

奨励金No.1555

Fe ナノ粒子混合型 MR 流体を応用した繊細な力制御が可能な遠隔操作型手術支援ロボットの開発と操作性評価

菊池 武士
大分大学 教授

Development and evaluation of tele-surgical robot with fine haptic control using Fe nanoparticle-mixed MR fluid

Takehito Kikuchi
Oita University, Professor



MR 流体は炭化水素油に強磁性体粒子を分散させた固液混相流体であり、外部磁場によってそのレオロジー特性を高速、可逆的に変化させることができる。申請者らはこれまでナノ Fe 粒子混合型 MR 流体による力制御デバイスの開発を行ってきた。本プロジェクトでは、申請者がこれまで開発してきた繊細な力触覚提示のための MR 流体アクチュエータを応用することで高精度な力制御が可能なハプティックインタフェースを開発した。

MR fluid is a solid-liquid multiphase fluid consisting of ferromagnetic particles dispersed in hydrocarbon oil, and its rheological properties can be rapidly and reversibly changed by an external magnetic field. The applicant has been developing a force control device based on a nano-Fe particle mixed MR fluid. In this project, we developed a haptic interface that enables highly precise force control by applying the MR fluid actuator that we have been developing for fine force-haptic sensation presentation.

1. 研究内容

1-1. ツインドライブ型 MR 流体アクチュエータの改良

既報で開発したツインドライブ型 MR 流体アクチュエータ（Twin-driven MR fluid actuator、以下、TD-MRA）は、入力用モータとしてギヤ付きの AC サーボモータを用いていたため、長さ方向にサイズ軽減の余地があった。また構造剛性の不足により、一定出力時にトルク変動が発生していた。そこで、寸法の小型化とトルク変動の軽減を目標として TD-MRA の再設計を行った。図 1 に開発したアクチュエータの外観を、図 2 にその基本構造を示す。

第二試作機においては、ダイレクトドライブで大きなトルクを出力可能な超音波モータ（PSM60S-A、

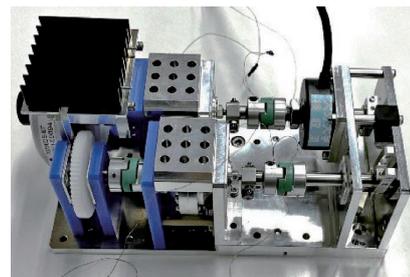


図 1 TD-MRA 二次試作機

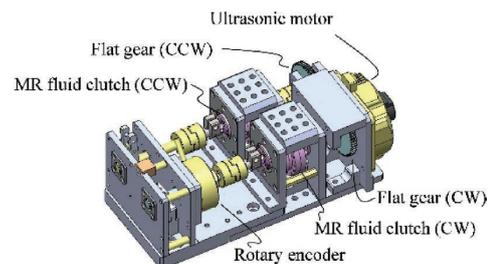


図 2 TD-MRA の基本構造

Piezo Sonic) を入力モータとして用いることによって長さ方向の寸法を低減させた。また、MR流体クラッチの固定部の剛性を高めて軸の芯ずれに伴う脈動を抑えるとともに、出力側にオルダム型カップリングを増やして脈動の伝達を抑えた。

再設計の結果、長さ方向の寸法を約 30 mm 減少することに成功した。次に、アクチュエータへの一定電流入力時におけるフィードフォワードトルク性能を評価するために、定電流試験を実施した。TD-MRA の出力トルクは、出力リンク部に固定したロードセルの力計測値から算出した。一定電流を入力した際の 10 秒間の出力トルクを計測した。実験結果を図 3 に示す。図 3 (a) は既報で開発した第一試作機の結果、(b) は改良した第二試作機の結果であり、0.1、0.5、1.0A の三種の入力値に対する結果を比較している。出力トルクの変動係数（計測値の標準偏差／平均値）は第 1 試作機において約 1% であったが、第 2 試作機においては 0.5 % 未満に半減することができた。

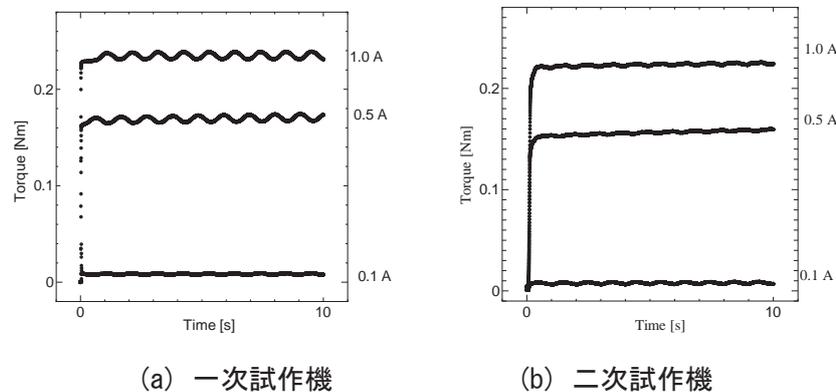


図 3 TD-MRA の応答特性

1-2. デルタ型ハプティックデバイスの改良

以上で改良した TD-MRA 二次試作機を 3 台用いて、DH-MRD 第二試作機を開発した（図 4）。3 台の TD-MRA の出力リンクはデルタ機構の各入力リンクに接続され、出力部の並進三自由度の運動を実現する。デルタ機構の構造部材は CFRP による三次元造形で軽量に作り、関節部は小型のボールベアリングを用いてガタを低減した。超音波モータおよび MR 流体クラッチを冷却するために、各アクチュエータには冷却ファンを設けた。連続運転時に 40 度を超えないことを確認した。

図 5 に各試作に対する指令トルクと出力トルクの関係を示す。図 5 (a) は既報で開発した第一試作機の結果、(b) は改良した第二試作機の結果であり、並進三方向 (x, y, z) の目標値と出力値を比較している。第二試作機の y 方向に関しては、ゼロ点調整の不足により一定量のずれがあるが、全ての方向において直線性が改善された。



図 4 DH-MRD 二次試作機

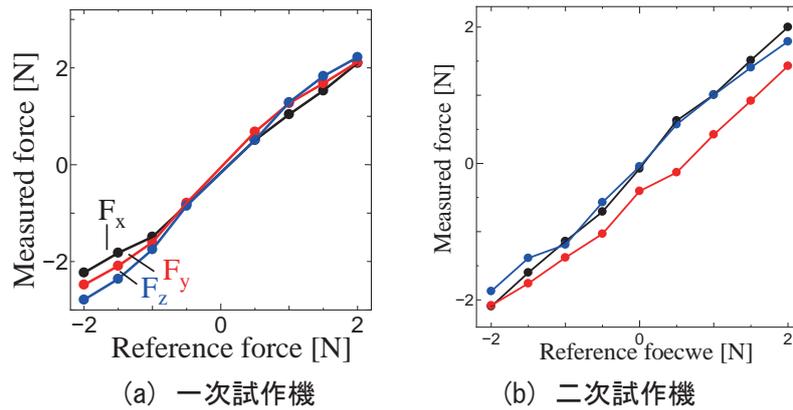
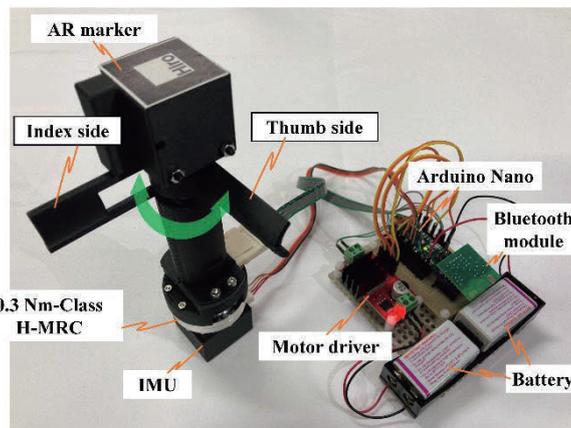


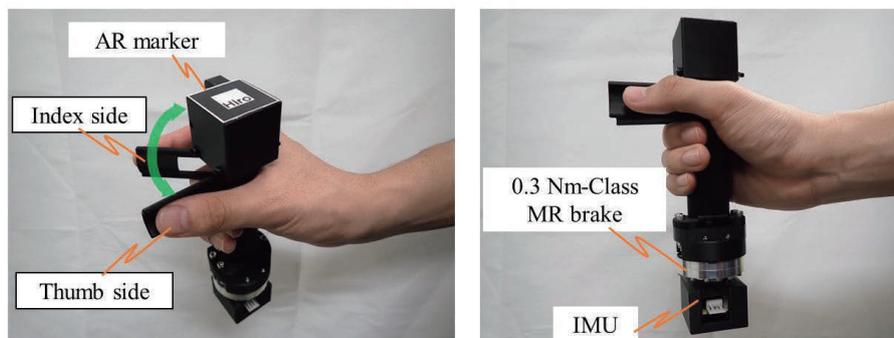
図5 DH-MRDの応答特性

1-3. ハンドヘルド型ハプティックデバイスの開発
さらなる小型デバイスを開発し、ハプティックデバイスの適用可能性を拡大するためにハンドヘルド型力覚グリッパの開発を行った。まず、このハンドヘルド型力覚グリッパ第一試作の制御シ

テムを完成させ（図6）、実験環境を整えた（図7）。グリッパには、ARマーカーとIMU（BMX055, BPSCH）を備えている。力覚提示のためのH-MRCはハプティックグリッパの下部にある。その出力軸が、グリッパ内部のマイクロエンコーダ



(a) 開発品



(b) 使用時外観

図6 ハンドヘルド型力覚グリッパ

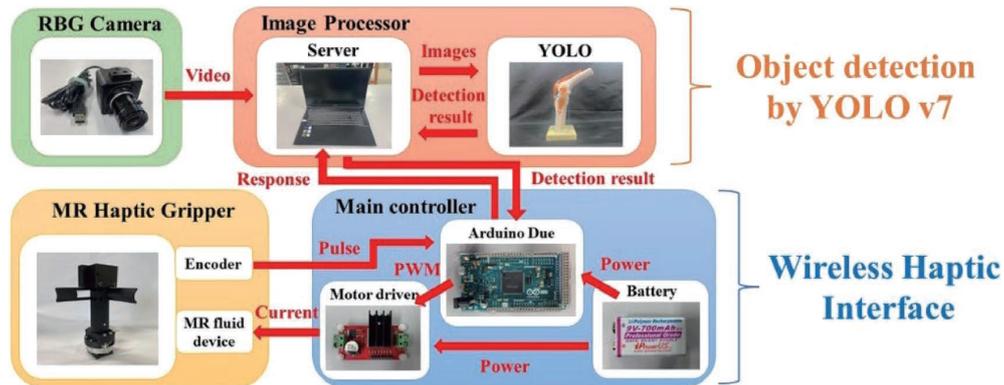


図7 ハンドヘルド型力覚グリッパの制御システム

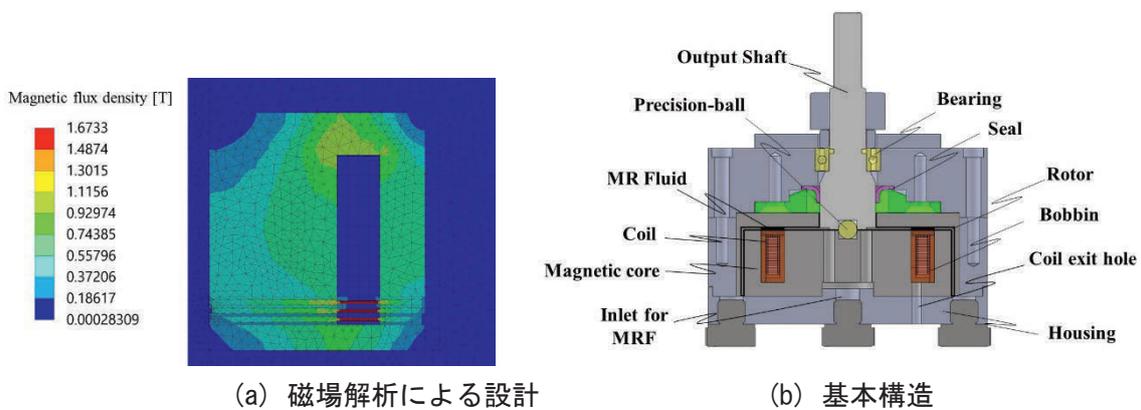


図8 ハンドヘルド型力覚グリッパのためのミニチュア MR 流体デバイス

(MEH-9-1000P、マイクロテック・ラボラトリー)と可動パーツに連結している。質量は約 227 g、全長は約 190 mm である。グリッパの可動域は 0～90° で、最大提示力は約 4 N である。

さらに、より軽量なハプティックインタフェースを実現すべく、軽量なミニチュア MR 流体デバイスの設計を行った。3 種類のロータ構造に対して静磁場解析を用いたトルク推定を行い（図 8 (a)）、円筒型のロータ構造が最も高いトルク性能を示した。さらに、ハンドヘルド型 MR 流体インタフェース向けのミニチュア MR 流体デバイスの設計を行った（図 8 (b)）。設計したデバイスは、重量が 60 g 以下であり、同程度のトルク性能で質量を半減することに成功した。

これを具現化するために詳細設計を施し、試作を行った（図 9）。本デバイスの基本構造は新規なもの

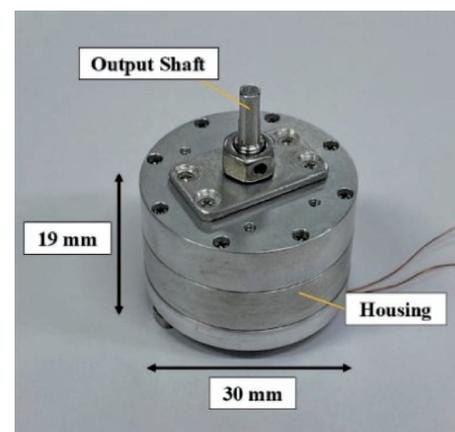


図9 ハンドヘルド型力覚グリッパのためのミニチュア MR 流体デバイス

として、特許出願を果たした（特願 2024-128151）。また、本デバイスをハンドヘルドハプティクスに組み込み、ヒトを対象とした感性評価実験の準備を行っている。

2. 発表（研究成果の発表）

- [1] Takehito Kikuchi, Asaka Ikeda, Isao Abe, Design and Performance Evaluation with an Open-Loop Force Controller for a Delta-Type Haptic Device with Magnetorheological Fluid Actuator, *Actuators*, 2025.3, 14(3), 122. <https://doi.org/10.3390/act14030122>
- [2] Asahi Higashiguchi, Isao Abe, Takehito Kikuchi, Design and Analysis of Miniature Magnetorheological Fluid Device for Handheld Haptic Interface, *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2024)*, pp. 367-372 (2024.7, Boston)
- [3] Takehito Kikuchi, Asaka Ikeda, Rino Matsushita, Asahi Higashiguchi, Isao Abe, Development of the 2nd Prototype of MR Fluid Actuator for Fine Haptic Interface, *Proceedings of the 8th International Symposium on Robotics & Mechatronics (ISRM 2024)*, pp. 310-319 (Djerba, Tunisia)
- [4] 東口朝陽、阿部功、菊池武士、ハンドヘルド型ハプティックインタフェース向けのミニチュアMR流体デバイスの開発と評価、日本機械学会2024年ロボティクス／メカトロニクス講演会講演論文集、2P2-P07（2024.5、宇都宮）。
- [5] 松下涼音、池田旭花、阿部功、菊池武士、MR流体アクチュエータを搭載したデルタ型ハプティックデバイスの改良と評価、日本機械学会2024年ロボティクス／メカトロニクス講演会講演論文集、1A1-B06（2024.5、宇都宮）。