



# MR 流体を用いたセルフセンシング可能な 触覚デバイスの提案

上村 宙<sup>1)</sup>, 湯村 翼<sup>1)</sup>

1) 北海道情報大学 情報メディア学部 (〒069-8585 北海道江別市西野幌 59-2, s2321083@s.do-johodai.ac.jp)

**概要:** 従来の触覚デバイスは出力性能に特化したものが多く、入力には追加センサを要するという課題があった。本研究では、MR 流体と電磁石を用いたデバイスにより多様な硬さ表現を可能にすると同時に、流体の移動に伴う磁場変化を利用した入力機能を検討した。これにより、追加センサを排した単一機構で入出力統合を実現し、感触を得ながら操作する双方向インタラクションを可能にする。

**キーワード:** MR 流体, 触覚デバイス, セルフセンシング

## 1. はじめに

VR や AR システムにおいて、物理的な感触を提示する触覚提示機能は、提示情報のリアリティ向上および精緻なタスク遂行を実現するための重要な要素である。特に、仮想オブジェクトの硬さや粘弾性などの物理特性を動的に変化させて提示する技術は、多様な物性を再現する上で不可欠な要素である。

既存の触覚デバイスの多くはアクチュエーションによる出力性能に主眼を置いて設計されている。そのため、ユーザによる変形や押し込み量を計測するためには、ロードセルや変位センサといった独立した計測器を別途付加する構成が一般的である。このような設計は、デバイスの物理的体積の増大や配線の複雑化を招き、追加センサの介在によってアクチュエータ本来の機械的特性が変化する要因ともなる。

本研究では、印加磁場に応じて見かけ上の粘度が変化する MR (Magneto-Rheological: 磁気粘性) 流体に着目する。本デバイスは、電磁石と MR 流体を組み合わせることで、硬さを提示する出力機能とユーザの操作を読み取るセルフセンシング機能の双方を単一の機構で実現する。セルフセンシングは、流体の移動に伴う磁気回路の特性変化を計測するものであり、追加センサを排した入出力統合型触覚インタフェースとして提案する。

## 2. 関連研究

MR 流体は、外部磁場の強度に応じて数ミリ秒で液体から半固体へと変化する特性を持つ [1] これまでにも、キータッチ制御 [2] や靴底に配置して歩行感触を提示

するウェアラブルデバイス [3] など、多様な触覚インタフェースに応用されてきた。しかしながら、これらのシステムでは、ユーザからの入力を計測するために、ロードセルや光学式トラッカーなどの独立したセンサを必要としている。

アクチュエータそのものをセンサとして利用するセルフセンシング技術は、振動アクチュエータや圧電素子などで研究されてきた [4, 5]。これは、コイルの逆起電力や静電容量の変化などを計測し、外部センサなしに変位や力を推定する手法である。本研究は、MR 流体の移動に伴う磁束の変化を利用することで、セルフセンシングの概念を MR 流体を用いた触覚インタフェースに応用する。これにより、入力用の独立したセンサが必要となるという課題を解決し、柔軟な硬さ提示と操作入力を単一機構で実現する。

## 3. 提案手法

本研究で提案するデバイスは、ビニールパウチに封入された MR 流体と、その下部に配置された一つの電磁石および制御用の回路とマイクロコンピュータによって構成される (図 1)。ユーザはこのパウチ部分を押し込むことで触覚的なインタラクションを行う。

デバイスの出力機能は、電磁石のコイルに安定化電源から直流電流を印加し、パウチ内の MR 流体に磁場を作用させることで実現される。磁場強度が高まるのに従い、MR 流体内の強磁性粒子が鎖状クラスタを形成して流体の降伏応力が増加するため、ユーザに剛性感が提示される。印加する電圧・電流を制御することで硬さを動的に

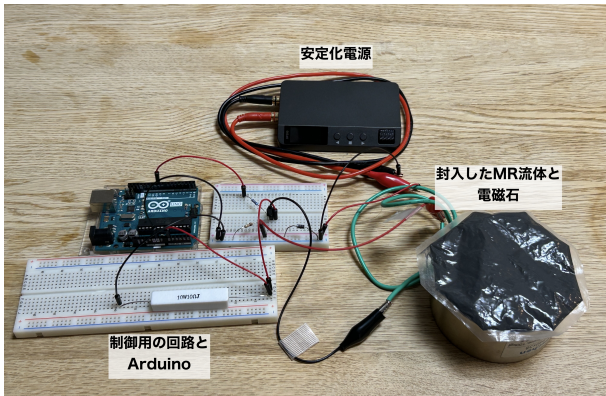


図1 提案デバイスのプロトタイプ

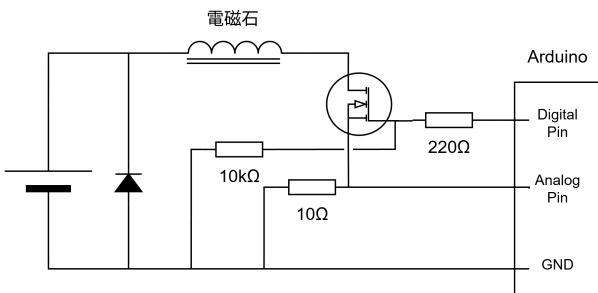


図2 プロトタイプの回路図

提示可能であり、電流を遮断すれば元の柔らかい液体の感触になる。

入力機能であるセルフセンシングは、ユーザの操作によって MR 流体内の強磁性粒子が移動し、それに伴い磁気回路内の磁束密度が変化する電磁誘導現象を利用する。特定の磁界を印加した状態でパウチが押し込まれると、内部の MR 流体の分布変化により微小な誘導起電力が発生する。この電圧スパイクをサンプリングすることで、外部センサを追加することなく、流体の変形に基づいた操作入力の検知を実現する。

#### 4. 実装

提案手法を検証するため、電磁石の上部にナイロン製の MR 流体パウチを配置したプロトタイプを作製した (図 1)。計測および制御回路の全体構成を図 2 に示す。本システムは、安定化電源とマイクロコントローラ (Arduino) を用いて構築した。

図 2 に示すように、電磁石に  $10\ \Omega$  の抵抗を直列に接続し、安定化電源から  $5\text{V}$  の電圧を印加した。また、電磁石の下流側には MOSFET を配置し、そのゲートを Arduino のデジタル出力ピンに接続した構成とした。本回路構成により、マイクロコントローラから電磁石に流れる電流を制御することが可能となる。セルフセンシ

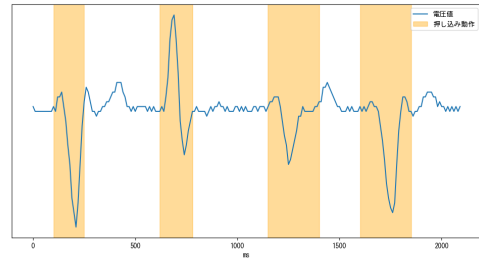


図3 ユーザの押し込み操作に伴う電圧の推移と動作区間の比較

グの入力取得のために、 $10\ \Omega$  のセメント抵抗と電磁石の中間点の電圧を、Arduino のアナログ入力ピンに接続した。約  $10\text{ms}$  間隔でサンプリングを実行し、シリアル通信を介して PC 上で電圧変動の波形を記録するシステムとした。また、電源のオンオフ時や急激な押し込み時に発生する高い逆起電力からマイクロコントローラを保護するため、電磁石に対して並列に還流ダイオードを接続し、Arduino の GND と安定化電源の GND を共通化した。

#### 5. 動作検証

提案デバイスにおける入出力統合の基本原理が機能することを確認するため、作成したプロトタイプを用いた予備的な動作検証を行った。本検証では、電磁石に安定化電源から  $5\text{V} \cdot 350\text{mA}$  の定常電圧を印加して MR 流体を硬化させた状態で、ユーザが指でパウチを押し込む動作を行った際の電圧波形を観察した。図 3 の青線は Arduino で取得した中間ノードの電圧値を、オレンジの網掛け部分はカメラ映像の解析によって特定した実際の押し込み動作の区間を表している。グラフより、ユーザの押し込み動作の開始および終了に同期して、定常電圧を基準とした鋭いスパイク状の電圧変化が発生していることが分かる。これにより、外部センサを用いることなく、単一のコイルで硬さの提示と操作入力の検知を同時に行えることが確認された。

#### 6. 議論

本研究で提案したセルフセンシング機構は、部品点数の削減やデバイスの小型化に寄与する一方で、今後の実用化や拡張に向けていくつかの課題が確認された。

本手法は電磁誘導による微小な電圧変化を読み取るため、環境ノイズや電源ノイズの影響を受けやすく、誤検出の原因となり得る。これを防ぐためには、ハードウェア的なフィルタ回路やソフトウェア的なノイズ除去処理

の実装が必要である。また、より強い硬さを提示するために印加電圧を高く設定した場合、定常電圧に対する誘導起電力の割合が小さくなり、入力信号が埋もれてしまう問題がある。これに対しては、分圧回路の抵抗値の最適化や、微小信号を抽出・増幅する回路の導入などが求められる。

さらに、本手法は MR 流体の物理的な移動に伴う磁束変化を検知原理としているため、デバイス表面に軽く触れる程度の接触では信号が発生せず、入力として検知できない。明確な信号を得るためには、パウチを变形させ流体を押し流す程度の一定以上の操作が必要となる。この特性は、軽微な接触検知が求められる用途には本手法が不向きであることを示している。今後は、パウチの柔軟性向上などの構造的工夫により、操作量の閾値を下げることが求められる。また、より微小なインダクタンス変化を捉える高感度な計測回路の設計も重要な課題となる。

また、現在の単一セル構造では、押し込まれたというイベントとその強度は検知できるが、パウチのどの位置を押したかという空間的な情報の検出はできない。これを解決し、平面ディスプレイのように面全体で触覚を提示・検知するデバイスへ展開するには、電磁石と MR 流体パウチのアレイ化が必要となる。しかし、電磁石の小型化は出力可能な磁場の低下を招き、磁場を維持しようとすれば電磁石が大型化して空間解像度が低下するというトレードオフが存在する。適切な解像度と出力性能のバランスを見出すことが今後の設計課題となる。

## 7. おわりに

本研究では、MR 流体と電磁石を用いることで、多様な硬さ提示と変形検知を単一の機構で実現するセルフセンシング可能な触覚デバイスを提案し、その基本原理の実装と検証を行った。動作検証により、追加の変位センサ等を用いることなく、感触を提示しながらユーザの操作入力を電圧変化として取得できることが確認された。今後は、取得される電圧信号と物理的な変位量・操作力との定量的な関係性の評価を行うとともに、ノイズ耐性の向上や本機構のアレイ化による多点インタラクションの実現を目指す。今後の展望として、電圧波形のピーク値や変化量と、物理的な変位量や操作力の関係を分析し、精度の高いセンシングモデルの構築を目指す。また、複数の電磁石を配置するアレイ構造を開発し、平面上での多点インタラクションへの拡張も行う。将来的には、検

知された入力に応じてリアルタイムに提示する硬さを制御するシステムへと発展させ、より没入感の高い触覚体験の提供を目指す。

## 参考文献

- [1] Seval Genç and Pradeep P Phulé. “Rheological properties of magnetorheological fluids”. In: *Smart Materials and Structures* 11.1 (2002), pp. 140–146.
- [2] Pei Kang, Sijia Liu, and Tao Zeng. “Magnetorheological fluid-based haptic feedback damper”. In: *Applied sciences* 14.9 (2024), p. 3697.
- [3] Tae-Heon Yang et al. “Magnetorheological fluid haptic shoes for walking in VR”. In: *IEEE transactions on haptics* 14.1 (2020), pp. 83–94.
- [4] Artem Dementyev, Alex Olwal, and Richard F Lyon. “Haptics with input: back-EMF in linear resonant actuators to enable touch, pressure and environmental awareness”. In: *Proceedings of the 33rd annual ACM symposium on user interface software and technology*. 2020, pp. 420–429.
- [5] Jeffrey J Dosch, Daniel J Inman, and Ephrahim Garcia. “A self-sensing piezoelectric actuator for collocated control”. In: *Journal of Intelligent material systems and Structures* 3.1 (1992), pp. 166–185.