

2020年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関	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

磁気粘弾性流体アクチュエータの特性最適化に関する研究

2. 研究目的

人と協働する次世代産業用ロボットには、人との予期しない衝突を踏まえて駆動できる高い柔軟性が要求される。これまでに、粘弾性アクチュエータが多く開発されているが、周波数応答の限界などによる安全性に課題があった。そこで、人・ロボット間の物理的接触に適した、高トルク・質量比、短応答時間などを実現できる高い潜在性を有する磁気粘弾性流体 (Magnetorheological Fluids: MRF) を使った柔軟アクチュエータを開発してきた。

上記ロボットには、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、人以上の大きな作業力や低速度性能が必要となる場面もある。▼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 MRF 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。▼2019年度は、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、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した。▼最終年度となる2020年度は、これまで培ってきた基本ハードウェア設計および統合制御手法を踏まえ、アクチュエータが具備すべき各特性(出力性・逆可動性・制御性)を最大化するための磁気粘弾性流体アクチュエータの特性最適化手法を開発する。これまでに明らかになった材料・機構・制御の基礎特性を考慮したアクチュエータ設計手法を提案するものであり、非線型系計画問題として最適化設計を目指す。本研究成果は、求められるアクチュエータ性能に特化した過不足のない最適化が求められる産業応用にとっても有用なものになると考えている。

3. 研究内容及び成果

■1. パラメータ連関性の整理：これまで開発してきたベーンモータを基本形とし，出力性/逆可動性/応答性に関連する設計パラメータ群を抽出し，材料側面，機構側面，制御側面からその連関性を整理した．材料側面では，MRF における磁性粒子の体積分率，ベース分散媒の粘度の選定が，すべてのアクチュエータ特性に大きく影響する．機構側面では，連通路の形状が，出力性・逆可動性に大きな影響を与える．また，シールの設置箇所や連通路開口部形状によっても，特性が変化する．制御側面では，ポンプによる MRF の供給と連通路部への磁界発生を変数とした制御ロジックにより，高出力・逆可動・高応答モードにそれぞれ調整可能である．特に，高速な磁場制御とポンプ制御が，実用に足る逆可動性を実現するうえで極めて重要であることが分かった．

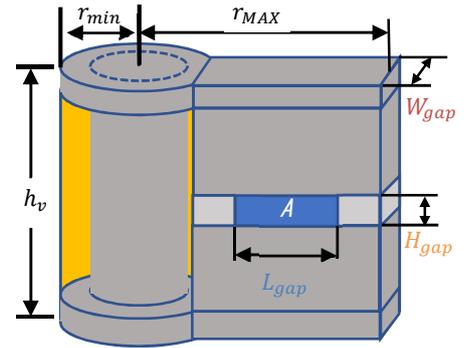


図1 ベーンのモデル図

■2. 最適化シミュレータの開発：上記特性を踏まえた「MRF アクチュエータの特性最適化設計シミュレータ」を開発した．ここでは，肩ヨー，肩ピッチ，肘ピッチ，手首ピッチ軸を有する4自由度のロボットアームの構築を目的に，最適化設計を行った．可搬重量は 10kg，逆可動性は，自重によりアームが逆可動する程度，アームの肩ピッチ軸から手先までの長さを 670 mm とした．トルク性能および逆可動性の分析から，設計に必要なパラメータは，図1に示す， W_{gap} ， L_{gap} ， H_{gap} の3つであることが分かった．はじめに，改造元のアクチュエータのトルクと圧力の関係から要求トルクに対応する圧力の検討を行い，アクチュエータのベーンが受け止められる圧力限界 P_{max} を決定する．次に，連通路のパラメータを決定する． W_{gap} は大きいことが理想であるが市販の油圧アクチュエータを改造するため， W_{gap} はとり得る最大のものとした． L_{gap} と H_{gap} は同様の影響を有するが，磁束のロスを減らすため， L_{gap} を長く設定する．要求される各種特性を満たす最適パラメータ組を探索する手法を Grid Search を用いて開発した．この手法を用いて，各アクチュエータのパラメータを決定した．図2に制作したベーンを含むアクチュエータシャフト部を示す．

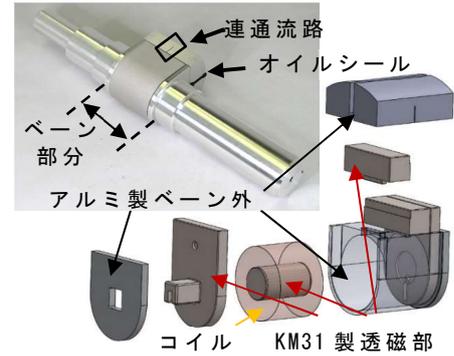


図2 アクチュエータシャフトとベーン分解図

表1 各アクチュエータ最小/最大トルク

		電流 [A]				
		0	0.5	1	1.5	2
トルク [Nm]	手首 最大	10.8	13.2	13.5	13.6	13.8
	手首 最小	2.43	2.81	2.93	3.03	3.58
肘 最大	肘 最大	44.6	50.8	55.2	56.6	57.0
	肘 最小	15.8	18.6	19.2	20.6	21.3
肩 最大	肩 最大	52.4	90.2	91.2	92.4	97.5
	肩 最小	6.89	65.2	66.4	71.9	72.4



図3 アクチュエータの逆可動性能

■3. 実機製作・実験およびまとめ：最適化シミュレータにて設計した MRF アクチュエータが各種性能を十分に発揮できていることを確認する．トルク測定の結果(最小/最大トルク)をまとめたものを表1に，逆可動性の測定結果を図3にそれぞれ示す．これらの結果より，3種類のアクチュエータそれぞれにおいて，十分なトルク性能および逆可動性能を有していること，コイルに電流を流し磁場を発生させることで，出力性，逆可動性，さらには応答性を変化させられることを確認できた．図4には，逆可動性の確認を行っている様子を示す．手でアームの先端に外力を加えることでアームが逆可動し，手を放すと自重によりアームが下がっていくことが確認できた．以上より，MRF アクチュエータ最適化手法が有効であることが示された．

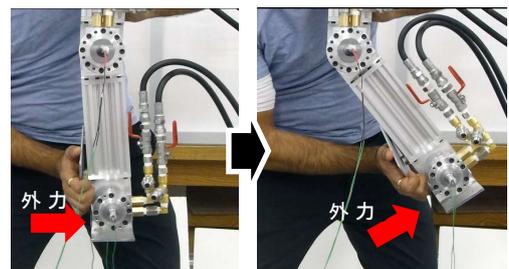


図4 アーム逆可動の様子

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 MRF 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。2019年度は、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、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した。最終年度となる2020年度は、これまで培ってきた基本ハードウェア設計および統合制御手法を踏まえ、アクチュエータが具備すべき各特性(出力性・逆可動性・制御性)を最大化するための磁気粘弾性流体アクチュエータの特性最適化手法を開発した。

今後は、より高度な(人工知能技術を含めた)制御ロジックの導入、ロボットアームやロボットハンド等アセンブリ機構のための組み合わせ最適化設計、さらには、重機ロボット等を用いた重作業や介護支援などの人間共存アプリケーションへの応用を進めていきたい。

5. 助成研究による主な発表論文, 著書名

【解説記事】

- [1] 坂本裕之, 亀崎允啓, “分散最適化した MR 流体(磁気粘弾性流体)における磁性体分離現象抑制とロボット機構への実装”, 塗装工学, vol. 56, no. 3, pp. 103-116, 2021 年 3 月.
- [2] 亀崎允啓, 坂本裕之, “次世代産業用ソフトロボットの実現に向けた革新的MR材料×駆動機構の融合研究開発”, 日本ロボット学会学会誌(特集号:NEDO 先導研究), vol. 39, no. 2, pp. 109-114, 2021 年 3 月.
- [3] 亀崎允啓, 坂本裕之, “粘弾性流体とロボット機構の融合デザイン”, 「新技術」欄, ロボット(日本ロボット工業会), No. 257, pp. 51-53, 2020 年 11 月.

【国際会議(査読有)】

- [4] Peizhi Zhang, Mitsuhiro Kamezaki, Ryuichiro Tsunoda, and Shigeki Sugano, “Development of a Backdrivable High-Torque Robot Arm with Magnetorheological Fluid Vane Motors,” Proceedings of International Conference on Flow Dynamics 2021 (ICFD 2021), pp. 267-270, Oct. 2021. (参考)
- [5] Zhuoyi He, Mitsuhiro Kamezaki, Peizhi Zhang, Sahil Shembekar, Ryuichiro Tsunoda, and Shigeki Sugano, “A Prototype Power Transmission System with Backdrivability and Responsiveness using Magnetorheological Fluid Direction Converter and Clutch,” Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2020), pp. 1-6, Oct. 2020.
- [6] Sahil Shembekar, Peizhi Zhang, Zhuoyi He, Ryuichiro Tsunoda, Mitsuhiro Kamezaki, and Shigeki Sugano, “Preliminary Development of a Powerful and Backdrivable Robot Gripper Using Magnetorheological Fluids,” Proceedings of 2020 International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC2020), pp. 1458-1463, Oct. 2020.

【国内会議(査読無)】

- [7] 角田龍一郎, 亀崎允啓, 張裴之, 菅野重樹, “MRF ロボットアームのための力学的・幾何的順応性を高める基本制御システムの試作”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2021 論文集(Robomech'21), paper no. 1A1-E10, 2021 年 6 月 6~8 日, 大阪.
- [8] 角田龍一郎*, 亀崎允啓, 何山, 張裴之, 菅野重樹, “ファジィ PID とクラス分類手法を用いた慣性・粘弾性可変機構を有する MRF アクチュエータ制御手法の提案”, 第 21 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集(SI2020), pp. 1641-1644, 2020 年 12 月 16~18 日, 福岡.

【受賞】

- [9] Best Presentation Award for Young Researcher, The 18th International Conference on Flow Dynamics, 2021 年 10 月. (参考)