

# 磁性エラストマーを利用した磁気式触覚センサ

## A Magnetic Type Tactile Sensor using Magnetorheological Elastomers

堀井 隆斗 (阪大) 長井 志江 (阪大) 正 浅田 稔 (阪大)

Takato Horii, Osaka University, takato.horii@ams.eng.osaka-u.ac.jp  
Yukie Nagai, Osaka University  
Asada Minoru, Osaka University

In recent years, robots which have flexible tactile sensors to contact with a human and environment have been studied. However, these sensors face problems that the flexible material is unstable and the dead zone emerges by damage of interactions. On the other hands, a magnetic-type tactile sensor can cope with the problems by mechanically separating sensing elements from the contact layer. We propose a new magnetic-type tactile sensor which replaces the contact layer by magnetorheological elastomers. An advantage of this sensor over existing ones is that it does not need to include permanent magnets in the contact layer. This feature enables us to develop a whole-body tactile sensor since we do not need to consider the position of magnets and a curvature of the frame. This paper reports our prototype sensors and experiments to examine the reaction profile of the sensors.

**Key Words:** Tactile Sensor, Magnetorheological Elastomer

### 1 はじめに

様々な環境や人との柔軟な接触インタラクションを目的として、外装の一部または全身を覆う触覚センサを備えたロボットが多く研究されている [1]。特に人との接触や全身運動に注目した研究では、ロボット自身の柔軟性の向上や、人の触覚知覚能力を模したセンサを構築するために、外装にエラストマーやゴムなどの柔軟な素材が多く用いられている [2][3]。

Minato et al.[4] はウレタン製の基礎に PVDF フィルムとシリコンを積層することで人型ロボットの全身を覆う触覚センサを開発し、ロボットの全身運動と触覚センサの相関関係から体性感覚マップの構築を行なっている。また Takamuku et al.[5] は、二種類の硬度のシリコンに歪センサと PVDF フィルムを混合することで、人の皮膚を模した柔軟触覚センサをロボットハンドに実装し、対象物体を繰り返し把持することによって物体識別を行なっている。これらの研究では外界とのインタラクションにおける触覚情報を積極的に利用するために、ロボットの外装に直接センサを内包し、あるいはセンサと外装部が直接接触するような構造を利用している。そのため素材の経年変化やインタラクションに伴う摩擦によって外装素材の変形や劣化、また内包しているセンサの断線による検出能力の低下や不感帯の発生が問題となっている。

一方で伍賀ら [6] は磁場の変化を用いた磁気式の触覚センサについて提案している。伍賀らの磁気式触覚センサでは外界との接触層に永久磁石を内包したエラストマーを用いることで、接触層の変形する過程で生じる磁束密度の変化をインダクタや巨大磁気抵抗効果 (GMR: Giant Magnet Resistive effect) を用いた GMR 素子を用いて検出している。永久磁石を用いることで、柔軟な接触層とセンサ本体であるインダクタや GMR 素子の実装された基板層を機械的に分離することに成功している。しかし提案されている触覚センサでは、接触層の接触力分布を均一に保つことができるように形状を設計する必要があり、曲面での利用が困難である。また永久磁石とセンサ素子との位置を均一に保つ必要があり、さらに複数の永久磁石を内包しなくてはならないためにコストの面でも全身を覆う触覚センサの構築には問題があると考えられる。

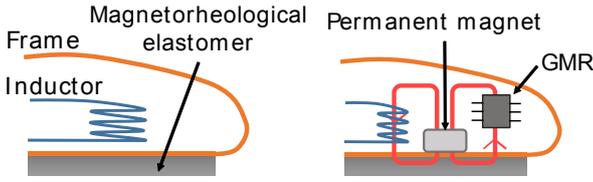
そこで本研究では、外界との接触部に磁気応答性機能性材料である磁性エラストマーを利用した磁気式触覚センサを提案する。提案モデルでは接触層に磁性エラストマーを利用することで、伍賀らの磁気式触覚センサのように接触層に永久磁石を内包すること無く、接触の検出を行うことが可能となる。そのため、接触層をロボットの形状に応じて自由に設計でき、また接触層の交換に伴う永久磁石の消費を抑えることが可能になると考えられる。本稿では磁性エラストマーとインダクタを用いたタイプの磁気式触覚センサと、基板層に永久磁石を持ち、インダクタと GMR 素子を用いるタイプの触覚センサについて提案を行う。また提案モデルについて試作を行い、触覚センサの圧力応答を定性的に評価した結果について報告する。

### 2 磁性エラストマー

磁性エラストマーとはシリコンやゴムなどの柔軟素材に、微小な磁性粒子を含有させることで磁場応答性を付加した磁気応答性機能性材料である [7]。例えば磁性エラストマーに外部から均一磁場を印加した場合、エラストマーに含有されている磁性粒子が磁場の影響を受けることで、エラストマーの弾性率を変化させることができる。さらに勾配のある磁場を印加することによって、磁場の変化に応じた伸縮運動や回転運動を発生させることも可能である。磁性エラストマーは磁性流体と比較して任意の形に成形することが可能であり、ソフトアクチュエータや振動制御材料としての利用が期待されている [8]。また Du et al.[9] はピエゾ抵抗によって構成される抵抗網を持つ薄いシリコン膜に磁性エラストマーを付加することで、磁界強度を計測するための微小なセンサを構築している。

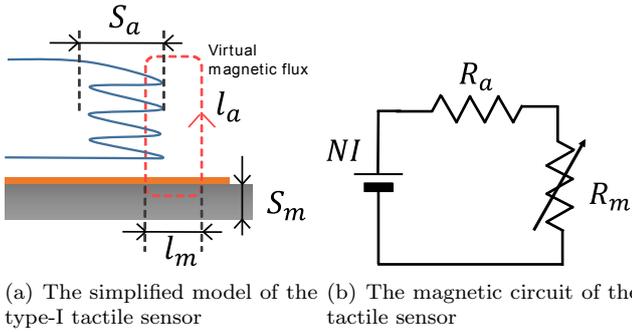
### 3 磁性エラストマーを利用した触覚センサ

本研究では、磁気応答性機能性材料である磁性エラストマーを外界との接触層に用いた磁気式触覚センサを提案する。提案する磁気式触覚センサは、ロボットの骨格内に含まれる永久磁石の有無とセンサとして利用する素子の違いによってそれぞれ図 1(a) と図 1(b) の二種類に分けることができる。本章ではそれぞれの触覚センサの構造と試作したセンサについて述べる。



(a) Type-I: using inductors as sensing elements (b) Type-II: using inductors and GMRs as sensing elements

**Fig.1** The structure of magnetic type tactile sensors using magnetorheological elastomers



(a) The simplified model of the type-I tactile sensor (b) The magnetic circuit of the tactile sensor

**Fig.2** The simplified model and the magnetic circuit

### 3.1 提案モデル 1：永久磁石を用いない磁気式触覚センサ

図 1(a) にセンサ素子としてインダクタを用いた磁気式触覚センサの構造を示す。このタイプの磁気式触覚センサは、磁性エラストマーとインダクタのみを用いて構成することができるために、非常に安価に製造することが可能である。また接触部に永久磁石を内包した磁気式触覚センサと比較して、破損した接触層を交換する際に磁石の位置合わせ等を必要とせず、容易に交換が可能である。

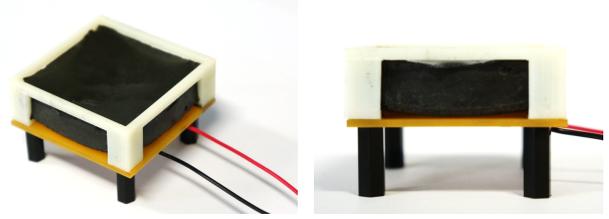
#### 3.1.1 動作原理

磁性エラストマーは磁性粒子を含有しているために、通常のエラストマーと比較して透磁率が非常に大きいという特徴がある。そこで提案モデルでは、ロボットの骨格内部にインダクタを配置し、接触部である磁性エラストマーが外力によって変形した際のインダクタンスの変化を計測することによって接触を検知する。このモデルでは、インダクタの周辺に仮想的な磁束の分布を想定することで、磁性エラストマーと空気中の磁気抵抗を想定した磁気等価回路として表現することができる。図 2(a) に磁性エラストマーとインダクタのみを用いた提案磁気式触覚センサの簡易モデルを、図 2(b) に磁気等価回路を示す。図中の  $S_m$ 、 $l_m$  は磁性エラストマーの断面積と磁路長、 $S_a$  と  $l_a$  はインダクタの断面積と骨格内部における空気中の磁路長である。この磁気回路において、インダクタンスは磁性エラストマーと骨格内部の磁気抵抗をそれぞれ  $R_m$ 、 $R_a$  とすることで、式 (1) のように表すことができる。

$$L = \frac{N}{R_m + R_a} = \frac{N}{\frac{l_m}{\mu_m S_m} + \frac{l_a}{\mu_0 S_a}} \quad (1)$$

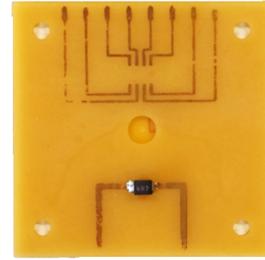
$N$  はインダクタの巻数、 $\mu_0$  と  $\mu_m$  はそれぞれ真空透磁率と磁性エラストマーの透磁率を表している。

ここで外力によって磁性エラストマーの断面積が  $S_m$  から  $S_m'$  (ただし  $S_m > S_m'$ ) へと変化した場合、断面積の減少に伴い磁気抵抗が増加することが分かる。また磁気抵抗の増加によって、



(a) Isometric view (b) Side view

**Fig.3** The outside of prototype tactile sensors



**Fig.4** A prototype circuit of the tactile sensor using an inductor

インダクタンス  $L$  が式 (2) のように  $L'$  へと変化する。

$$L \rightarrow L' = \frac{N}{\frac{l_m}{\mu_m S_m'} + \frac{l_a}{\mu_0 S_a}} \quad (L > L') \quad (2)$$

このインダクタンスの変化を計測することによって、触覚センサに加えられた外力の検出や推定を行う。

#### 3.1.2 試作

センサ素子としてインダクタを用いた磁気式触覚センサについて試作を行った。図 3 に試作した触覚センサの外観を示す。全体の大きさは幅 45mm、奥行き 45mm、高さ 30mm で、接触層には厚さ 15mm の磁性エラストマーを用いた。磁性エラストマーは Smooth-On 社製の Dragon skin に、粒子径  $2\mu\text{m}$  の鉄粒子を体積比 20% で含有させることで作製した。

図 4 に基板層の外観を示す。センサにはインダクタのみを利用しており、非常に簡素なものになっていることが分かる。

### 3.2 提案モデル 2：骨格内に永久磁石を持つ磁気式触覚センサ

図 1(b) に永久磁石を骨格内部に持ち、センサ素子としてインダクタと GMR を用いた磁気式触覚センサの構造を示す。こちらのモデルでは、永久磁石を用いることで定常的な磁束を得ることができる。基板層では、圧力が加えられることによって磁性エラストマーに生じる変形を、磁界強度の変化として GMR で検出する。また磁性エラストマーの変形による磁束密度の変化をインダクタによって誘導起電力として計測することで、センサに加えらるる滑りを検出することができると考えられる。

#### 3.2.1 試作

提案モデル 2 についても提案モデル 1 と同様に試作を行った。外観は図 3 と同じである。図 5 に試作した基板層を示す。基板層そのものは提案モデル 1 と同じ物を利用している。こちらのモデルでは基板層の中心に直径 5mm の永久磁石を配置している。ま

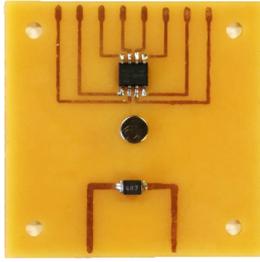


Fig.5 A prototype circuit of the tactile sensor using an inductor and a GMR.

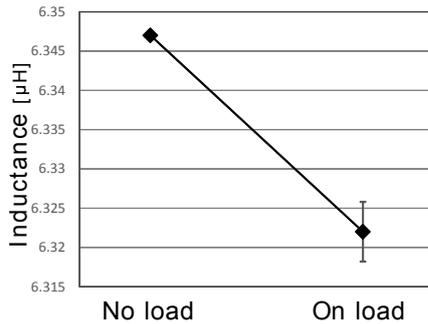


Fig.6 The experimental result of load tests for the type-I tactile sensor

た永久磁石の中心から 10mm 上部に GMR を、10mm 下部にインダクタを配置している。

#### 4 評価実験

インダクタをセンサ素子として用いた磁気式触覚センサについて評価実験を行った。今回は実験設備の関係上、圧力を印加した際のセンサの挙動に対する定性的評価実験のみを行なっている。試作した触覚センサの中心部に直径 15mm の円柱を用いて約 10N の圧力を加えた際の、インダクタンスの変化を計測した。ただし接触層の磁性エラストマーの厚みは 2mm のものを使用した。図 6 に評価実験の結果を示す。負荷を加えることによって磁性エラストマーの形状が変化し、計測されるインダクタンスに変化が生じていることが分かる。今回提案モデル 2 については評価実験を行っていないが、こちらも同様に GMR の出力電圧を計測することで外力を検出できると考えられる。また磁性エラストマーの振動や滑りは、インダクタから誘導起電力として検出できると考えられる。

外力推定を行うためには、センサの圧力-インダクタンス特性を取得する必要がある。ただし、磁性エラストマーの断面積変化は非線形であると考えられるため、実装するサイズ、形状に応じて実験的に応答特性を測定する必要がある。近年、粒子法と有限要素法を用いた連成解析による磁性エラストマーの数値解析手法が提案されており [10]、本研究の磁気式触覚センサにおいても、この手法を用いて解析を行うことが有効であると考えられる。

#### 5 おわりに

本稿では外界との接触部に磁性エラストマーを用いた磁気式触覚センサの提案を行った。基板層に永久磁石を配置しないモデル

において、触覚センサの動作原理について述べ、試作機に圧力を印加した際のセンサの挙動について定性的評価を行った。またロボットの骨格内部に永久磁石を内包した触覚センサを提案し、試作を行った。

今後の課題として、提案したそれぞれのモデルの性能を定量的に評価、解析する必要がある。さらにエラストマーを硬化させる際に磁場を印加することで、磁場勾配を持つ磁性エラストマーを構築することが可能である。今回のモデルでは単純に鉄粒子を含有させた磁性エラストマーを利用したが、磁場勾配を持つ磁性エラストマーを利用することで永久磁石を用いることなく、GMR 素子やインダクタによって接触力や滑りを検出できる可能性が考えられる。今後はこのようなモデルについても検証を行いたい。

#### 謝辞

本研究の遂行にあたり、科学研究補助金（課題番号 24000012, 24119003, 24650083）の補助を受けた。

#### References

- [1] B. D Argall and A. G Billard. A survey of tactile human-robot interactions. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 58, No. 10, pp. 1159-1176, 2010.
- [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 Transactions on Robotics*, Vol. 24, No. 2, pp. 505-512, 2008.
- [3] 國吉, 大村, 寺田, 長久保. 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.
- [4] 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. IEEE, 2007.
- [5] S. Takamuku, A. Fukuda, and K. Hosoda. Repetitive grasping with anthropomorphic skin-covered hand enables robust haptic recognition. In *Proc. of IEEE/RSJ 2008 International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3212-3217. IEEE, 2008.
- [6] 伍賀, 中本, 武縄, 貴田. 磁気式触覚センサの小型化と性能評価 (機械力学, 計測, 自動制御). *日本機械学会論文集. C 編*, Vol. 76, No. 772, pp. 3640-3647, 2010.
- [7] Z. Varga, G. Filipcsei, and M. Zrínyi. Magnetic field sensitive functional elastomers with tuneable elastic modulus. *Polymer*, Vol. 47, No. 1, pp. 227-233, 2006.
- [8] S. Kashima, F. Miyasaka, and K. Hirata. Novel soft actuator using magnetorheological elastomer. *Magnetics, IEEE Transactions on*, Vol. 48, No. 4, pp. 1649-1652, 2012.
- [9] G. Du and X. Chen. Mems magnetometer based on magnetorheological elastomer. *Measurement*, Vol. 45, No. 1, pp. 54-58, 2012.
- [10] S. Kashima, G. Yoshikawa, F. Miyasaka, K. Hirata, and S. Mura. Coupled analysis of particle method and finite element method for magnetorheological elastomers. In *Proc. of 15th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, p. 61. IEEE, 2012.