

Difference of Gaussian 様空間応答を示す 磁気式柔軟触覚センサ

○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)

1. はじめに

ロボットが人間共存空間や未知環境において適切に動作するためには、外界との接触を広範囲に検知できる全身触覚を持つことが重要である。一方、接触時の安全を保つためには、ロボットの表面は柔軟な素材で覆われるのが望ましい。これまでも、この両者の要求を満たすために数多くの柔軟触覚センサが開発されてきた [1-6]。しかしながら、センサ感度の向上や高密度化、膨大な量となる配線の扱い、長期間の変形に対する耐久性を始めとする様々な技術的困難により、ロボットへの全身実装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柔軟触覚センサの統一形は未だ存在しない。

著者らは、このような従来の柔軟触覚センサが抱える課題の解決を目指し、磁性エラストマを接触層に用いた磁気式柔軟触覚センサを提案してきた [7-9]。提案センサは、(1) 接触層の表面の変位を検知する方式のため変形に対して高感度であり、(2) 柔軟接触層にセンサ素子や配線を内包していないため構造的に耐久性が高く、(3) 柔軟層の交換に際しても厳密な位置合わせが不要という特徴を有する。

先行研究において著者らは、磁場シミュレーションと実機実験を通じて、提案センサの出力値に基づいて垂直方向に加えられた接触力と深さ方向の変位を推定可能なことを示してきた。ただし、センサ表面のある一点を中心とする円領域に接触力を与える場合でしかセンサ出力を計測しておらず、異なる位置に接触力を加えた場合のセンサ応答については計測していなかった。今後、センサ応答から接触位置の推定などを行うためには、提案センサが空間的にどのような応答分布を持つかを調べる必要がある。

そこで、本研究では提案する触覚センサの空間応答を実機試験によって明らかにした。実験結果より提案センサは、正負両極性の空間応答を示すことを確認した。また、この空間応答は Difference of Gaussian 関数で良好に近似できることを示した。

2. 磁気式柔軟触覚センサの概要

2.1 構造と検出原理

図 1 に筆者らが提案した磁気式柔軟触覚センサの構造を示す。提案センサは、磁性および非磁性の二種類の低剛性エラストマを積層した二層構造のエラストマ、磁石、および磁気センサで構成される。図のように、提案センサはエラストマ中にセンサ素子や配線を内包しておらず、機械的に柔軟層とロボット筐体を分離できる構造である。

磁性エラストマ (Magnetorheological elastomer, 以下 MR エラストマ) はシリコーンゴムなどの柔軟素材

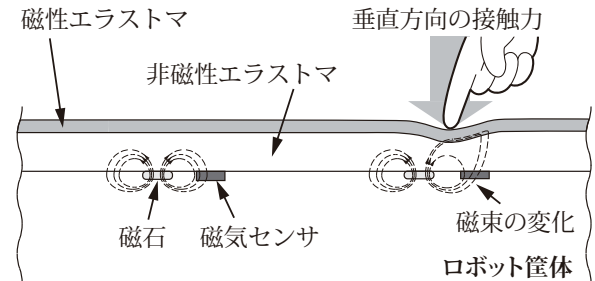


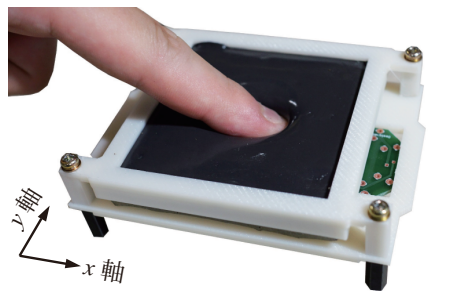
図 1 提案センサの構造と動作原理。提案センサは磁性および非磁性の二種類の低剛性エラストマを積層した二層構造エラストマ、磁石、磁気センサから構成される。接触力が増えれば磁性エラストマ層が磁気センサに近接し、その結果磁気センサを貫く磁束が変化する。

中に、鉄粉などの高透磁率を示す磁性粒子を含有させた磁気応答性材料である。提案センサの接触層となる柔軟素材は、この MR エラストマと非磁性かつ低剛性のエラストマ (以下、支持エラストマと呼ぶ) を層状に積層し、二層構造としたものである。

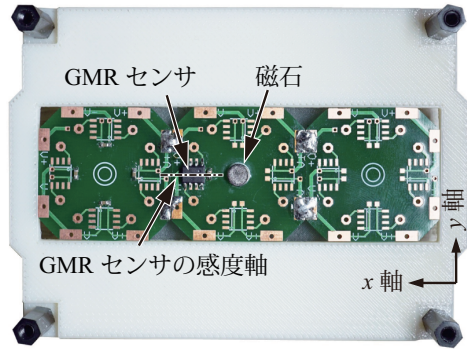
図 1 に示すように、磁石から生じた磁束は二層構造のエラストマと磁気センサを貫くような分布となる。ここでエラストマに接触力が与えられていない場合、一定量の磁束が磁気センサで検出される (図 1 左側)。図 1 右側のように垂直方向の接触力が加えられた場合、二層構造のエラストマがその力に応じて変形し、MR エラストマ層が磁石および磁気センサに近づく。MR エラストマは高透磁率を示す磁性粒子を含有しているため、MR エラストマの変形に応じて磁気センサ直上での透磁率が増加する。その結果、接触力を与えた付近において磁束分布が変化し、磁気センサを貫く磁束が変化する。このように、二層構造エラストマの垂直方向への変形を、磁気センサを貫く磁束の変化として検出することによって、垂直方向の接触力および深さ方向の変位を測定できる。

2.2 センサ実機

前述の構造と動作原理に従った触覚センサを作成した。センサ実機の外観を図 2 に示す。二層構造エラストマの大きさは、幅 75mm、奥行き 75mm、高さ 12mm であり、そのうち上面 2mm が MR エラストマ層である。両エラストマは白金を触媒とする付加重合により硬化するシリコーン (Smooth-on 社製 Dragon-Skin FX Pro) に可塑剤を配合して作成した。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弾性なエラストマとした。MR エラストマには、このエラストマ素材に粒子径 2 μ m のカルボ



(a) センサ表面



(b) センサ裏面

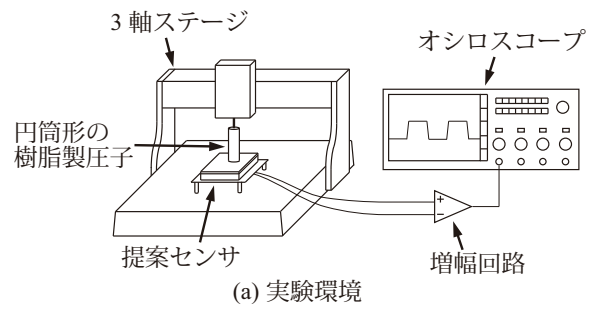
図2 提案センサの外観。(a) センサ押下時の表面の外観。プリント基板上に二層構造エラストマを設置している。(b) センサ裏面の外観。磁石と GMR センサはプリント基板上に配置されている。今後の大規模実装を見越して多数の磁石と GMR センサを実装可能な基板としているが、今回はそれぞれ一つずつのみ実装した。磁石は二層構造エラストマの中心位置に、GMR センサは磁石から 10mm 離れた位置に実装した。

ニル鉄粉 (BASF 社製ハードグレード HQ) を体積比 20% で含有させた。

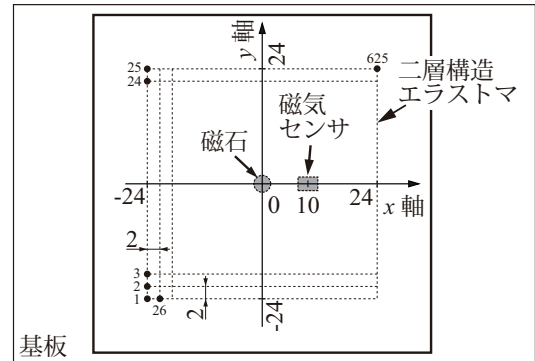
二層構造エラストマを支えるプリント基板下面には、ネオジム磁石 (直径 5mm, 高さ 1.5mm の円柱形状, 表面磁束 0.2[T]) と、巨大磁気抵抗センサ (NVE 社製 AA003-02E, 以下 GMR センサ) を配置した。このプリント基板は、多数の磁石と GMR センサが実装できるようになっており、今後これらのペアを大規模実装可能なように設計した。ただし、今回の実験ではまず 1 ペアの場合での空間応答を評価するために、磁石と GMR センサをそれぞれ一つずつのみ実装している。ネオジム磁石は基板中心、すなわち二層構造エラストマの中心となる位置に配置した。GMR センサはネオジム磁石から 10mm 離れた同一平面上に実装し、GMR センサの感度軸は磁石に向かう方向とした (図 2(b))。

3. 実験

センサ実機を用いて、深さ方向への変位に対する提案センサの空間応答を測定した。図 3(a) に実験環境を示す。提案センサを 3 軸ステージ (オリジナルマインド社製, KitMill RD300) 上に実装し、3 軸ステージに円柱形状の樹脂製圧子 (直径 10mm) を取り付けた。この圧子を $x-y$ 平面上の異なる位置に移動させ、ある一定の深さまで押し込んだ場合のセンサ応答を取得した。センサ応答は 1 段の差動増幅器 (増幅率: 200) を



(a) 実験環境



(b) 測定位置

図3 空間応答の測定環境。(a) 実験環境。提案センサを 3 軸ステージ上に設置し、円筒形の樹脂製圧子 (直径 10mm) でセンサ表面の異なる位置を押下した。センサ出力は増幅回路を介してオシロスコープで測定した。(b) センサ出力の測定位置。図中、黒点がセンサを押下した位置である。 $(x, y) = (-24, -24)$ から $(24, 24)$ まで 2mm ずつ、図中黒丸のインデックス (1, 2, ..., 625) に従って圧子を移動させセンサを押下した。

介して、オシロスコープ (Tektronix 社製, DPO4034) で測定した。

今回、センサ応答を測定した範囲を図 3(b) に示す。図中、黒点がセンサを押下した位置である。 $-24 \leq x \leq 24$ および $-24 \leq y \leq 24$ の範囲で、2mm ずつ圧子を移動させながら随時センサ応答を測定した。圧子を移動させた順番は図中の黒丸横のインデックス (1, 2, ..., 625) に示す通りである。なお、磁石中心は $(x, y) = (0, 0)$ であり、GMR センサ中心は $(10, 0)$ である。

各測定点で、圧子を 5mm 押し込んだ際に得られた空間応答を図 4(a) に示す。図中のカラーバーが各測定点でのセンサ応答 $V(x, y)$ [V] の値を示している。測定は 5 回行い、その平均値を表示している。全測定位置における分散は最大値で 0.00233 [V²] であった。

まず、提案センサは磁石と GMR センサの中間位置である $0 \leq x \leq 4$ および $-2 \leq y \leq 2$ の範囲で正のピーク値を示し、このピーク位置を中心に距離が離れるに従って応答が小さくなる傾向を持つことが分かった。次に、それよりさらに離れた位置では応答が一旦 0 になった後、負方向のセンサ出力が得られていることがわかる。またさらに磁石と GMR センサから離れると、センサ応答は負のピーク値に達し、その後緩やかに応答が 0 に戻る傾向が見られる。以上のように、提案

センサは正負両極性の空間応答を持つことがわかった。

このようにして得られた空間応答を、正負両極性の応答を持つ関数の一種である Difference of Gaussian 関数（以下、DoG 関数）を用いて近似した。DoG 関数は、次式に示すように二つの二次元ガウス関数 $G(x, y)$ の差分で表される。

$$\begin{aligned} V_{model}(x, y) &= k_1 G_1(x, y) - k_2 G_2(x, y) \\ &= k_1 \frac{1}{2\pi\sigma_1^2} \exp\left(-\frac{(x-x_o)^2 + (y-y_o)^2}{2\sigma_1^2}\right) \\ &\quad - k_2 \frac{1}{2\pi\sigma_2^2} \exp\left(-\frac{(x-x_o)^2 + (y-y_o)^2}{2\sigma_2^2}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $V_{model}(x, y)$ は位置 (x, y) におけるセンサ出力を、 x_o, y_o はそれぞれのガウス関数の中心位置を示し、 k_1, k_2 は比例定数、 σ_1^2, σ_2^2 は分散を示す。最小二乗法によって DoG 関数と実測データのフィッティングを行った所、各パラメータは $x_o = 1.70$, $y_o = -0.228$, $k_1 = 322$, $\sigma_1 = 7.15$, $k_2 = 317$, $\sigma_2 = 14.6$ となった。

フィッティングによって得られた DoG 関数を図 4(b) に示す。(a) と同様に、図中のカラーバーが各位置でのセンサ応答 $V_{model}(x, y)$ [V] の値を示している。実測値とモデル値を比較しても、同様の傾向を持つ空間応答を再現できていることがわかる。応答の中心は実測値では $0 \leq x \leq 4$ および $-2 \leq y \leq 2$ の範囲内であったのに対し、最小二乗法でフィッティングしたモデルでは $(1.70, -0.228)$ であった。

図 4(c) および (d) は、 $y = 0$ における x 軸方向のラインプロファイルと $x = 0$ における y 軸方向のラインプロファイルをそれぞれ示している。図中、実線が実測値であり、破線が DoG 関数によるモデル値である。両者の図からも、DoG 関数で提案センサの空間応答を良好に近似できていることがわかる。

4. 考察と議論

異なる位置でセンサを押下した実験から、提案センサが正負両極性の応答を示す空間応答を持つことが分かった。正のピークとなる位置は $(1.70, -0.228)$ であり、その点を中心した同心円状に応答が正から負、負から 0 へと変化する様子が見られた。

深さ方向の接触力を提案センサに与えると、二層構造エラストマが変形して、MR エラストマ層が基板に近づく。このとき磁石が作る磁束の分布は、接触位置付近に集中し、その他の領域で疎になると考えられる。そのため、実測データからもわかるように、磁石と GMR センサ付近を押下した際は GMR センサ付近で接触前に比べて磁束が密になるため、正のセンサ応答を見せる。ただし、その応答がピークとなる位置は GMR センサ中心 $(10, 0)$ でも磁石中心 $(0, 0)$ でもないことが分かった。応答のピーク位置は磁石の範囲内であり、かつ GMR センサ配置側となっている。今後、このピーク位置が磁石の強さや GMR センサ配置に依存するかを検証する必要がある。

一方、磁石と GMR センサから離れた領域に接触力を加えた場合は、その位置において磁束分布が密とな

り、その周囲、すなわち GMR センサ付近では分布が疎になる。従って、接触前に GMR センサを貫いていた磁束が減少することとなり、負の応答を示すと考えられる。また、さらにそれより離れた位置に接触力を与えた場合、磁石との距離が大きいために接触力による変形が磁束分布に与える影響が小さくなり、応答は 0 に収束すると考えられる。以上のように提案センサの動作原理によって、このような特殊な空間応答を得ているといえる。

実験で得た空間応答をモデル化する一つの関数として、ここでは Difference of Gaussian 関数を採用した。図 4 での比較からも、DoG 関数は提案センサの空間応答を良好に近似している。まず、 y 軸方向のラインプロファイル（図 4(d)）上で実測値と近似した DoG 関数を比較すると、応答の形状をほぼ近似できていることがわかる。一方、 x 軸方向のラインプロファイル（図 4(c)）上で比較すると、実測値の幅が近似した DoG 関数の幅より大きいことがわかる。すなわち、空間応答が x 軸方向に広がった楕円形のような応答であるといえ、これは図 4(a) から確認できる。ただし、今回の実験では圧子の移動幅を 2mm としているため、より正確に議論するためにはさらに圧子を細かく移動させ、密に空間応答を測定する必要がある。また、今回は単純な DoG 関数でセンサ応答のモデル化を行ったが、応答が楕円形である場合、正確にセンサ応答をモデル化するために DoG 関数に変数を追加するなどして、この応答形状を詳細に模擬できるような工夫が必要である。

提案センサで得られた DoG 様の空間応答は、深さ方向の変位およびその変位を加えた空間位置に応じて、GMR センサを貫く磁束が増減することで引き起こされる。このような磁束の変化は、磁石と GMR センサ間の距離、磁石が持つ磁束密度の強度、GMR センサの感度軸方向、支持エラストマ層の厚みなどといったパラメータに依存すると考えられる。そのためこれらパラメータの組み合わせによっては、負応答のない単なるガウス関数のような応答や、より負応答を強調した空間応答を作り出せる可能性がある。今後の課題の一つは、これらのパラメータを変えた際にどのように空間応答が変化するかを調べ、任意の空間応答を作るための設計指針を導出することである。

今回、フィッティングに用いた DoG 関数は、画像処理分野においてエッジ強調フィルタの一種として広く知られている。そのため、提案する触覚センサをカメラのようにアレイ状に配置しその応答を取得した際、エッジ強調画像のような接触位置のエッジを強調する応答を得ることができるかもしれない。ソフトウェア的な処理によってこれを実現するのではなく、ハードウェア的に瞬時にエッジ強調処理が行えることは、処理装置の負担を軽減する意味でも意義深いといえる。触覚センサをロボットの全身など大規模に実装する際に生じる大きな課題は、それらから取得される膨大な触覚情報の処理である。提案センサはセンサ構成要素のパラメータを変えることで、何らかの情報を抽出するフィルタのような空間応答を作り出せる可能性を有している。このように触覚センサ自体を、触覚情報を前処理するデバイスとして設計・構築することは、今後膨大な触覚情報を効率的に扱うにあたって有効な一つのア

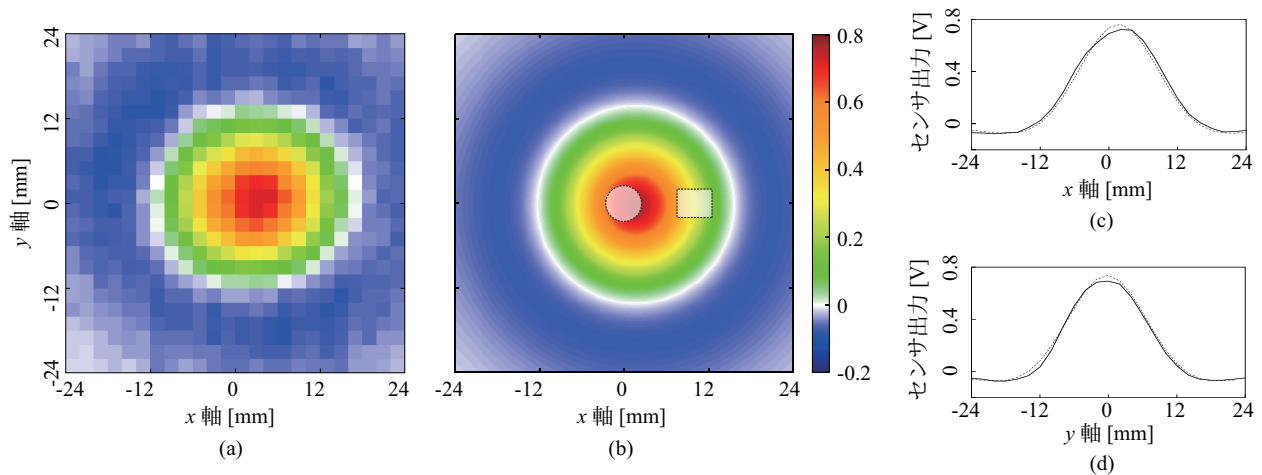


図4 提案センサの空間応答. (a) センサ実機から得られた実測データ. $-24 \leq x \leq 24$ および $-24 \leq y \leq 24$ の範囲で 2mm 毎に圧子を移動させ、各点で 5mm 押下した際の応答. カラーバーが各位置でのセンサ応答の値 $V(x, y)[V]$ を示している. $(x, y) = (0, 0)$ が磁石中心であり, $(10, 0)$ が GMR センサ中心である. これら二つの素子近辺にて深さ方向の変位に対して正の応答を示し, それらから離れた領域では負の応答を示している. (b) Difference of Gaussian 関数のフィッティングによる空間応答モデル. 最小二乗法にて実測データとフィッティングした結果を示している. 図中の半透明の丸と四角の領域が, 磁石と GMR センサにそれぞれ対応する. (c) $y = 0$ における x 軸方向のラインプロファイル. (d) $x = 0$ における y 軸方向のラインプロファイル. 実線が実測データを, 破線がモデルの応答をそれぞれ示している.

アプローチになり得るだろう.

5. まとめ

本研究では, 提案する磁気式柔軟触覚センサが Difference of Gaussian 様の空間応答を持つことを明らかにした. すなわち提案センサは, 磁石と GMR センサの中間位置にて正のピーク値を持ち, それら両者から離れると応答が一旦負になった後, 0 に戻るような空間応答を持つ. この応答を Difference of Gaussian 関数をモデルとして最小二乗法にてフィッティングした所, 良好に近似できることを確認した.

今後は, 測定点を密にしてより正確な空間応答を測定し, より精緻なモデルを構築する. また空間応答は圧子の直径や形状などに応じて変化する可能性があるため, これを確認する必要がある. 提案センサをアレイ状に配置し大規模実装も行う予定である. また提案センサが持つ特徴的な空間応答の設計指針を導出し, そのフィルタのような応答の触覚情報処理に対する活用方法を検討したい.

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. また, 奈良高専専攻科 菅田唯仁君に実験データ取得に際して協力頂いたことに対し, ここに記して謝意を表す.

参考文献

[1] R. S. Dahiya, G. Metta, M. Valle, and G. Sandini:

“Tactile sensing – from humans to humanoids”, IEEE Trans. Robot., vol. 26, no. 1, pp. 1-20, 2010.
 [2] P. Maiolino, M. Maggiali, G. Cannata, G. Metta, and L. Natale: “A flexible and robust large scale capacitive tactile system for robots”, IEEE Sensors J., vol. 13, no. 10, pp. 3910-3917, 2010.
 [3] K. Hosoda, Y. Tada, and M. Asada: “Anthropomorphic robotics soft fingertip with randomly distributed receptors”, J. Robotics and Autonomous Systems, vol. 54, pp. 104-109, 2006.
 [4] M. Goka, H. Nakamoto, and S. Takenawa: “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] L. Jamone, L. Natale, G. Metta, and G. Sandini: “Highly sensitive soft tactile sensors for an anthropomorphic robotic hand”, IEEE Sensors J., vol. 15, no. 8, pp. 4226-4233, 2015.
 [6] 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.
 [7] 川節拓実, 堀井隆斗, 石原尚, 浅田稔: “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”, MAGDA コンファレンス in Tohoku 講演論文集, pp.251-256, 2015.
 [8] 川節拓実, 堀井隆斗, 石原尚, 浅田稔: “磁性エラストマを用いた磁気式触覚センサの特性評価”, 第 16 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, Vol.USB, 2015.
 [9] T. Kawasetsu, T. Horii, H. Ishihara, and M. Asada: “Towards rich physical human-robot interaction: A novel magnetic-type flexible tactile sensor that detects its surface deformation”, in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA) Workshop on Human-Robot Interfaces for Enhanced Physical Interactions, 2016.