

2019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

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設計

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。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。本年度は、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、相乗的效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。

3. 研究内容及び成果

■粘性・流量統合制御手法の開発：MRFアクチュエータの制御システムは、システム全体の挙動を決定する高次の制御器を備える必要がある。そこで、異なる制御性が求められる動作(例えば、安全性を必要とするコンプライアントマニピュレーション、消費電力を最小化する省エネルギー動作、応答時間を最小化するための高応答動作)において、最適な挙動を実現する制御システムを開発した。本アクチュエータは、ポンプの流量を制御するポンプ電圧 P_V とコイルの磁場により粘性を制御するコイル電流 M_A の2つの独立制御量を有している。これらの変数制御することで、高次の制御器のコマンドに対する最適な反応を確保しつつ、アクチュエータの速度とトルクにより正確な制御を実現する。そこで、ある出力トルクにおける入力組み合わせを規定する状態機械を開発し、外部センサから得られた入出力に基づき、状態機械における動作モード間を切り替えることによる制御システムを開発した。制御モードは高逆可動、高エネルギー効率、高応答モードの3種類である。目標速度を S_t 、現在速度を S_c とすると、ポンプ制御における速度誤差 S_e は、 $S_e = S_t - S_c$ となる。また、磁場制御における速度誤差 S_e は、 $S_e = (S_t - S_c)\sin(S_c \cdot P_V)$ となる。ポンプ制御、磁場制御、初期状態の3つの状態間を異なる条件で遷移させる(図1)。

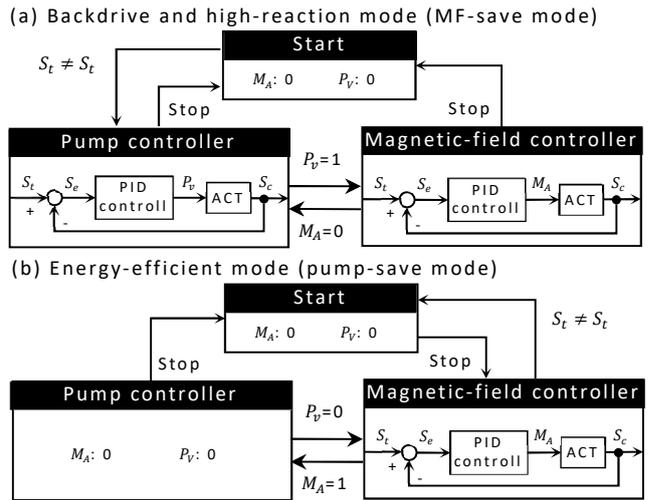


図1 開発した制御システム

■評価実験

(1)基本性能：本アクチュエータの基本性能および、開発した制御モードの評価を行った。 P_V と M_A の範囲を $0 \leq P_V \leq 0.4V, 0 \leq M_A \leq 2A$ のように設定した。

- 静的実験：アームを固定した状態で、ポンプ電圧 P_V とコイル電流 M_A を操作し、トルク性能を測定した。その結果、ポンプ流量・磁場の大きさに比例し大きくなり、一定値になることが正しく確認された。
- 動的実験：ポンプ電圧 P_V とコイル電流 M_A を操作し、アクチュエータが 90° 動作する際の速度を測定することで速度性能を測定した。本アクチュエータの速度はトルクと同様に、ポンプ流量・磁場の大きさに比例し大きくなり、そして一定値になる。トルクと比較すると、ポンプ流量の影響を大きく受けることが分かる。

(2)制御モード：高逆可動・高応答モードでは、ポンプ流量は最大(1600rpm)とした後、磁場を変化させた。高エネルギー効率モードでは、磁場の大きさは最大(2A)とした後、ポンプ流量を変化させた。

- 高逆可動モード：アクチュエータ回転速度におけるアームのトルクから、当該速度における逆可動性(トルクの小ささ)は、高逆可動・高応答モードの方が良いことが分かった(図2a)。
- 高エネルギー効率モード：アクチュエータ回転速度におけるエネルギー効率%から、当該速度におけるエネルギー効率は、高エネルギー効率モードの方が、優れていることが分かった(図2b)。
- 高応答モード：応答時間(目標トルクに対して90%のトルクが得られるまでの時間)を求めたところ、高逆可動・高応答モードでは1.23s、高エネルギー効率モードでは2.09sとなり、高逆可動・高応答モードの方が応答性が良いことが分かった。

エネルギー効率や逆可動性能、応答性などの目的性能に応じたコイル磁場(粘性)とポンプ電圧(流量)の組み合わせを規定する状態機械を開発し、アクチュエータに実装して評価実験を行った結果、目的に応じた性能を発揮できることが確認された。

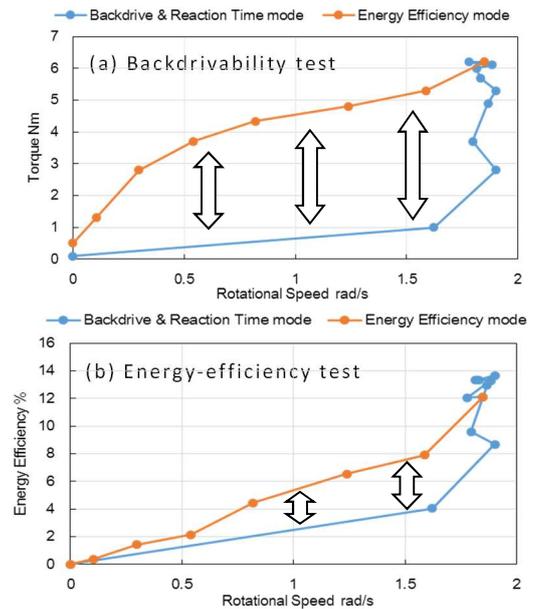


図2 実験結果

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。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

【解説記事】

- [1] 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(シーエムシー出版), vol. 37, no. 1, pp. 26-34, 2020年1月.
- [2] 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, pp. 44-49, 2019年10月.

【国際会議(査読有)】

- [3] 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.
- [4] 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.

【招待講演】

- [5] 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5日, 名古屋, 愛知.
- [6] 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26日, 川崎, 神奈川.

【国内会議(査読無)】

- [7] 角田龍一郎, 亀崎允啓, 何山, 張裴之, 大槻健史郎, アギーレ ゴンサロ, 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), 2020年12月.(予定)
- [8] 角田龍一郎, 亀崎允啓, 張裴之, シェンベカル サヒル, 何卓頤, 菅野重樹, “磁気粘性流体を作動流体とした逆可動性と高出力性を有するロボットアームの開発”, 第38回日本ロボット学会学術講演会論文集(RSJ2020), paper no. 1A1-06, 2020年9月.
- [9] 何卓頤, 亀崎允啓, 張裴之, シェンベカル サヒル, 角田龍一郎, 菅野重樹, “ギア・クラッチ・ブレーキを組み合わせた逆可動性と高応答性を有する動力伝達機構の試作”, 第38回日本ロボット学会学術講演会論文集(RSJ2020), paper no. 1A1-05, 2020年9月.
- [10] 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講演論文集, pp. 13-15, 2019年12月.