

2022年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	慶應義塾大学 新川崎先端研究教育連携スクエア ハプティクス研究センター
職位または役職	特任助教
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3自由度回転アクチュエータの開発

2. 研究目的

本研究では、多自由度駆動ロボットを製作する上で必要不可欠である3自由度回転球状関節をコロナ放電による推力生成原理を応用して開発することを目的とし、これを3自由度回転球状関節機構に適用し実機評価する。近年、少子高齢化や作業負担軽減のために工場や家庭で使用できるロボットの開発が望まれている。そこで、モータの性能向上、3Dプリンタによる部品製作難易度の軽減により様々なアクチュエータが開発されているが、一方で肩関節のような多自由度回転関節は1自由度モータの多段構成により設計するのが一般的である。しかし、モータの多段構成は占有体積が大きくなり、装置の巨大化、制御の不安定化を招く要因となる。そこで本研究では、コロナ放電による推力生成原理を用いて3自由度回転球状関節の開発を行う。複数の電極を並列に並べることで疑似的な平行リンクマニピュレータとして扱うことができ、装置の巨大化を防ぎ、かつ単純な3軸制御系とみなすことで制御性能も高くなる。従って、本研究ではコロナ放電による3自由度回転球状関節機構の開発と定量的な性能評価を行う。本研究の成果によりこれまで困難とされてきた球状関節の製作が可能となり、アクチュエータ開発の加速が期待される。

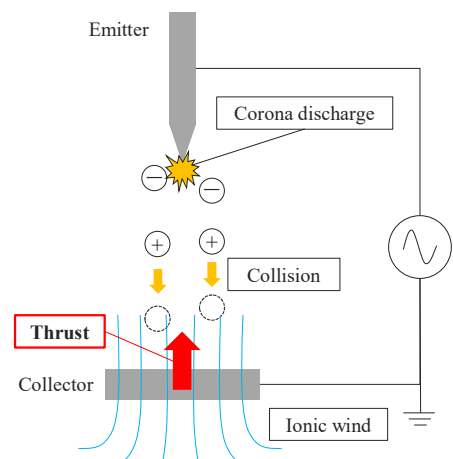


図1 コロナ放電による推力生成原理

3. 研究内容及び成果

①3 自由度回転球状関節機構の製作

本研究では 3D プリンタによって図 2 に示す 2 自由度回転機構を製作した。当初の目的は 3 自由度回転機構の製作であったが、ロール方向の回転運動がコロナ放電により生成することが困難であり、かつロール方向を制御するモータは専有面積が小さいためコロナ放電で 2 自由度の回転動作を行う機構の製作とした。試験的に 1 自由度の運動をコロナ放電により生成した様子を図 3 に示す。図からわかるように、今回製作した装置のように軽量のものであればコロナ放電により駆動可能であることを確認した。



図 2 試作した 2 自由度回転機構

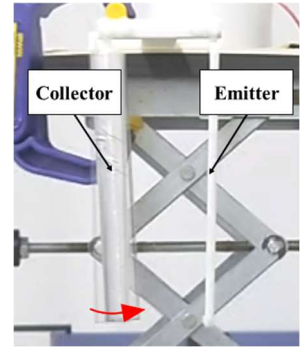


図 3 1 自由度回転動作

②導通/開放制御回路の製作

図 4 に示すようなフォトカプラによりコレクタ側を絶縁する回路により制御を試みた。しかし、フォトカプラへの発光側電圧を 0 V にした際に受光側の電圧が上昇することが確認された。エミッター電極への印加電圧が 20 kV の際に 1 ms の OFF 時間で受光側の電圧はおおよそ 70 V まで電圧が上昇したが、フォトカプラの耐圧が 80 V であったため実験を中止した。kV オーダーの電圧がエミッターに印加された場合には数 cm 離れたコレクタ電極と電子の移動が発生し、発光側が OFF の場合には電圧が上昇したものだと考えられる。従って、コロナ放電により推力を制御する場合には電子の移動を阻止する、もしくは全てのエミッターだけでなくコレクタの電圧も制御する仕組みを考案する必要性があることを確認した。

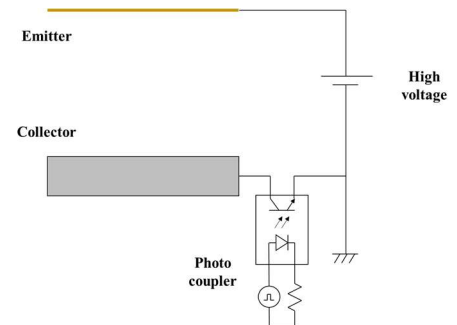


図 4 フォトカプラによる絶縁回路

③3 自由度回転動作制御の実装、実機検証

図 2 で示したように 1 本のコレクタ電極に対して数本のエミッター電極を使用する場合には干渉が発生することが懸念された。そこで図 5、6 に示すように 1 本のコレクタ電極に対して 2 本のエミッター電極を垂直に配置、水平に配置した場合の発揮力を計測した。図 7、8 に印加電圧と発揮力の関係性を示す。なお、図 7 の結果は水平方向と鉛直方向の力の絶対値である。図 8 の結果では水平方向のみにしか力は生成されないため水平方向の力の大きさである。また、青線と緑線は片方のエミッター電極に電圧を印加した場合の結果であり、赤線は両方のエミッター電極に電圧を印加した場合の結果である。黒線は青、緑線の和である。結果から、エミッター電極を垂直に配置した場合には 2 本のエミッター電極に電圧を印加した場合に発揮力は重ね合わせにならず、減少することを確認した。これは図 9 に示すように干渉によって電界の向きが変わり、他方へ反発する向きに力を生成したためであると考察した。図 6 のように水平にエミッター電極を配置した場合には干渉が生じないため、発揮力は重ね合わせとなることを確認した。

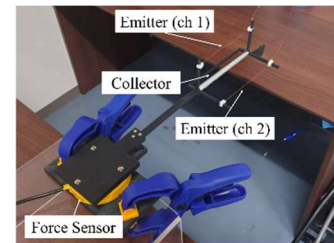


図 5 実験装置 (鉛直配置)

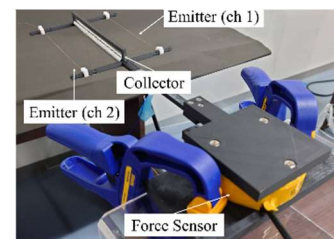


図 6 実験装置 (水平配置)

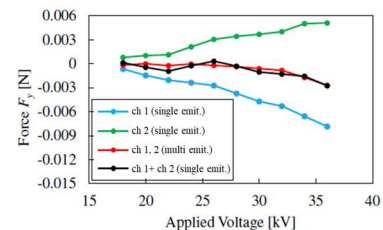
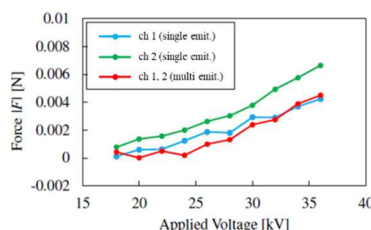


図 7 電圧一力特性 (鉛直配置) 図 8 電圧一力特性 (水平配置)

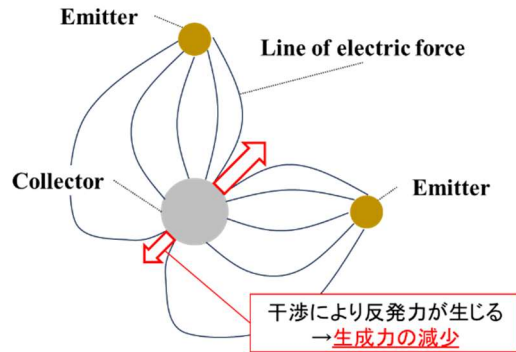


図 9 鉛直配置で力が減少する理由

4. 今後の研究の見通し

2022 年度の研究を通じてコロナ放電による3自由度回転アクチュエータの製作が可能であるという示唆を得た。ただし、ロール方向の回転は電気モータなどによって構成される。その上で 3. でも述べたようにいくつかの課題が明確になった。

① 発揮力の調整手法の検討

高電圧システムであるがゆえに従来のモータと同様のトランジスタや MOSFET を用いた制御は困難であることを確認した。従来研究では電圧の大きさを調整することによってコロナ放電により生成される推力の制御が行われている[Yashita *et al.*, 2023]が、高電圧装置は価格・専有面積ともに大きいため好ましくない。特に本システムでは2自由度を制御する際には少なくとも4つの電源が必要となる。装置構成の工夫もしくは電気的な作用によりコレクタ電極へ電子の移動が生じないシステムを考案する。

② システムのモデル化

従来研究において EHD で生成される推力は電流に比例することが確認されている[A. J. Conesa *et al.*, 2019]。一方で伝達関数、すなわち動特性のモデルは確立されていない。動特性モデルを推定することで制御性能は向上することが期待される。また、2自由度回転機構を製作する際にはモデルに干渉の項を付与する必要がある。第1に線形モデルでの近似を試み、精度が得られない場合は非線形モデルでの同定に取り組む。

③ モデル化による制御性能の向上

②で得られる結果をもとに2自由度の回転動作の制御に取り組む。加えて、推定したモデルを基に外乱オブザーバを用いた制御系を構築し、高精度な位置制御・力制御を実装する。制御性能・重量・騒音の面から他のモータとの比較を行い、コロナ放電を用いたモータの優位性及び実用性を確認する。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

国際会議(査読付)

1. T. Kitamura, H. Katagiri, S. Yashita, Y. Saito, H. Asai, K. Ohnishi, and T. Nozaki: “Verification of Anode Position and Generated Force Vector of EHD at Wire-cylinder Electrode”, the 32nd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2023.