



# MR 流体を用いた関節剛性可変機構による力覚提示

船引大輝<sup>1)</sup>, 山崎陽一<sup>2)</sup>, 井村誠孝<sup>1)</sup>

1) 関西学院大学 理工学部 人間システム工学科 (〒 669-1337 兵庫県三田市学園 2-1, fzs45818@kwansei.ac.jp)

2) 関西学院大学 感性価値創造研究センター (〒 669-1337 兵庫県三田市学園 2-1)

**概要:** MR 流体は高速応答性を持ち, 磁束方向に対し垂直な方向に剪断応力を発揮する機能性流体の一種である. 本研究では MR 流体を利用した小型かつ軽量な手首装着型力覚提示デバイスを提案する. MR 流体を充填したゴムチューブに加える磁束密度を制御することでゴムチューブの曲がりやすさを変化させ, 手首関節の剛性を高めることで力覚提示を行う.

**キーワード:** 力覚ディスプレイ, ウェアラブル, MR 流体

## 1. はじめに

近年, 力覚提示デバイスの開発が進んでいるが, 触覚提示と比較して, 力覚提示を行うことが可能なデバイスはあまり普及していない. この原因として力覚提示デバイスの多くは Phantom[1] に代表される接地型であることや, 非接地型であっても重量が重い [2], 応答性が低い [3] などの理由により, ユーザへの負荷が増大することがあげられる. 非接地かつ軽量な応答性の高い力覚提示デバイスを開発することで, ユーザへの負荷を軽減し長時間のデバイスの使用が可能となり, より深い没入感を手軽に感じることを実現できる. 本研究ではデバイスの装着部位における慣性モーメント増加を抑えることが可能な点と, 関節の運動の制限により力が加わった際の関節の状態を再現することで力覚を提示できる可能性に着目し, 非接地型力覚提示デバイスを開発する.

## 2. 提案手法と原理

### 2.1 提案手法

本研究ではデバイスを装着した際の慣性モーメントの増加を抑えつつ, ユーザが手軽に使用可能なデバイスの構築を目標とする. デバイスの装着が比較的容易な部位として, 手首関節に着目し, 手首関節の運動を制限することで力覚提示を行う手法を提案する. 本手法において, 力覚提示を行うために必要な要素として, 軽量であること, 力覚提示を行いたいタイミングに瞬間的に関節周りの剛性を高められること, 力覚提示を行いたいタイミング以外では自由に関節を動かすことができることの 3 点がある. 以上の 3 点を満たす素材として MR(Magneto-Rheological) 流体を使用する.

MR 流体とは機能性流体の一種で油に粒径  $10\mu\text{m}$  オーダの強磁性体粒子を分散させたコロイド分散体で, 磁場を印加した際に磁力線上に鎖状構造を形成し, 鎖状構造に対して垂直な方向に剪断応力を発揮する性質を持つ. 一般に磁束密度の印加に対して, 数十 kPa の剪断応力を発揮する. MR 流

体の応答は数 ms と非常に高速であるため剛性のリアルタイム制御が可能である [4].

### 2.2 力覚提示の原理

力覚提示の原理を図 1 に示す. MR 流体を充填したゴムチューブ (以下 MR チューブと呼称) を取り付けたりストバンド型のデバイスを装着し, MR チューブ内部の磁束密度を増大させることで, MR 流体の粘度を増加させ, 手首関節の回転運動に対して剪断応力を発揮することで手首の運動と反対の方向に力覚提示を行う. 手首関節を構成している自由継手関節の運動は 2 自由度であり, 2 軸の各方向に任意の力を提示するために各軸に 2 本ずつの, 計 4 本の MR チューブをリストバンド型デバイスに装着することで, 任意の方向に力覚提示を行うことが可能となる.

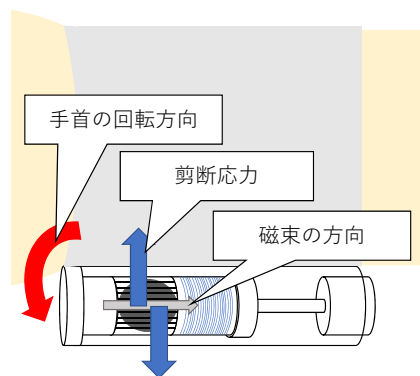


図 1: 力覚提示の原理

## 3. デバイス構成

### 3.1 磁束密度制御機構

磁束密度の制御は, 一般によく利用される電磁石ではなく, ネオジム磁石をモータによって移動させることで行う. これは電磁石の体積当りに発揮できる磁束密度がネオジム磁石より小さいため, 必要な磁束を得るためには電磁石が大型となり, ウェアラブルなデバイスに不適合であるからである. 磁

束密度は磁石との距離に応じて変化する。2つの磁石のS極とN極が対向した状態であっても、距離が大きくなれば磁束密度は減少するので、ネオジウム磁石をMRチューブの一端に取り付け、もう一方のネオジウム磁石を移動させ磁石間の距離を調節することで、磁束密度を制御する。磁石の移動はマイクロリアアクチュエータ (Firgelli社製,PQ12-100-12-P) を用いる。磁束密度は磁石間の距離が数cm変化することで大きく変動するため、モータによる磁石の移動方式であっても応答性が著しく損なわれることはない。また移動させるネオジウム磁石にコイルを巻き、移動時にネオジウム磁石と逆方向の磁束を発生させることで吸着力を軽減し、必要なトルクを抑え、モータの小型化を図ると同時に、磁石のスムーズな移動を実現させる。また、この時に発生する熱によって磁力が減衰しないようにコイルの選定、および電圧の調整を行う必要がある。ただし、今回のデバイスは試作段階であるのでコイルは使用していない。

### 3.2 MR チューブ

MRチューブの構成および試作デバイスを図2に示す。

MR流体はLORD社製MRF-140CGを使用する。このMRF-140CGにポリスチレンを混合させたMR $\alpha$ 流体[5]を用いてMR流体の軽量化と剪断応力の向上を図る。MR $\alpha$ 流体とは、MR流体に非磁性体を混合することで重量を軽減し、剪断応力を向上させるものであり、今回は非磁性体としてポリスチレンをMR流体との体積比1:1で混合する。MR流体を封入するゴムは外径12mm、内径9mmの耐油性の高いフッ素ゴムチューブを使用する。磁石は直径16mm、高さ20mmのものと同径20mm、高さ30mmのもの二種類を使用する。磁石の材質は二種類ともネオジウム40である。

リストバンド部分は手首サポーターをベースとして、3DプリンタによってPLA素材で作成した、MRチューブを支持するパーツを接着する。

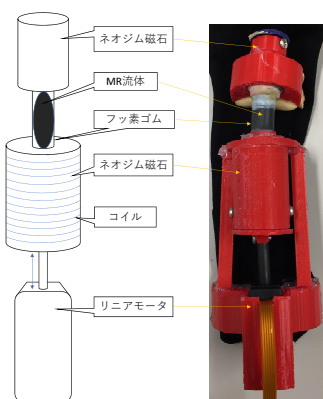


図2: MRチューブの構成と試作品

## 4. 磁束密度制御実験

### 4.1 実験方法

試作した磁束密度制御機構の性能を確認するため、テスラメータでフッ素ゴムチューブ内部の磁束密度を測定する。磁石間の距離が最大となる50mmの状態と最小となる30mm

の状態における磁束密度を測定した。測定時のデバイスの状態を図3に示す。測定する際、MR流体は充填させずにフッ素ゴムチューブに穴をあけ、チューブの真ん中付近で測定した。

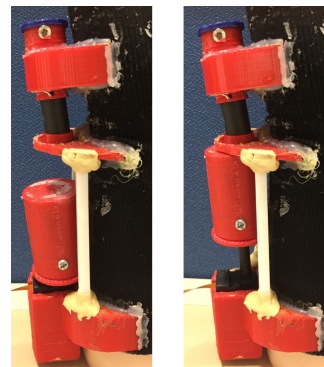


図3: 測定時のデバイスの状態

### 4.2 実験結果

実験の結果、磁束密度は磁石間の距離が50mmの際に73mT、30mmの際に162mTという値を示した。磁石間の距離が20mm程の差で磁束密度は約2.2倍になるため、MR流体の制御に提案した磁束密度制御方法は適切である。実際のデバイスではMR流体で充填されており、MR流体は空気中の透磁率よりも低いため、今回の実験で測定した値よりも小さくなるが、今回の実験では、提案した磁束密度制御方法が有用であるかの確認のため、MR流体中での磁束密度の推定は行わない。

## 5. おわりに

本稿ではMR流体を用いた手首関節の剛性制御による力覚提示方法を提案し、デバイスの設計、デバイスの試作、および磁束密度制御機構の簡易的な実験を行った。今後は試作デバイスによって提示できる力覚の定量的な評価と、ユーザーに与える感覚の主観的な評価を実施し、提案手法の有用性を示す。

### 参考文献

- [1] SensAble Technologies, <http://www.sensable.com/>
- [2] 吉江将之, 矢野博明, 岩田洋夫, ジャイロモーメントを用いた非接地型力覚提示装置の開発, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol. 3, No. 1, pp. 25-30, 1996.
- [3] 満田隆, 久下幸子, 若林将人, 川村貞夫, 粒子内蔵型機械拘束要素の開発と身体装着型力覚呈示装置への応用, 計測自動制御学会論文集, Vol. 37, No. 12, pp. 1134-1139, 2001.
- [4] 藤田豊久, 島田邦雄, MR流体の特性とその応用, 日本応用磁気学会誌, Vol. 27, No. 3, pp. 91-100, 2003.
- [5] T. Nishida, Y. Okatani, K. Tadakuma, Development of Universal Robot Gripper Using MR $\alpha$  Fluid, International Journal of Humanoid Robotics, Vol. 13, No. 4, 16500171(13 pages), 2016.