

2023年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	東京理科大学 創域理工学部 電気電子情報工学科
職位または役職	助教
氏名	北村 知也

1. 研究題目

コロナ放電による推力生成で駆動する回転アクチュエータの制御性能向上

2. 研究目的

研究の目的は、コロナ放電を用いた革新的なアクチュエータの開発を通じて、家庭や工場におけるロボットの普及に寄与することである。現在、ロボットの関節部分において、特に人間の肩関節のように1つの関節で複数の回転軸を持つモータの開発は技術的に困難である。そこで、報告者はコロナ放電を利用した新しいアクチュエータを提案している。これは、推力生成原理(Electrohydrodynamics: EHD)を応用したものであり、EHD現象では曲率半径の異なる電極に約30kV以上の高電圧が印加されると、コロナ放電によって生じるイオン風の斥力を利用して陰極に推力が生成される。

これまでの研究で、コロナ放電による回転機構を持つモータの製作が可能であること、電極に流す電流を調整することで推力の調整が可能であることを確認した。しかし、現段階では推力が少なく、アクチュエータとして実用するには不十分であり、さらに複数の自由度を持つ回転機構の干渉も未解決である。

今年度の研究では、電極配置の最適化により推力の増強を図るとともに、多自由度回転機構の製作とその制御方法を確立する。この研究が進展すれば、多方面への応用が期待でき、特に多関節ロボットの実現に大きく貢献することができる。

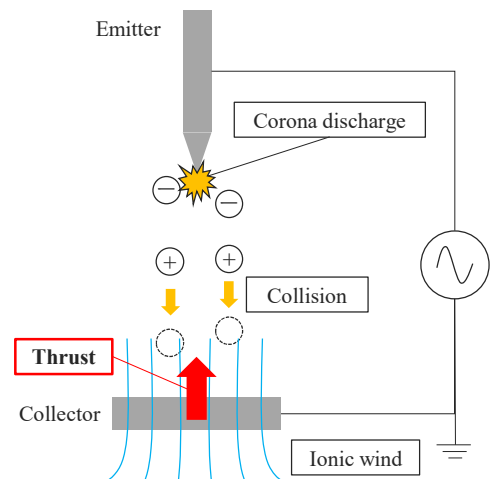


図1 コロナ放電による推力生成原理

3. 研究内容及び成果

本研究はⅠ．電源装置の開発、Ⅱ．動特性のモデル化、Ⅲ．モデル化に基づく高精度制御によって構成される。

Ⅰ．電源装置の開発 まず電源装置の小型化のために series-parallel switched capacitor converter (SPSCC)を用いた電源装置のシミュレーションを行った。SPSCC を用いることで後段に配置されるコッククロフト回路に使用するコンデンサの数を削減することが可能である。シミュレーションの結果では重量を従来の回路方式に比べて 10%削減できることを確認した[4]。しかし、高電圧側の電圧を制御する場合には複数の電源が必要であり、2 自由度の回転機構でも左右前後で最低 4 つの電源が必要である。また、高電圧の調整は大きな遅延が伴うことも確認し、非常に制御に不向きであることが判明した[5]。

Ⅱ．動特性のモデル化 そこで、図 2 に示すように陰極に電流を流し、磁場を発生することによって空気中のイオンにローレンツ力を発生させることを検証した。ローレンツ力の発生によりイオンの運動方向が変わり、電流を流した側の陰極方向への力が減少することが期待できる。図 3 に実験を行った際の写真を示す。左側は電極間の電位差が 42kV、右側の陰極に 4A の電流を流した場合、右側は電極間の電位差が 35kV、右側の陰極に 8A の電流を流した場合である。図からわかるように右側の陰極に大きい電流を流すことで推力の大きさを調整できることを確認した[3]。

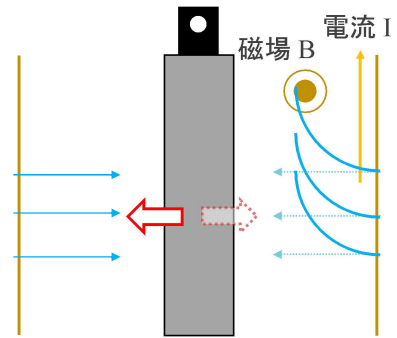
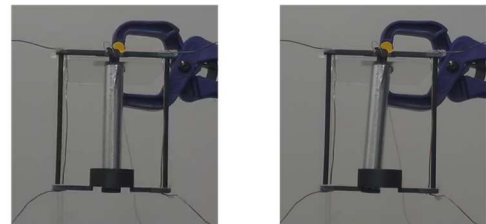


図 2 磁場の発生による推力制御

Ⅲ．モデル化に基づく高精度制御 本研究の目標とは異なる形状であるが、図 4 に示すような EHD 現象を使用したモータの高精度制御に着手した。具体的には装置の逆モデルに基づく制御システムを構築し、フィードフォワードコントローラ、電圧範囲の制限、遅延補償を備えた外乱オブザーバを導入した。シミュレーションと実験を通じて正弦波外乱とトルク外乱に対する応答を測定した結果、提案した制御システムは追従性能と応答性能が向上することを明らかにした(図 5)。外乱応答実験では、提案システムが最大角度変化を 35.3%、整定時間を 67.5%削減することを確認した[2][7]。



陽-陰極間電位差：42kV 右側陰極電流：4A
陽-陰極間電位差：35kV 右側陰極電流：8A

図 3 陰極電流の影響

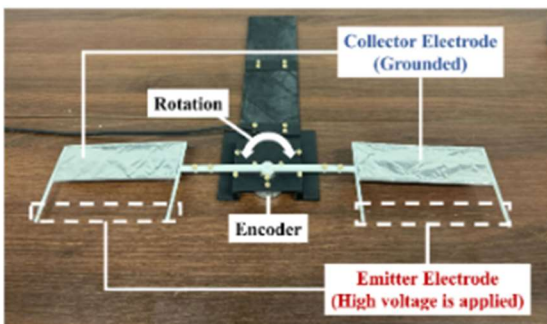


図 4 EHD を使用した 1 自由度モータ

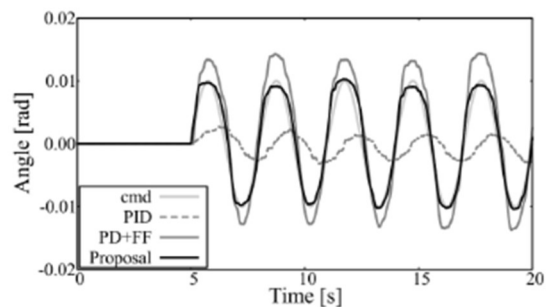


図 5 正弦波状の指令値に対する追従試験

4. 今後の研究の見通し

これまでの 2 年間を通じて推力の制御手法の提案、外乱オブザーバなどの制御技術が EHD にも活用できることを確認した。一方で EHD が生成する推力が小さいこと、多自由度機構の場合には干渉が生じることなど依然として課題は残る。これまでの課題をもとに以下の 3 つの研究内容に着手することで本提案の有用性を確認していく。

I. 電極配置の最適化

まず、コロナ放電による推力を最大化するため、様々な電極配置を試験し、その効果を評価する。本フェーズでは、推力のみならず、出力重量比や放電電圧などの複数の観点から電極配置の性能を網羅的に分析する。シミュレーション(COMSOL)と実験を並行して進めることで、実験データと数値モデルを比較しながら、最適な電極配置を特定する。本フェーズで得られる成果は、推力の増強と効率化に直結し、後続の多自由度回転機構の設計における基盤となる。

II. 多自由度回転機構の製作

次に、多自由度回転機構の設計と試作品の製作を行う。本フェーズでは、機構間の干渉問題を解決するため、設計を改善し、より高い自由度を実現する構造を構築する。試作品の動作を検証し、力センサや回転センサを用いて精密な測定を行うことで、性能や問題点を特定し、必要に応じて調整を加える。本フェーズの成果は、最適化された電極配置と組み合わせることで、高効率かつ安定した多自由度回転動作を可能にする。

III. 制御アルゴリズムの開発と実装

最後に、外乱オブザーバを用いた高精度角度制御アルゴリズムの実装を進める。制御システムは、回転機構の動作モデルを基に設計され、実際のアプリケーションでの使用を想定した実験によって評価される。本フェーズでは、マイクロコントローラを用いてリアルタイム制御を実現し、システム全体の応答性と精度を向上させることを目指す。また、これまで文献[2]で示された技術を応用することで、高精度かつ外乱抑制性能の高い制御システムの構築を行う。

5. 助成研究による主な発表論文, 著書名

学術論文(査読付)

1. H. Katagiri, Y. Sawane, S. Yashita, T. Kitamura, T. Murakami, and T. Nozaki: “Electrical Characteristics in Relationship Between Electrode Height of Wire-Plate Corona Discharge and Generated Thrust”, IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society. (投稿中)
2. S. Yashita, H. Katagiri, K. Yane, T. Kitamura, H. Tsubata, and T. Nozaki: “Robust and Responsive Antagonistic Attitude Control for Electroaerodynamic Propulsion Systems Considering Discharge Characteristics”, IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society. (投稿中)
3. IEEE Transactions on Plasma Science ~1件投稿予定

国際会議(査読付)

4. R. Tauchi, T. Kitamura, and T. Nozaki: “Design of Lightweight and Fast-Response High-Voltage Converter Using Switched Capacitor”, IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2024), P3C-3, 2024/03.
5. S. Yashita, H. Katagiri, T. Kitamura, and T. Nozaki: “Modeling of Device Using Corona Discharge Considering Voltage Range Limitation and Delay”, International conference on Advanced Motion Control (AMC2024), 2024/03.
6. S. Yashita, H. Katagiri, K. Yane, T. Kitamura, H. Tsubata, and T. Nozaki: “Control for 2-DOF Electroaerodynamic Levitation Systems Considering Discharge Characteristics”, the 50th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 2024/11.
7. S. Yashita, H. Katagiri, T. Kitamura, and T. Nozaki: “Thrust Control with Switching in Electrodynamics Propulsion Systems with Corona Discharge”, The 2025 IEEE International Conference on Mechatronics, 2025/03. (投稿中)
8. H. Katagiri, S. Yashita, T. Kitamura, and T. Nozaki: “Investigation of Relationship between Electrode Integration Method and Force-to-Volume Ratio in Force Generation System Using Corona Discharge”, The 2025 IEEE International Conference on Mechatronics, 2025/03. (投稿中)