また硬化後の柔軟性も損なわせる。そのため今回の実験での鉄粉含有率は、エラストマが硬化することを確認できた最大の体積比である 30 % とした。

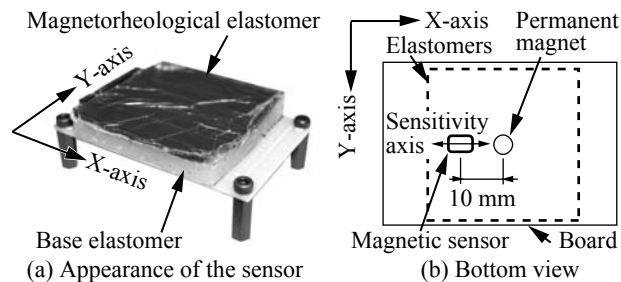


Fig. 1 Overview of a prototype magnetic type tactile sensor. (a) Appearance of the sensor prototype. Black magnetorheological elastomer is laminated on a white translucent base elastomer. Its top surface is covered by a thin protective plastic film. (b) Schematic drawing of the sensor viewed from the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

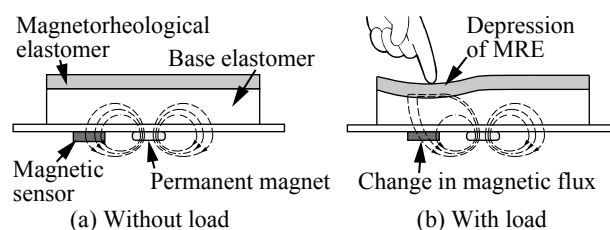


Fig. 2 Schematic of sensing mechanism without load (a) and with load (b). Magnetic sensor detects the deformation of the elastomer as a change in magnetic flux.

二層のエラストマ層の下面にはネオジウム永久磁石 (直径 5 mm, 厚み 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 AA003-02E) を実装した基板が取り付けられている。今回は、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) に示すように、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。図中(a)に示す無負荷時において、永久磁石が生成する磁束は直上にあるエラストマと磁気センサを貫く。この時、磁気センサで検出される一定量の磁束が変形検出のための基準となる。

一方、Fig. 2(b)に示すように押下力が加えられた場合、エラストマが変形し MRE が磁気センサに近づく。ここで、MRE は透磁率の大きな鉄粉を内包しているため、MRE 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変化する。このように MRE の押下方向への変形を、磁気センサを貫く磁

束の変化として検出することが可能である。

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センサ実機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加え、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、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触覚センサの構造モデルを示す。このモデルは、支持エラストマ (BE)、磁性エラストマ (MRE)、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で構成される。各材料のパラメータ設定は Table 1 の通りである。簡単化のため、MRE は領域全体において均一な透磁率を持つものとして扱った。また、MRE の比透磁率 μ_r は文献 [11] より 2 とした。

このモデルに対しセンサ直上 ($x=25$) に直径 20 mm の圧子で 0 mm から 8 mm まで 0.5 mm 毎に押下深さを加えた場合のシミュレーション結果を Fig. 4 に示す。横軸は押下深さを表し、縦軸の値はセンサ位置 ($x=25, y=17.5$) においてセンサ感度軸方向の磁束密度を算出したものである。提案センサは無負荷時からの磁束の変化をセンサの検出量とするため、Fig. 4 での縦軸の値は押下深さ 0 mm からの差分とした。得られた結果は、今回シミュレーションした範囲において単調増加する二次曲線によってよく近似された。

3.2 実機による実験

3.2.1 実験環境

Fig. 5 に今回用いた実験環境を示す。実際に作成した触覚センサ実機を Z 軸ステージ（日本電産シンポ社製 FGS-50E-H）上に設置した。Z 軸ステージに取り付けたデジタルフォースゲージ（日本電産シンポ社製 FGP-5）でセンサ押下力を測定した。今回の実験では、センサを押下するための圧子は直径 20 mm の樹脂製円柱とし、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

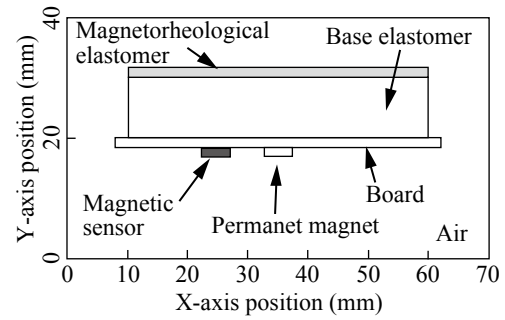


Fig. 3 Simulated model consisting of a magnetorheological elastomer, a base elastomer, a board, a permanent magnet, and a magnetic sensor.

Table 1 Parameters of each material. BE, MRE, 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	
MRE	50×2	2	
Board	54×1.6	1	
Sensor	5×1.5	1	
PM	5×1.5		0.2

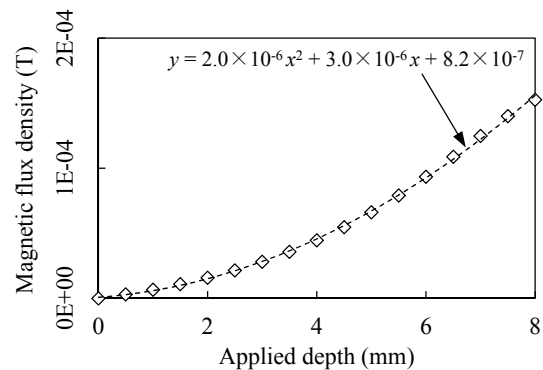


Fig. 4 Simulation result of magnetic flux density penetrating the magnetic sensor against applied depth with the second order fitted curve.

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基に算出した。

センサ応答は、増幅率が 100 倍の差動増幅器（Texas Instruments 社製 INA121）を介し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で同時測定することで、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。

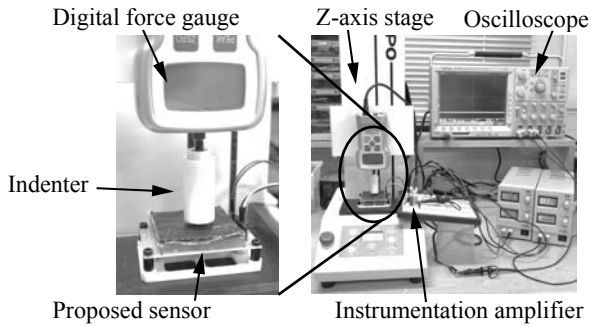


Fig. 5 Experimental setup for examining relationships between applied force and sensor output. Applied force was measured by using a digital force gauge mounted on a Z-axis stage. A cylindrical indenter (diameter = 20 mm) was attached to the force gauge. These outputs from the force gauge and the proposed sensor were simultaneously measured by an oscilloscope.

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。図中の矢印はデータ点の時間的順序を示し、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。実験結果よりセンサ出力は押下力の印加に対して単調増加を、除去に対して単調減少を示し、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. 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では、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の応答に比べヒステリシスの少ない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センサ実機による実測値の比較を行った。Fig. 7 中の白抜ききの菱形プロットは、3.1 項のシミュレーション (MRE の比透磁率は

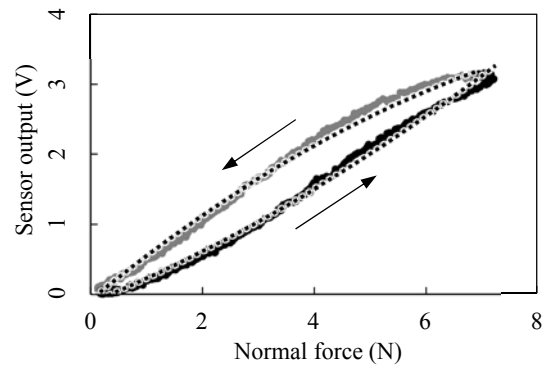


Fig. 6 Change of sensor output voltage against the normal force that increased from 0 to 7 N and then decreased to 0 N.

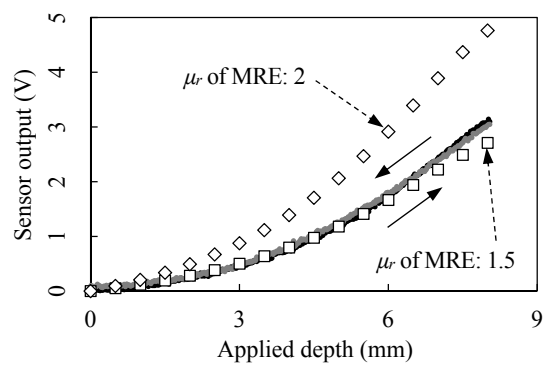


Fig. 7 Depth of the sensor surface vs. sensor output. The sensor output increased like quadratic curve. White diamond and square represent simulated value calculated by different relative permeability of MRE: 2 and 1.5, respectively.

2) で算出した磁束密度に対し磁気センサの換算係数2.6 mV/T および増幅回路の倍率を適用して求めたセンサ応答である。一方、四角プロットは MRE の比透磁率を 1.5 として同様に求めたものである。実測値は、この比透磁率 $\mu_r = 1.5$ の場合のセンサ応答とよく一致するものであった。同様の配合比で作成された先行研究 [11] の MRE の比透磁率である $\mu_r = 2$ とした場合のシミュレーション結果とは値に開きがあった。

3.2.3 層の厚みの影響

提案触覚センサは、柔軟層中の MRE 層が基板部に接近することでセンサ応答を生じさせるため、MRE 層の厚みや、接近度合いに関わる支持エラストマ層の厚みがセンサの感度に影響を与える。

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 8 mm, Type B が 2 mm, Type C が 4 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。以上の条件下で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。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。ここで MRE の比透磁率は、Fig. 7 のシミュレーション値と実測値が近い値となった 1.5 と設定した。その他のシミュレーション方法は 3.1 項と同様である。

まず Type B と Type C の結果を比較する。Fig. 8 において Type C の方が同じ押下力に対して得られたセンサ応答は大きかった (3N 印加時で約 1.9 倍)。同様に、Fig. 9 に示されるように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る。押下初期 (押下深さ 0.5 ~ 1.5 mm の区間) での応答の傾きは約 1.2 倍増加していた。すなわち、MRE 層が厚いほどセンサの感度が高かった。また、シミュレーションによる Type B と Type C の結果からも感度に対する変化を確認できた。しかしながら、Type C のシミュレーション結果は実測値と大きく異なっている。

Fig. 8 および 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る。しかしその一方で、Type A を用いた場合、押下量が小さい領域では出力変化が小さいものとなった。Type B と比較すると、押下初期での応答の傾きは約 0.37 倍に減少する結果となった。

以上の結果より、MRE 層と支持エラストマ層の厚みに応じて、力や深度に対する感度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 節に示した実験で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センサ実機による実験では、提案するセンサが押下力と押下深さに対して単調増加もしくは単調減少の二次曲線的なセンサ応答を見せることを確認した。Fig. 6 より、センサ実機では押下に際してヒステリシスが見られた。このヒステリシスの原因としてエラストマ自体の粘性に加え、MRE の変形に伴った磁場変化による力場の変化も考えられる。原因を明らかにする

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 elastomer	Thickness of magnetorheological elastomer
Type A	10 mm	2 mm
Type B	5 mm	2 mm
Type C	5 mm	4 mm

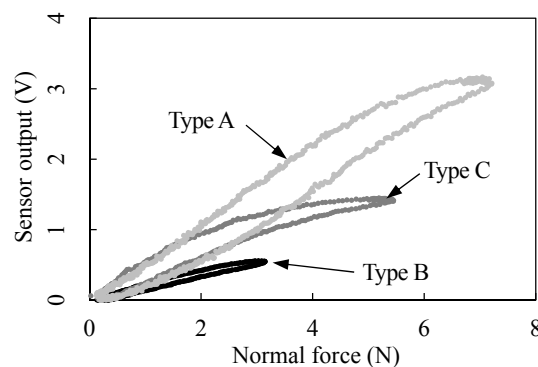


Fig. 8 Comparison of sensor output changes against the applied force between the three types of sensors.

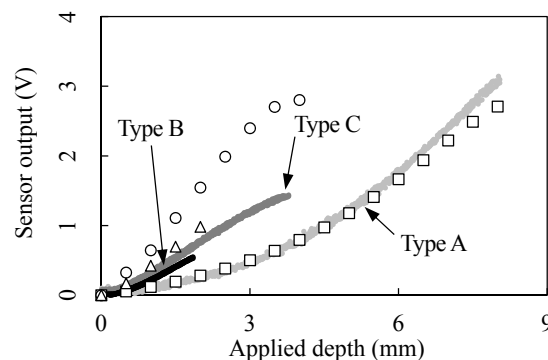


Fig. 9 Comparison of sensor output changes against the depth of each sensor surface between the three types of sensors. White squares, triangles, and circles indicate simulated value of type A, type B, and type C sensor, respectively.

ためには、エラストマの弾性率や押下の速度を変えた様々な条件で試験結果を比較する必要がある。

Fig. 7 では、MRE の比透磁率を 2 より低い 1.5 とした場合にシミュレーション値と実測値がよく一致する結果を得た。この原因の一つとして、エラストマ中の磁性粒子の分布の違いにより、文献[11]で測定された MRE と本研究で用いた MRE の透磁率が異なった可能性が挙げられる。そのため、磁性粒子配合の均質化と比透磁率の測定が今後の課題である。その他の原因には、微小鉄粉を内包する MRE を一様な透磁率を持つ

物体として扱ったこと、またセンサ応答は MRE 表面の 3 次元的な形状変化に影響を受けるにも関わらず今回は 2 次元でシミュレーションを行ったことなどが挙げられる。以上の課題を解決することで、より正確にセンサ応答をシミュレートできると考えられる。

次に、異なるエラストマを用いた実験では、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。シミュレーション値と実測値は厳密には一致していないが、これは先述した現状のシミュレーションでの問題点によるものと考えられる。特に Type C のシミュレーション結果は実測値と大きく異なる結果であった。これは、先述した原因の中でも MRE を一様な透磁率を持つ物体として扱ったことが主な原因と考えられる。今回、MRE 中の鉄粉を均一分布させるための処理は行っていないため、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、MRE を厚くした場合はより下面に鉄粉が集中し、その箇所の透磁率が非常に高くなる。この影響を確かめるため MRE を上下で透磁率の異なる二層構造として解析したところ、その結果が実機応答に近づくことを確認できた。より正確な議論のために今後さらなる検証が必要である。

以上より本研究で得た結果をまとめると次の通りとなる。(1)変形に対する感度を高めたい場合には MRE 層を厚くすればよく、今回の場合、MRE 層の厚みが 2 倍になると押下深さの感度は約 1.2 倍となった。(2)もしくは支持エラストマ層を薄くすればよいが、測定可能な変形範囲は当然限られてしまう。(3)逆に支持エラストマ層が厚いほど小さな変形に対する感度が低下し、今回の場合、層の厚みが 2 倍になると押下深さの感度は約 0.37 倍に減少した。すなわち、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ことや異物感を与える大きさの固形物を内包させる必要がなく、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量の測定が可能であり、押下力の印加もしくは除去の状態が分かれば押下力も推定できることが示された。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、感度や測定範囲を調整できることを確認した。

今後の課題として、磁石とセンサの位置関係を変えた場合や、押下力を加える位置や圧子の大きさを変えた場合を含めたさらなる条件下での定量的評価と解析、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化を行う。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (JP24000012, JP15K18006, JP15J00671) および科学技術人材育成費補助金 テンユアトラック普及・定着事業の補助を受けたものである。また、大阪大学大学院工学研究科 宮坂史和准教授にご助言頂いたことに対し、ここに記して謝意を表す。

事務局記入(20??年??月??日受付)

参考文献

- [1] 國吉康夫ら, “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 *et al.*, “Development of the Tactile Sensor System of a Human-Interactive Robot “RI-MAN,”” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 24, no. 2, pp. 505–512, 2008.
- [3] 吉海智晃ら, “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] 長久保晶彦ら, “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 *et al.*, “A Flexible and Robust Large Scale Capacitive Tactile System for Robots,” *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 10, pp. 3910–3917, 2010.
- [6] R. S. Dahiya *et al.*, “Tactile Sensing—From Humans to Humanoids,” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 26, no. 1, pp. 1–20, 2010.
- [7] K. Hosoda *et al.*, “Anthropomorphic Robotics Soft Fingertip with Randomly Distributed Receptors,” *J. Robot. Auton. Syst.*, vol. 54, no. 2, pp. 104–109, 2006.
- [8] T. Minato *et al.*, “CB²: A Child Robot with Biomimetic Body for Cognitive Developmental Robotics,” in *Proc. of 7th IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*, pp. 557–562, 2007.
- [9] M. Goka *et al.*, “A Magnetic Type Tactile Sensor by GMR elements and inductors,” in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. (IROS)*, pp. 885–890, 2010.
- [10] 堀井隆斗ら, “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講演論文集, 1P1-X08, 2014.
- [11] 加嶋俊大, “磁性流体および磁性エラストマーを用いたソフトアクチュエータの研究,” 博士論文, 2013.