

磁性エラストマと平面コイルを用いた インダクタンス測定に基づく柔軟触覚センサの開発

A flexible tactile sensor using a magnetorheological elastomer and spiral inductor based on inductance measurement

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

This paper describes a flexible tactile sensor using a magnetorheological elastomer and spiral inductor based on inductance measurement. The proposed sensor can measure the force applied on its surface by monitoring the inductance of the spiral inductor, which is covered with a nonmagnetic and magnetorheological elastomer. We investigated the sensor response when metallic materials approach to the sensor surface because metallic materials can change the response without contact. We also investigated how much such an effect was shielded by different magnetorheological elastomer. The results show that the inductance decreased when metallic materials approach and the extent of the inductance change can be reduced by increasing the mass of iron powder.

Keywords: tactile sensor, flexible sensor, magnetorheological elastomer, spiral inductor, inductance measurement

事務局記入(20??年??月??日受付)

1 はじめに

触覚情報は、未知なる環境下やヒトと共存する空間において動作するロボットにとって重要である。これまでも数多くの触覚センサが開発されてきたが[1-4], ロボットへの応用に関して耐久性や高感度化, メンテナンスの複雑さなど様々な技術的課題が残る。これらの課題に対し, 筆者らは磁性エラストマを用いた柔軟触覚センサを提案してきた[5-7]。提案センサは, プリント基板に配線で実装されたコイル上に, 非磁性と磁性のエラストマをこの順で積層した構造である。鉄粉を含有する磁性エラストマが接触力によってコイルに近づくと, 磁芯としての磁性エラストマの作用が高まるためコイルのインダクタンスが増加する。提案センサは, このインダクタンス変化を検出することで接触力を推定できる。

提案センサは柔軟層中に配線や電気素子を含まず, また表面変形を感知可能であり, さらに構造が単純であるため, 上記の課題の解決に資するものである。しかし, 動作原理より金属の接近に対して反応する可能性があり, その影響が大きい場合には金属への接触を

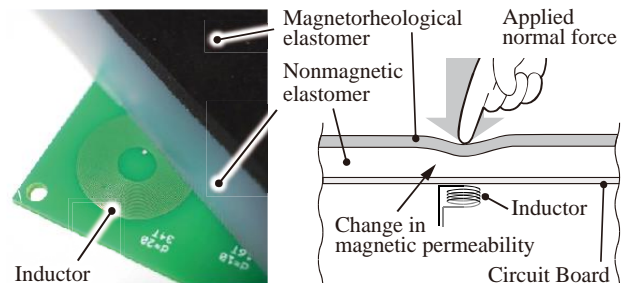


Fig. 1 Appearance and schematic of the proposed sensor. A dual-layer elastomer, which consists of a magnetorheological and nonmagnetic elastomer, is laminated on the board holding a spiral inductor (modified from [6]).

正確に検知できない。一方, 提案センサの接触層最表面にある磁性エラストマには, 外部の金属による影響を軽減する磁気シールドとしての機能も期待できる。なぜなら透磁率の高い磁性粒子を含む磁性エラストマは, コイルが作る磁束の接触層外部への流出を妨げるためである。従って, 磁性エラストマの厚みや鉄粉含有比を増やすことで金属接近の影響を軽減できると推察される。

そこで本研究では提案センサへの金属接近の影響を測定した。また, 厚みや鉄粉含有量が異なる複数の磁性エラストマを用いて, 金属接近の影響がどのように変化するかを実機実験で確認した。本研究で得られた結果は次の通りである: (1) センサに金属を接近させた場合, インダクタンスは押下力を与えた場合とは逆に単調減少する。(2)このインダクタンスの減少値は

磁性エラストマ層に含有させた鉄粉の量で抑制することが可能であり、この抑制の効果は鉄粉の量が多いほど比例的に高まる。

2 提案センサ[6]

Fig. 1 に提案触覚センサの外観と構造を示す。センサは2層構造のエラストマの下に平面コイルを置いた構造である。2層構造エラストマは、磁性エラストマと非磁性エラストマを積層したものである。磁性エラストマ (Magneto-rheological elastomer : MRE) は、シリコーンゴムなどの弾性材料へ高い透磁率を示す磁性粒子を混ぜ込んだ磁気応答性機能材料である。

エラストマ表面へ接触力が与えられると磁性エラストマがコイルに近づく (Fig. 1 右)。ここで、磁性エラストマは透磁率の高い粒子を含有しているためコイルのコアとして機能する。従って、磁性エラストマの接近に応じてコイルのインダクタンスが増減する。このインダクタンス変化を測定することで、エラストマ表面に与えられた接触力を推定できる。

Fig.2 に製作したセンサを示す。エラストマのサイズは幅 150 mm, 奥行き 150 mm, 高さ 12 mm (うち上層 2 mm が磁性エラストマ) である。エラストマは、Dragon skin 社の Ecoflex30 を用いて製作した。磁性エラストマには粒子径 300 μm の鉄粉を体積比 20 % で含有させた。エラストマの直下に厚みが 1.6 mm のプリント基板を配置した。平面コイルはこの基板両面にパターン配線で描いた2層のスパイラルコイルである。配線幅と配線間幅は 0.1 mm とした。コイルの外径は 20mm とし、巻き数は両面合計で 64 ターンとした。製作したコイルの無負荷時のインダクタンスは 51.372 μH であった。

3 実験

センサを Fig.3 に示す実験装置に取り付け、3 軸ステージ (IAI 製 TTA-C3-WA-30-25-10) に取り付けた圧子でセンサに接触力を与えたときのセンサ応答を測定した。圧子はプラスチック製で直径 10 mm の円柱形状である。圧子がセンサに与えた接触力はフォーストルクセンサ (BL オートテック製 Mini2/10-A ; 以下, F/T センサ) で測定した。F/T センサの出力はアナログデジタル変換器 (CONTEC 製 AI-1664LAX-USB) を、またセンサのインダクタンスはインダクタンスデジタル変換 IC (Texas Instruments 製 LDC1614) を介して取得した。

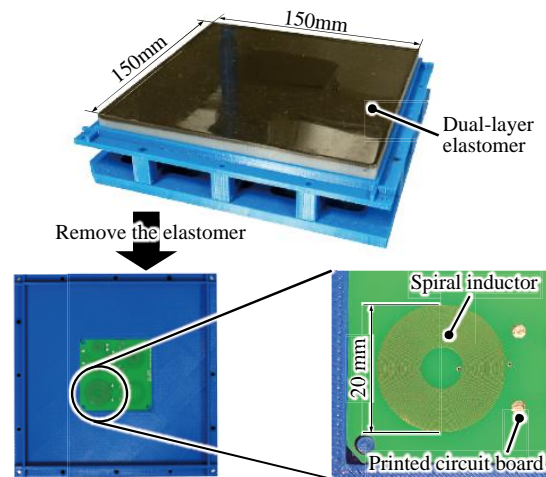


Fig. 2 Appearance of a fabricated proposed sensor. A dual layer elastomer, which consists of a magnetorheological and nonmagnetic elastomers, is laminated on a spiral inductor implemented onto surface of a printed circuit board.

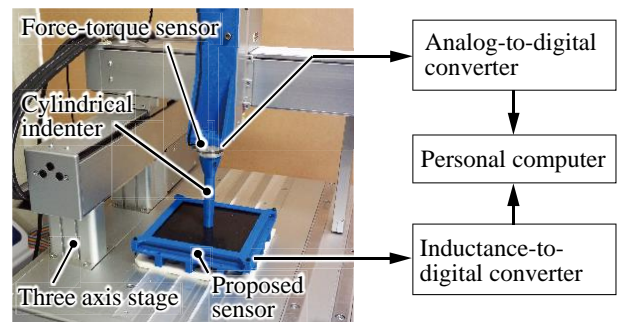


Fig. 3 Experimental setup for investigating the sensor response. The proposed sensor is mounted onto a three-axis robot stage. The stage holds a plastic cylindrical indenter with a force-torque sensor. A personal computer captures the inductance of the sensor via an inductance-to-digital converter (modified from [6]).

3.1 押込力と押込深さに対するインダクタンス変化

はじめに、提案センサに与えた押込力に対するインダクタンスの変化を測定した[6]。圧子中心がコイル中心と一致する位置で、圧子をエラストマ表面から深さ 6 mm (エラストマ厚みの半分) まで押し下げる測定を 10 回繰り返した。

Fig.4 に押込力に対するインダクタンスの変化を示す。実線と拡大図中の黒点が 10 回平均の平均値、灰色の領域が 10 試行での標準偏差 2σ を表し、矢印は接触力を印加・除荷した方向を示している。図より、インダクタンス値は与えた接触力に対して単調増加するが、ヒステリシス性を示した。

測定ノイズの評価のため、測定したインダクタンスの最大の分散と信号ノイズ比 (SNR) を算出した。分散の最大値は $7.609 \times 10^{-7} \mu\text{H}^2$ であり、SNR は 53.85 dB

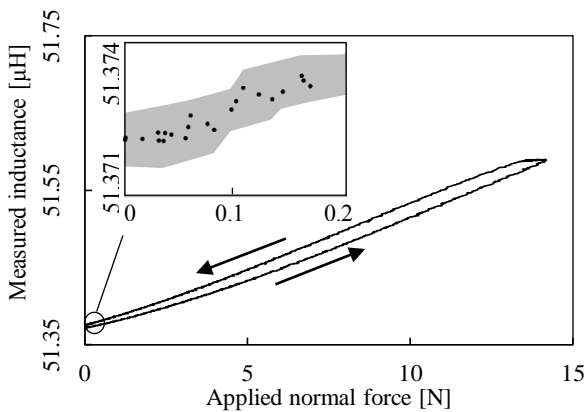


Fig. 4 Measured inductance versus the applied normal force. The solid line and dots indicate the mean value of the inductance, and the arrows depict the direction of the applied loads. The shaded region denotes twice the standard deviation (2σ) of the inductance (modified from [6]).

であった。また、センサの測定レンジに比較して非常に小さな 2σ の領域は、10 試行間でのインダクタンス値が極めて再現性良く変化していることを示している。

3.2 金属の接近に対するインダクタンスの変化

金属の接近によるインダクタンスへの影響を確認するために、圧子の代わりに金属ブロックを3軸ステージへ取り付け、金属ブロックにはアルミニウム (A5052)、鉄 (SS400) およびステンレス鋼 (SUS304) を用いた。大きさはいずれも $30 \times 30 \times 30$ mm とした。このブロックを平面コイルの中心とブロックの中心が一致する位置において、基板表面を $z=0$ mm としたときブロック底面が $z=15$ から $z=45$ mm の高さとなるよう上下させ、各ブロックで5回測定を行った。

Fig.5 に3種類の金属ブロックを接近させた時のインダクタンス変化を示す。実線が5回平均の平均値を示している。図より、インダクタンスは金属の接近に応じて単調減少しヒステリシスは非常に小さいことを確認した。インダクタンスの減少値は金属によってわずかに異なったが、ほぼ同様であった。

3.3 異なる磁性エラストマでの金属接近の影響変化

磁性エラストマは透磁率の高い鉄粉を含有するため、センサへの金属接近の影響を弱める磁気シールドとして機能すると考えられる。そこで、磁性エラストマの厚みと鉄粉含有比を変更し金属を接近させた時のインダクタンスを測定した。実験に用いた9種のエラストマを Table 1 に示す。タイプ A~E は鉄粉含有比を体積

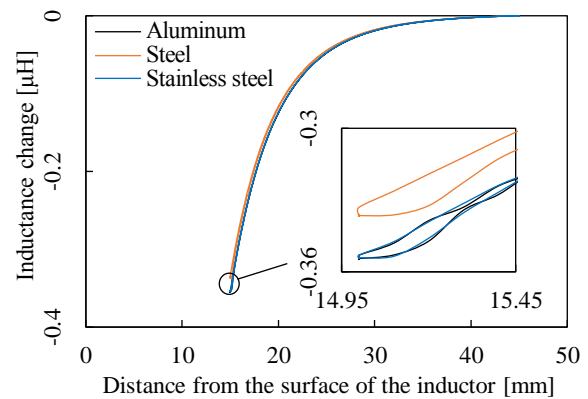


Fig. 5 Measured inductance change versus the distance from the inductor. The solid line indicates the mean value of the inductance across 5 trials.

Table 1 Parameters of the elastomers.

Elastomer type	Thickness of the MRE layer [mm]	Volume ratio of iron powder [%]	Mass of iron powder [g]
A	1	20	12.2
B	2	20	24.4
C	3	20	36.6
D	4	20	48.8
E	5	20	61.0
F	2	10	12.2
G	2	30	36.6
H	2	40	48.8
I	2	50	61.0

比 20 % で固定し磁性エラストマの厚みを 1 mm 毎に変えたものである。一方で、タイプ F~I は磁性エラストマの厚みを 2 mm で固定し鉄粉含有比を 10 % 毎に変えたものである。すべてのエラストマにおいて非磁性エラストマの厚みは 10 mm で固定した。なお、3.1 と 3.2 節で用いたエラストマはタイプ B である。

これら 9 種類のエラストマと 3 種の金属ブロックを用い、3.2 節と同様の手順でインダクタンスを測定した。各測定でのインダクタンスの最大減少値を求め、各エラストマ間で比較した。Fig.6 にアルミニウムを用いた場合の各エラストマにおけるインダクタンスの最大減少値を示す。横軸は、各エラストマに含まれている鉄粉の質量である。磁性エラストマの厚み・鉄粉含有比が増すほどインダクタンスの減少値が軽減していることがわかる。紙面の都合上、アルミニウムを用いた場合の結果のみを図に示しているが、いずれのエラストマと金属ブロック用いた場合にも Fig.6 と同様にインダクタンスの減少値が軽減されることを確認した。結果をまとめると次のようになる：(1)インダクタンス

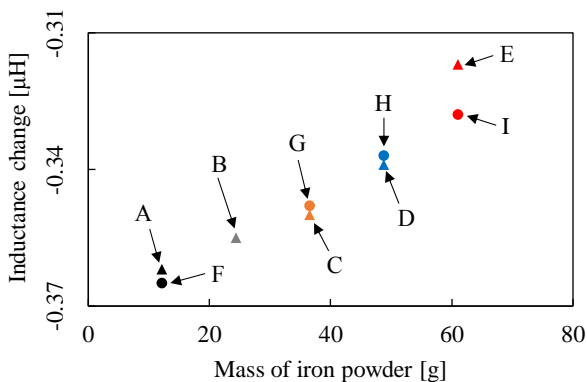


Fig. 6 Maximum inductance change obtained with the nine different elastomers and the aluminum block. The characters indicate the type of the elastomer.

の最大減少値は磁性エラストマの厚みが増すほど小さくなり 1mm と 5mm でのインダクタンスの減少値の比をみると、アルミニウムで 0.876 倍、鉄で 0.882 倍、ステンレスで 0.854 倍にそれぞれ減少値が軽減した。

(2) 同じ厚みの磁性エラストマであっても鉄粉含有比が大きいほど減少値が少なくなり 10% と 50% でのインダクタンスの減少値の比をみると、アルミニウムで 0.899 倍、鉄で 0.919 倍、ステンレスで 0.918 倍にそれぞれ減少値が軽減した。

4 議論

提案センサに金属ブロックを近づけた場合、インダクタンスが減少することが確かめられた。これは金属ブロックに渦電流が流れたことが原因として挙げられる[8]。ブロックに流れる渦電流はコイルが作る磁場を打ち消す方向に生じるため、その結果インダクタンスの減少が生じる。またこの渦電流の発生量はブロックとコイルの接近に応じて増加するため、インダクタンスの減少値もブロックとコイルの距離が近づくにつれ増大する。金属の種類によってインダクタンスの減少値が異なるのは、渦電流の発生量が材料の物性により異なるためであると考えられる。

磁性エラストマの厚みと鉄粉含有率が異なるエラストマを用いた実験の結果、厚みと鉄粉含有比を増加させると金属の接近によるインダクタンスの減少値が軽減されることを確認した。一方で Fig.6 からはこの軽減量が磁性エラストマの含有させた鉄粉の質量にほぼ比例していることがわかる。すなわち、磁性エラストマの厚み・鉄粉含有比が異なる場合でも、含有させた鉄粉の質量が同じであればほぼ同様の軽減量を示して

いる (Table 1 よりタイプ H と D は厚みと含有比が異なるが鉄粉の質量はともに 48.8 g である)。これらの結果から、金属接近による影響を軽減するためには磁性エラストマの鉄粉量を増やすことが重要であり、同じ質量の鉄粉を含有していれば磁性エラストマの厚みは影響の軽減に寄与しないことがわかった。

5 結論

提案する磁性エラストマと平面コイルを用いたインダクタンス測定に基づく柔軟な触覚センサに対して、金属が接近した場合のセンサ応答への影響を測定した。金属の接近が近づくにつれコイルインダクタンスが減少することを確認し、この減少値を磁性エラストマに含有させる鉄粉量で軽減可能なことを確認した。

今後の課題として、磁性エラストマの構成を工夫することで金属接近の影響をより低減させることが可能かをさらに検討していくことが挙げられる。

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ニューアトラック普及・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] B. D. Argall and A. G. Billard, "Survey of Tactile Human-Robot Interactions," *Robotics Auton. Syst.*, vol.58, no.10, pp.1159-1176, 2010, APA
- [2] R. S. Dahiya, *et al.*, "Directions Toward Effective Utilization of Tactile Skin: A Review," *IEEE Sens. J.*, vol.13, no.11, pp.4121-4138, 2013.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 川節ら, "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.
- [6] T. Kawasetsu, *et al.*, "Size dependency in sensor response of a flexible tactile sensor based on inductance measurement," *IEEE Sensors Conf. 2017*, accepted.
- [7] 川節ら, "磁性エラストマを用いた柔軟な 3 軸力覚センサ," 第 35 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, vol.DVD-ROM, 2017.
- [8] Texas Instruments, "LDC1614 データシート," <http://www.ti.com/jp/lit/gpn/ldc1614>