

磁気粘性流体を用いた硬度が可変な触覚デバイスの開発と応用

中西裕崇^{†1} 松浦昭洋^{†1}

本研究では、磁気粘性流体 (Magneto Rheological Fluid) を用いた硬度が可変な触覚デバイスを開発し、それを用いて、硬度の変化する映像と同期して触覚の変化を体感することができるシステムの開発成果について報告する。

Development of A Haptic Device with Changeable Hardness Using Magneto-Rheological Fluid

YUTAKA NAKANISHI^{†1} AKIHIRO MATSUURA^{†1}

In this study, we developed a haptic device with changeable hardness using Magneto Rheological (MR) Fluid, and report the development results of a system that enables users to experience haptic changes in synchronization with visual images.

1. はじめに

近年、ヘッドマウントディスプレイやセンサ技術の革新に伴い、拡張現実、仮想現実、さらに現実空間と仮想空間が融合して影響し合った体験をもたらす複合現実の研究開発が活発に行われている。中でも仮想空間の中で現実空間に存在する事物を扱い、仮想的な条件設定によって、力覚情報や様々な触覚情報・物理情報を体感可能なデバイスやシステムが提案されている[1][2][3][4]。その中で、磁気粘性流体 (Magneto Rheological Fluid, 以下 MR 流体) という磁力を加えることでその粘度が変化する機能性流体を利用した研究が行われており、MR 流体に対して磁石により磁力を加えることで変化する硬さを表現するデバイスが石塚や Jansen らによって開発されている[5][6]。しかし石塚の研究では面を押す位置や圧力を用いたインタラクティブなシステムではない。また、Jansen らの開発した MudPad では、デバイスに触れた位置を検知する能力を持つ抵抗膜方式タッチパネルが組み込まれており、ユーザが触れた位置を検知し、その位置の硬さを局所的に変えたり、プロジェクションマッピングにより同期したインターフェースの操作を可能にしたりなどインタラクティブな体験は可能だが、圧力検知に関しては、別のデバイスを用いる可能であると述べられてが、設計・実装はされておらず、デモとしても、キーボードやファイルシステムのウィンドウ内を押すものに留まっている。

そこで本研究では、MR 流体を利用して、触れるユーザの指の位置と圧力を検知することのできる触覚デバイスを開発し、さらに、指で押した位置やその強さを可視化する

インタラクティブシステムの開発を行い、さらに、二種類のデモの制作を行った。

2. MR 流体

MR 流体とは、媒体となる水や油に、鉄などの磁性粒子、界面活性剤を加えた磁性をもった流体であり、磁力の強さによってその粘度を変える特性をもつ。

本研究では、磁性固形分が 88.0% という、磁性粒子の含有割合の極めて高い MR 流体を用いる。本材料を平面状に広げ、可変な磁場下に置くことで、人の触覚によって一定範囲の面の「硬さ」を提示できるように実装を行う。

3. 平面型触覚デバイス

磁力を加えることでその粘性が変化する MR 流体に、電圧制御された電磁石により磁力を加えることで硬さを制御可能な平面型触覚デバイスを開発した。その構成図を図 1 に示す。本デバイスは、上から白スクリーン、MR 流体封入部、圧力センサ、接触位置センサ、電磁石により構成されている。本デバイスにおいて、MR 流体はアクリル板とシリコンゴムで覆われた状態で面状に広げられ、指で触れることでユーザは一定の範囲の硬さを体感できる。視覚的にもディスプレイ化し、インタラクションを可能とするため、最上部には天然ゴム製の白スクリーンを設置する。指で加える力や接触位置を取得するため、シート状の圧力センサと接触位置センサも設置している。また、電磁石の磁力の制御回路部も近接して付設されている。

以下、デバイスの主要構成要素について詳述する。

^{†1} 東京電機大学
Tokyo Denki University
a) matsu@rd.dendai.ac.jp

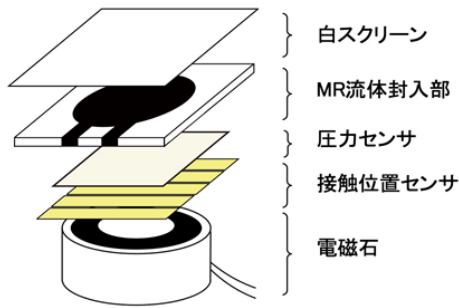


図 1 平面型触覚デバイスの構成図

Figure 1 Construction of the planar haptic device.

3.1 デバイスの主要構成要素

(1) MR 流体封入部

MR 流体封入部は、文献 [5] の 2.4 節を参考に、外形の縦横長さ 70mm×70mm、厚さ 4mm のアクリル板から直径 60mm の円形の穴（以下、円形接触部と呼ぶ）と幅 5mm の MR 流体を注入するための口を切り抜いたものを上下から厚さ 0.5mm のシリコンゴムシート 2 枚で挟み、その内部に MR 流体を約 11ml 封入して作成した。使用した MR 流体は鉄、ポリ α オレフィン、界面活性剤を成分とするシグマハイケミカル社の MR 流体 E-600 [7] であり、磁性固形分は 88.0% とした。この円形接触部の上面が触覚を提示する部分となる。実際に作成した MR 流体封入部を図 2 に示す。

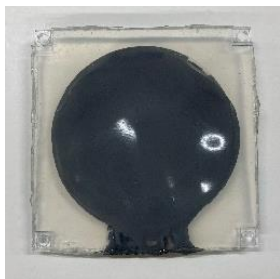


図 2 MR 流体封入部

Figure 2 MR fluid-filled part.

(2) 接触位置センサ・圧力センサ

デバイスに触れた位置を検知するために、Spectra Symbol 社の SoftPot 接触位置センサを使用した。これは位置検知が可能なセンサの長さが 50mm、幅 7mm の可変抵抗器であり、物体が触れた位置により抵抗の大きさが変わる特性をもつ。これを図 3 に示すように 5 つ等間隔に配置することで、デバイスへの接触位置を検知した。また、圧力センサとしては、Taiwan Alpha Electronic 社の MF02A-N-221-A01（感圧レンジ 30～1000g、感圧エリア 39.6×39.6mm）を使用した。本センサを接触センサの上に配置することで、面を上から加える圧力も検知する。

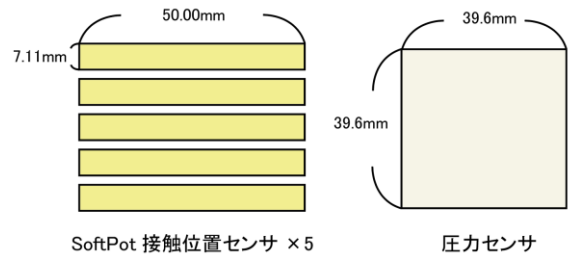


図 3 接触位置センサと圧力センサ

Figure 1 Contact point sensor and pressure sensor.

(3) 電磁石と制御回路

電磁石として、底面の直径 65mm、高さ 30mm の円柱状で、定格電圧が DC12V、吸着力が 850N のものを用いた。電磁石の発生させる磁力を可変とするため、電磁石に加える電圧を制御する制御回路を作成した。作成した回路の回路図を図 4 に示す。

電磁石に加える直流電源（出力電圧/電流 12V/8A）からの電圧制御には、Arduino を介した PWM 制御を採用した。Arduino により、デューティ比（オンとオフのパルス列の時間幅に対するオンの時間幅の割合）の 0～100% を 0～255 の 256 段階の整数に対応させて変化させることで、電圧を 0V から 12V の範囲でリアルタイム制御した。

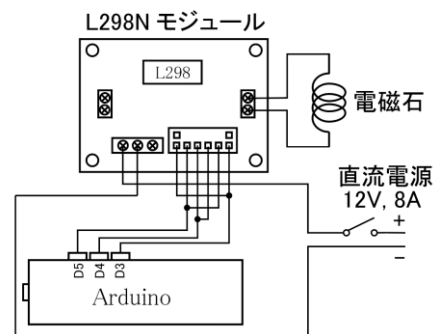


図 4 電磁石の制御回路図

Figure4 Control circuit of the electromagnet.

3.2 Arduino アプリケーション

PC による平面型触覚デバイスの制御を Arduino を介して実現した。Arduino と PC の間ではシリアル通信が行われ、平面型触覚デバイスの接触位置センサと圧力センサで検知した数値データを PC へ送信し、PC から Arduino へ電磁石の PWM 制御のための信号を送るアプリケーションを作成した。

3.3 デバイスの官能評価と性能

電磁石に加える電圧が 0～8V の範囲では、デバイスの硬さの変化を指で感じることはできず、元のままのスライムのような柔らかさであったが、10V くらいから硬さを明確に感じられるようになり、12V では粘土のような硬さを感じ

じることができた。

また、デバイスの硬さについては、電磁石による磁力の変化に瞬時に応答していた。これはMR流体が磁力の変化に非常に高い応答性（数ミリ秒単位）を示すためであると考えられる。

4. インタラクティブ可視化システム

平面型触覚デバイスの上面へのプロジェクションマッピングにより、デバイスのもつ特性を可視化しコンテンツ化するためのアプリケーションシステムを開発した。本システムは、平面型触覚デバイス、本デバイス内の電磁石やセンサ類を制御するためのArduinoを含む制御回路部、PC、プロジェクタからなる。システム概要図とその実装結果を図5、図6に示す。

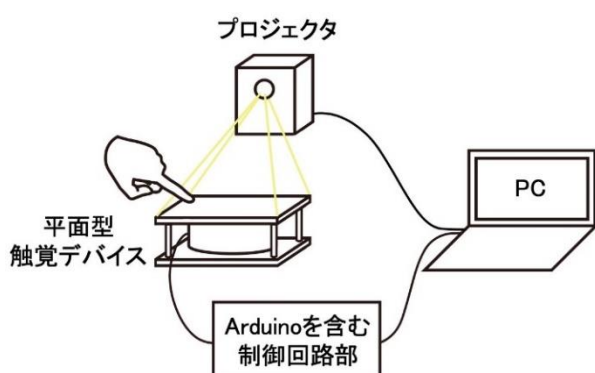


図5 システム概要図
Figure 5 System overview

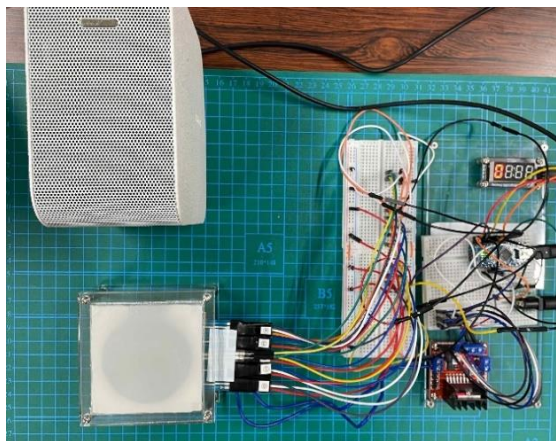


図6 システムの実装結果
Figure 6 Implementation of the system.

以下、開発したアプリケーションとそれを利用したコンテンツについて説明する。

4.1 Unity アプリケーション

Arduino を介してデバイスから受け取ったセンサ値（指

の接触位置と圧力）と指定されたデバイスの硬さに応じて映像を変化させるアプリケーションを Unity 2020.3.25f1 を用いて作成した。ただし、現状デバイスがある程度硬くすると（電圧約 10V 以上）、接触位置センサに MR 流体封入部自体の圧力が若干かかって誤動作が起こり、指で押した位置が正確に取得できない状態になっており、改善が必要である。一方で圧力については常に取得可能である。

4.2 開発したコンテンツと実行例

(1) 触れた位置から波紋が広がる対話的コンテンツ

触覚デバイスの上面のディスプレイを指で下に押すと、その場所に圧力に応じて色や出現頻度の異なる円形状の波紋が表示される。その実行中のディスプレイの画像を図7に示す。図の(a)が押す圧力が弱いときで、緑色の波紋が広がっている。(b)はより強い圧力で押したときの図であり、波紋の色が黄色に変化し、波紋の描かれる頻度も増している。なお、本コンテンツは、現状 4.1 節で述べた理由から、デバイスを硬くしていない状態でのみ動作し、本実行時は 6V であった。

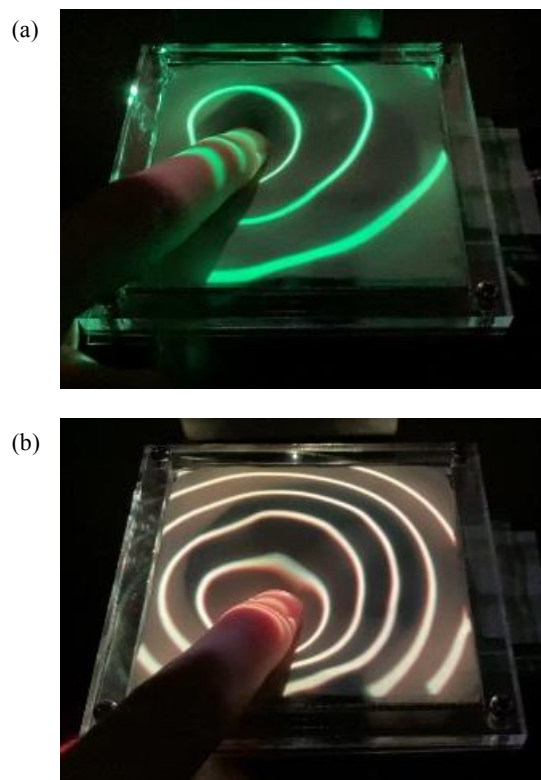


図7 (a) 弱い力と(b) 強い力押したときの波紋の様子
Figure 7 Images of wave patterns when pressed with (a) weak and (b) strong forces.

(2) 地面の硬さが変化するコンテンツ

触覚デバイスの硬さの時系列的変化に応じて、湿って柔らかい地面から乾いた硬い地面のエフェクトを時系列に投影することで、触覚デバイスの硬さの変化と映像の変化を

同期させて表現した。その実行中のディスプレイの画像を図8に示す。柔らかい地面のときの電圧は6V、硬い地面の時は12Vを電磁石に加えた。なお現状では、硬さの変化の最中に各センサからの値を取得できず、改善が必要である。

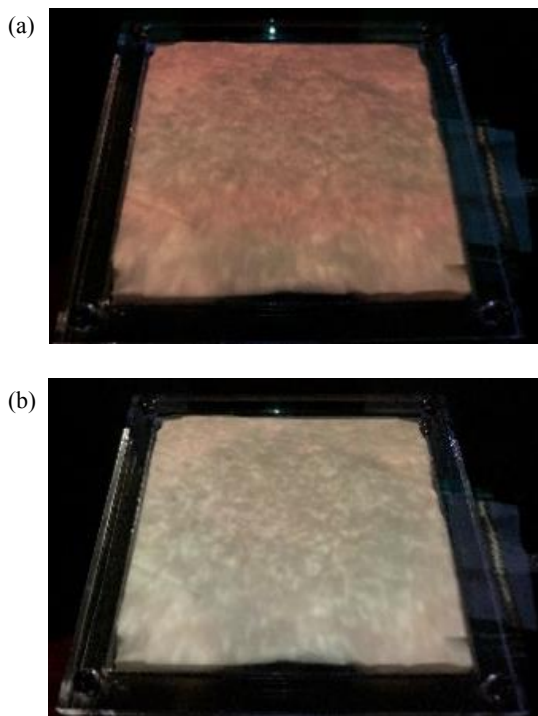


図8 (a) 柔らかい地面と(b) 硬い地面のテクスチャ
Figure 8 Texture of (a) soft ground and (b) hard ground.

5. 考察

5.1 デバイスの現状の硬さについて

現在利用しているMR流体、電磁石の磁力の変化、デバイスの構造による条件下で、提示する硬さは、スライム程度の硬さから粘土程度の硬さまでであった。明確な硬さの変化は実現はできたが、剛体のような強い剛性は感じる事ができず、リングを握りつぶすといった動作の実現には様々な改善が必要である。改善点としては、吸着力のより高い電磁石の利用や、剛性を実現するためにデバイス表面に硬い素材を敷くなどの補助的な強化を行うことなどが考えられる。

5.2 デバイスの利用方法について

今回プロジェクションマッピングを利用してデバイスの特性を可視化したが、磁力の変化に対する高い応答性から、ヘッドマウントディスプレイを利用したVRシステムやMRシステムへの利用が有望と考えられる。ただし、現状PCからArduinoへ電磁石の制御のための信号の送信に時間がかかり、電磁石の値をリアルタイムに変化することができていないことが課題である。

5.3 デバイスの構成について

MR流体封入部について、デバイスの利用回数を重ねるにつれて、接触部のシリコンゴムが伸び、平面を保てなくなってしまい、デバイスとしての機能を十分に果たせなくなってしまった。そのため、耐油性が高く、かつ伸縮性の高い表面素材も検討する必要がある。また、電磁石に加える電圧が10V以上のとき、封入部自体の圧力が検知されて誤動作してしまい、接触位置と圧力を得ることができなかった。封入部の硬さに関わらず正確な接触位置を得るため、構造を改善する必要がある。

6. まとめと今後の課題

本研究では、MR流体を用いることで可変な硬さを提示する平面型触覚デバイスと、そのデバイスの特性を可視化するインタラクティブシステムを開発した。今後の課題として、液体を封入する際に空気が入らないような工夫を考案することや、5章で述べた材料の改善および接触位置センサの構造の再設計を行うことが挙げられる。

謝辞 本本研究はJSPS科研費21K12198の助成を受けて行った。

参考文献

- 1) Choi, I., Culbertson, H., Miller, M.R., Olwal, A., Follmer, S.: Gravity: A Wearable Haptic Interface for Simulating Weight and Grasping in Virtual Reality, Proc. of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'17), pp. 119-130 (2017).
- 2) Strasnick, E., Holz, C., Ofek, E., Sinclair, M., Benko, H: Haptic Links: Bimanual Haptics for Virtual Reality Using Variable Stiffness Actuation, Proc. of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'18), Paper No.: 644, 12 Pages (2018).
- 3) Tagashira, H., Matsuura, A.: Slide Control Device Oriented to Virtual Physics Based Mixed Reality, Proc. of 2018 Nicograph International (NicoInt 2018), pp. 91-91 (2018).
- 4) Fang, C., Zhang, Y., Dworman, M. Harrison, C.: Wireality: Enabling Complex Tangible Geometries in Virtual Reality with Worn Multi-String Haptics, Proc. of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'20), 10 Pages (2020).
- 5) 石塚裕己: 磁気粘性流体を微小領域に封入した触覚ディスプレイ, 慶應義塾大学大学院理工学研究科博士論文 (2016).
- 6) Jansen, Y., Karrer, T., and Borchers, J.: MudPad: Tactile Feedback and Haptic Texture Overlay for Touch Surfaces, Proc. of ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces (ITS'10), pp. 11-14 (2010).
- 7) MR流体, <http://www.sigma-hc.co.jp/MR.html>