

2024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

コロナ放電を用いた多自由度回転アクチュエータの開発と制御

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。

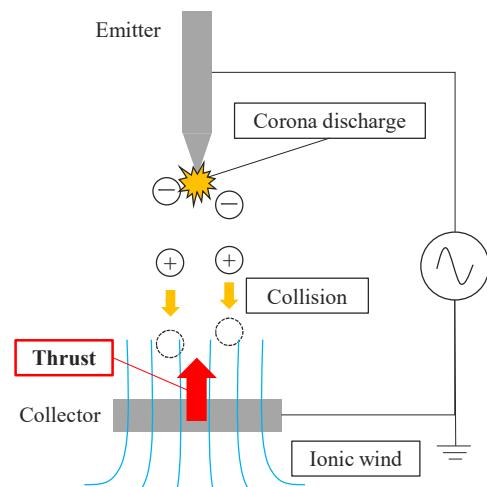


図1 コロナ放電による推力生成原理

3. 研究内容及び成果

本研究は I. 電極配置の最適化、II. 多自由度回転機構の製作、III. 制御アルゴリズムの開発と実装によって構成される。

I. 電極配置の最適化

コロナ放電を利用した EHD 推進システムでは、電極間距離を広げて電圧を高めると推力が増加する一方で、推力に寄与しないイオンが漏れ、推力効率が低下する問題があった。そこで本研究では、エミッタ上部に同電位で配置するガイド電極を新たに導入し、エミッタ周囲の電界をコレクタ方向へ集束させる構造を提案した。

COMSOL 解析では、ガイド電極により電界ベクトルがコレクタ方向へ揃い、電界強度が増加することを確認した。実験では、電極間距離およびガイド電極位置を変化させて推力を測定した結果、従来構造に比べ最大 36.6% の推力向上を確認し、推力-消費電力比も改善した。特にガイド電極とエミッタの距離を 30 mm とした場合に最も高い性能を示し、EHD 推進の高効率化に有効であることが示された。

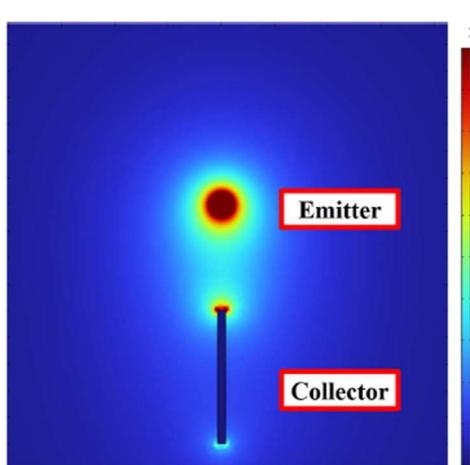


図 2 COMSOL を用いた解析結果

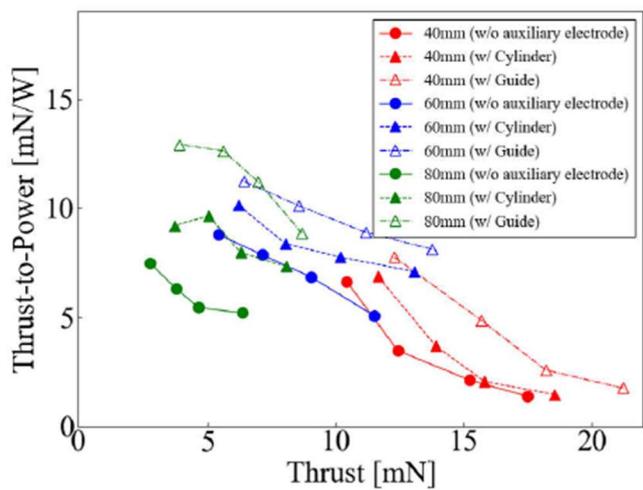


図 3 推力-電力比 ガイド電極により推力が向上することを確認(△)

II. 多自由度回転機構の製作

図 4 に示す 2 自由度回転機構を試作し、I で改善したガイド電極も外付けで実装した。EHD を用いた制御では、各軸で約 ± 2 度の回転運動を確認した。しかし、円軌道のような多軸が同時に関わる制御では、異なる方向の電界が干渉し、安定した制御が困難であった。

今後は、4 本の銅線電極の間にガイド電極を追加配置することで、不要な方向(90 度方向)への電界の発生を抑え、軸間干渉の軽減を図る予定である。

図4 製作した
2自由度回転機構



III. 制御アルゴリズムの開発と実装

EHD デバイスには、(1) 放電開始電圧によるデッドゾーン、(2) 過電圧によるスパーク遷移、(3) 放電自体の一次遅れ、(4) 昇圧電源の応答遅延、という制御上の課題が存在する。従来の PID 制御ではこれらを十分に扱えず、追従性低下や外乱による角度変動が問題となっていた。

そこで、直径 0.3 mm の銅線エミッタとアルミ箔コレクタを対向配置した 1 自由度拮抗型実験機を製作し、20-25 kV で周波数応答を測定した結果、システムが 3 次遅れ系で近似できることを確認した。

この特性を踏まえ、逆モデルに基づくフィードフォワード、電圧制限、遅れ補償付き外乱オブザーバ(DOB)を組み合わせた新しい制御方法を構築した。シミュレーションでは PID に比べ位相遅れを 85%、整定時間を 70% 短縮した。実験でも位相遅れ 93.4% 減、角度変動 35.3% 減、整定時間 67.5% 減と大幅な改善が得られ、EHD 推進システムに対して有効な制御であることが示された。

4. 今後の研究の見通し

本研究では、電極配置の改良、2自由度機構の試作、EHD特有の遅れを考慮した制御系の構築により、EHDアクチュエータの基盤技術を確立した。しかし、推力密度の増強、自由度間干渉の低減、環境変動に対するロバスト性など、実用化に向けた課題は依然として残されている。

今後は、ガイド電極のさらなる内蔵化・集積化を進め、推力の方向性をより精密に制御できる電界設計を目指す。また、電極配置の最適化と放電現象のモデル化を高度化し、推力の絶対値と効率の向上を両立させる。

加えて、現在1自由度で実証した遅れ補償付き制御アルゴリズムを多自由度系へ拡張し、軌道追従や協調動作が可能な高度制御へ発展させる。さらに、温湿度や電極劣化が放電特性に与える影響を考慮した適応制御やオンライン推定を導入し、環境変動に対しても安定動作可能な制御系の構築を進める。これらにより、多自由度EHDアクチュエータの実用化に近づき、静粛性が求められる家庭用ロボットや医療ロボットなど、多様な分野への応用が期待される。

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. 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 Access. (投稿中, Major revision)
2. R. Nonaka, H. Katagiri, S. Yashita, T. Kitamura, H. Tsubata, and T. Nozaki: "Proposal of Guide Electrode for Improving Thrust and Thrust-to-Power Ratio in Electroaerodynamics Propulsion System", IEEJ Journal of Industrial Electronics. (投稿中, Major revision)

国際会議(査読付)

3. S. Yashita, H. Katagiri, T. Kitamura, and T. Nozaki: "Thrust Control with Switching in Electrodynamic Propulsion Systems with Corona Discharge", The 2025 IEEE International Conference on Mechatronics, 2025/03.
4. 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.
5. R. Nonaka, H. Katagiri, S. Yashita, T. Kitamura, H. Tsubata, and T. Nozaki: "Thrust Improvement of Electroaerodynamics Propulsion System Using Guide Electrode", IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2025), 2025/03.