

**2018年度 永守財団 研究助成 研究報告書**

所属機関名	早稲田大学 理工学術院総合研究所
職位または役職	准教授
氏名	亀崎 允啓

**1. 研究題目**

高い出力性・逆可動性・制御性を有する磁気粘弾性流体アクチュエータユニットの開発

**2. 研究目的**

人協働型産業用ロボットには、予期せぬ人との接触を安全に行うための高い逆可動性が必要な場面もあれば、精密な作業を素早く行うための高い剛性が必要な場面、さらには、人が発揮できない大きな作業力や低速度性能が必要となる場面もある。このように、さまざまな動作特性を実現できるスマートアクチュエータの構築が不可欠となる。

しかしながら、これまでのアクチュエータは、個別の性能を満たすものはあっても、上記の3つの特性を機構的に実現するアクチュエータユニットは開発されていなかった。そこで本研究では、油圧駆動が得意とする省スペースでの力作業性(不得意:低摺動摩擦)と磁気粘弾性(MR)流体の特性である磁場に応じた可逆・高速・連続的な粘弾性変化(不得意:可変レンジ限界)を組み合わせ、それぞれの不得意な性質を補完する高い出力性・逆可動性・制御性を有する油圧アクチュエータユニットを開発する。

本研究期間では、多様な動作モードを実現できる小型のベーンモータを開発し、人サイズのロボットハンドの開発に取り組む。上記3つの性能は本来相反する性能であることから、摺動摩擦を減らし、無磁化時の逆可動性を高め、磁化時の粘性を最大とするために、ベーンとハウジングの間に間隙を設け、そこにせん断モードで応力が生じるように磁界を作用させる。本研究の成果は、本質的に安全なロボットを構成するためのアクチュエータ機構として意義があり、磁気回路(材料配置)と機構設計の融合理論構築に対する技術的な貢献も高いと考えている。

### 3. 研究内容及び成果

#### ■MR流体アクチュエータの開発

まず、高い出力性・逆可動性・制御性を有する油圧アクチュエータユニットを開発した(図1)。ロボットハンドへの実装を目標に40mm×40mm×50mmのサイズを目標として設計し、各要求特性は以下のように実現を試みた。

(1)高逆可動性(・高制御性):ペーンとハウジングの間に間隙を設け、そこにせん断モードで応力が生じるように磁界を作用させる。MR流体が流体シールとしてはたらくため、機械摺動抵抗と比べて低摩擦トルクであり、逆可動性を飛躍的に向上させられる。

(2)高出力性(・高堅牢性・エネルギー効率):せん断方向にはたらく瞬間的な外力により、強磁性体粒子の鎖が壊され、粘性が著しく低下するという特性を有している。つまり、出力軸に瞬間的に外力が加わると、摩擦力が著しく低下し、逆可動性が瞬間的に向上させられる。

(3)高制御性(・高応答性・小型化):連通流路が流量調整バルブの役割を担うことで、高応答性制御が実現できる。バルブの内蔵化により、アクチュエータの小型化が可能になる。基本性能評価を行った結果、同程度トルク出力の従来ロボットアクチュエータの約159倍のバックドライブビリティ、油圧アクチュエータと同等の高パワーレート密度、電気アクチュエータと同等の出力密度、更なる高出力密度化・高パワーレート密度化へのポテンシャルが確認された。以上より、アクチュエータ単体の性能に関しては、目標以上の成果が得られた。

#### ■MR流体駆動パワフルロボットハンドの開発

アクチュエータにより根元の関節を直接駆動させ、その他の指を連動リンク機構により駆動させるMR流体駆動パワフルロボットハンドを開発した(図2)。小型ポンプおよび電動機はハンドの甲に収納できる構造となっている。原理試作として、人の手の約1.5倍の大きさ(長さ270mm、幅150mm、指直径25mm)の2指グリップタイプとし、どの程度の発生力が得られるかを調査した。実験の結果、最大で約5kgの把持力が得られることがわかった。これは、一般のロボットハンドと比べると十分な把持力であるが、人の把持力(約50kg)の約1/10である。今回の設計はバックドライブビリティを重視した設計としたため、連通流路の調整やMR流体の調整により、サイズを維持したまま最大発生力を大きくすることが可能と考えている(今後取り組む予定である)。また、ロボットハンドを用いて、物体の把持動作や環境への接触動作を含む実験を行い、設計要件に挙げた高い出力性・逆可動性・制御性が実現できていることが確認された。

以上より、油圧駆動が得意とする省スペースでの力作業性(不得意:低摺動摩擦)とMR流体の特長である磁場に応じた可逆・高速・連続的な粘弾性変化(不得意:可変レンジ限界)を組み合わせることで、それぞれの不得意な性質を補完する高い出力性・逆可動性・制御性を有する油圧アクチュエータユニットおよびそれを用いたロボットハンドを構築することができた。

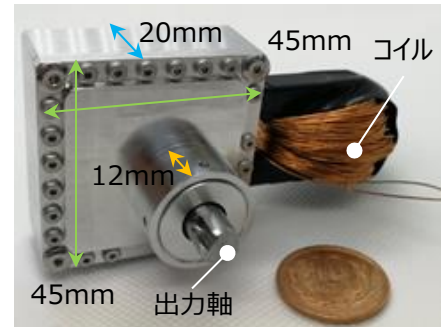


図1 開発したMR流体アクチュエータ

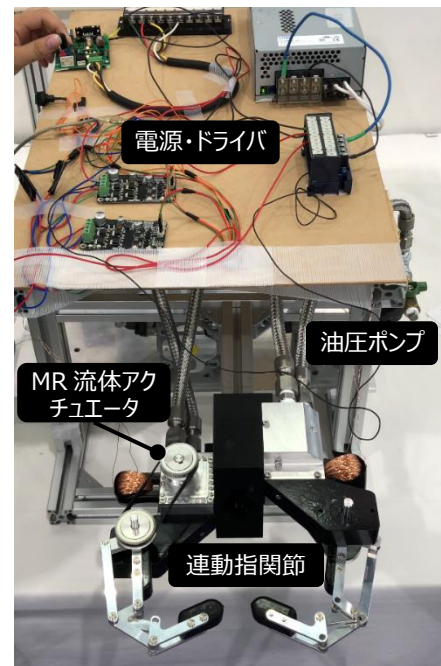


図2 開発したロボットハンド

#### 4. 今後の研究の見通し

---

2018年度は、油圧駆動が得意とする省スペースでの力作業性(不得意:低摺動摩擦)とMR流体の特長である磁場に応じた可逆・高速・連続的な粘弾性変化(不得意:可変レンジ限界)を組み合わせ、それぞれの不得意な性質を補完する高い出力性・逆可動性・制御性を有する油圧アクチュエータユニットを開発した。今後は、力や速度に加えて逆可動性も任意の組み合わせで統一的に制御するため、粘性と流量の統合制御に基づく磁気粘弾性流体アクチュエータの基本コントローラを開発する。本研究期間には、アクチュエータのパラメータ同定を行い、状態空間モデルを用いた「粘性・流量統合制御技術」を開発する。操作量であるコイル電流調整による粘性制御(トルク、速度、逆可動性に影響)とポンプ電流調整による流量制御(速度・トルクに影響)を制御パラメータである出力性・逆可動性・応答性の観点から統一的に制御する。このような非線形システムを対象とした多入力多出力非線形制御系の設計は、流体アクチュエータにおいて実施例が乏しく学術的価値が高いといえる。研究成果は、2018年度に開発したアクチュエータが有する出力性・逆可動性・制御性の向上に、相乗的効果をもたらすものであり、制御手法と機構設計の融合理論構築に対する技術的な貢献も高いと考えている。

#### 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

---

##### 学術論文

- [1] 査読あり, M. Kamezaki, P. Zhang, K. Otsuki, S. He, G. A. Dominguez, and S. Sugano, “Development of a Backdrivable Vane-Type Rotary Actuator Using Magnetorheological Fluids”, IEEE Transactions on Mechatronics, May 2020. (To be submitted)
- [2] 解説記事, 亀崎允啓, “新産業創出のための機能性材料とメカトロニクス融合デザイン～磁気応答性材料を用いたロボットアクチュエータ～”, BIO INDUSTRY, 2020年1月。(校了済み)
- [3] 解説記事, 亀崎允啓, “材料×機構の融合デザイン:逆可動性を有する磁気粘性流体アクチュエータユニット”, 油空圧技術, vol. 58, no. 10, 2019年10月。

##### 国際会議

- [4] 査読あり, P. Zhang, M. Kamezaki, K. Otsuki, Z. He, H. Sakamoto, and S. Sugano, “Development of Anti-Sedimentation Magnetorheological Fluids and Its Implementation to MRF Damper,” Proc. IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2019), July 2019.
- [5] 査読あり, P. Zhang, M. Kamezaki, K. Otsuki, Z. He, H. Sakamoto, and S. Sugano, “Development of Anti-Sedimentation Magnetorheological Fluids and Preliminary Evaluation,” Proc. IEEE-RAS Int. Conf. Soft Robotics (Robosoft2019), April 2019.

##### 国内会議

- [6] 招待講演, 亀崎允啓, 材料と機構の融合デザイン～磁気機能材を応用したロボットデバイス～, 2019年度 磁性流体連合講演会, 2019年12月。(予定)
- [7] 張裴之, 亀崎允啓, 大槻健史郎, 何卓頤, 菅野重樹, “磁気粘性流体を用いた逆可動性を有する油圧ロータリーアクチュエータの開発”, 2019年度磁性流体連合講演会, 2019年12月。(予定)
- [8] 招待講演, 亀崎允啓, 新産業創出に向けた機能性材料とメカトロニクス融合デザイン, ナノ・マイクロ技術支援講座・ナノ茶論第7回セミナー, 2019年11月。
- [9] 大槻健史郎, 亀崎允啓, 張裴之, 何卓頤, 菅野重樹, “磁気粘性流体を用いた低摺動ベーン形ロータリーアクチュエータの開発”, 第37回日本ロボット学会学術講演会, 2019年9月。
- [10] 張裴之, 亀崎允啓, 大槻健史郎, 何卓頤, 菅野重樹, “運動エネルギーの双方向充放機構による擬似慣性可変システムの提案”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2019年6月。

##### その他(特許など)

- [11] 新技術説明会, 材料×機構の融合デザイン:逆可動性を有する磁気粘性流体アクチュエータユニット, 2019年6月
- [12] 受賞:第34回日本ロボット学会研究奨励賞, 日本ロボット学会(2019年9月)
- [13] 特許:発明者:亀崎允啓, 大槻健史郎, 張裴之, 菅野重樹, 出願人:学校法人 早稲田大学, 名称:アクチュエータシステム, 特願 2019-38184, 2019年3月4日。