

## 2018年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関名	筑波大学
職位または役職	准教授
氏名	境野 翔

### 1. 研究題目

広帯域・高バックドライバブルな電気静油圧アクチュエータの開発

### 2. 研究目的

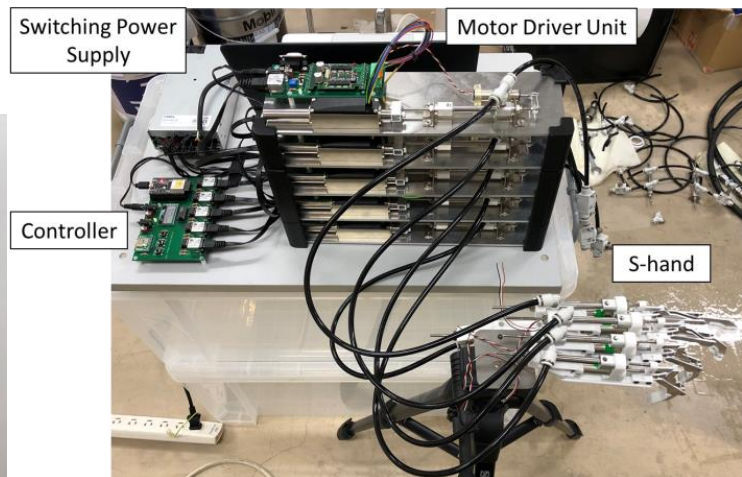
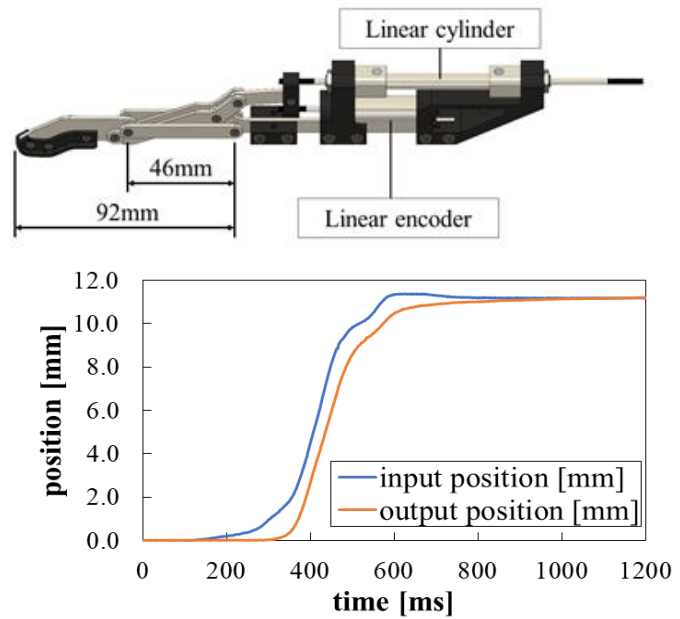
人間支援ロボットには軽量かつ高速制御可能であることが要求されるが、これらを満足するアクチュエータは存在しなかった。一方、研究代表者は静油圧を用いてポンプとアクチュエータのトルクを変換する電気静油圧アクチュエータ(EHA)を用いることで出力重量比と制御速度を両立可能であると示し、過去2年の永守財団の研究助成により、油圧ポンプと油圧モータの位置・力応答の計四者を統合することで、EHAの広帯域な位置制御と力制御に成功した。

一方、人間支援ロボットにおいて外力に倣う能力、バックドライバビリティ、を向上させることが安全性の担保に必須であることが近年必須の要件となり始めている。過去2年に研究した力の計測制御技術で一定のバックドライバビリティを獲得することには成功したが、さらなるバックドライバビリティの向上には静止摩擦やバックラッシのような非線形性についてハードウェアからの対策が必須である。そこで本研究課題では、低摩擦、低バックラッシの電気静油圧アクチュエータを開発し、さらなる広帯域化と高いバックドライバビリティを両立できるアクチュエータを獲得することを目的とする。

電気静油圧アクチュエータの摩擦やバックラッシは、油圧モータと油圧ポンプ、それぞれにおいて発生する。油圧モータの摩擦やバックラッシについては、ベーンモータを用いれば良いことが既に先行研究で知られている。しかし、ベーンモータは回転型であるためハンド型ロボットのように多数のリンクが隣接するロボットの関節上に配置すると、手指の関節同士が物理的に干渉してしまう。よって、人間の手指のように関節と離れたところから駆動可能であり、なおかつ摩擦やバックラッシの少ないアクチュエータが必要である。そこで本研究課題では、摩擦やバックラッシがほとんどない直動型の油圧シリンダの推力をハンドロボットの手指の関節に伝達する機構を開発し、ハンドロボットに使用可能な小型な油圧モータを確立する。

### 3. 研究内容及び成果

本研究では空気圧シリンダを油で駆動することにより、ロボットハンドに適した小型油圧アクチュエータになることを見出した。これを用いて右図の交差式四節リンク機構を空気圧シリンダにより駆動するフィンガロボットを開発した。一つのシリンダで複数の関節を駆動することが可能であり、バックラッシュがなくロスのない力の伝達を行える機構である。2つのシリンダをそれぞれポンプとアクチュエータとすることでEHAとしたときのポンプ(入力)とアクチュエータ(出力)の変位の応答を右図に示す。その結果、定常状態ではほぼ応答が一致していることからわかるように容積効率 99.3%の非常に高い効率を実現できた。下図に示すように、このフィンガロボット 5本からなるロボットハンド(S-hand)をあわせて開発した。

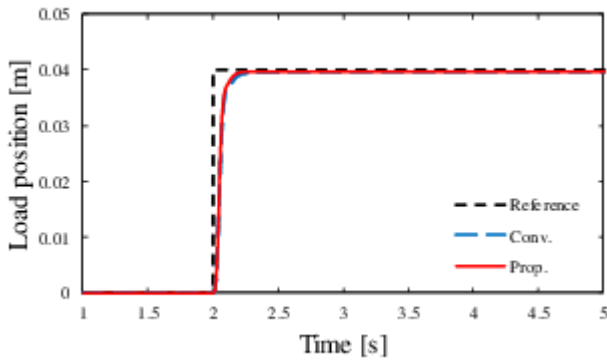
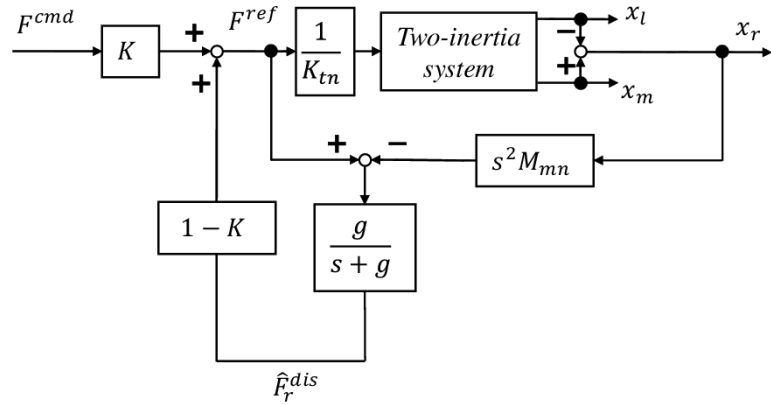


しかし、非常に容積効率が高まった結果、駆動時の圧力の急減少に伴い液中の気体が蒸発するキャビテーションを誘発し、大きな圧力損失が生じてしまった。結果として高いバックドライバビリティを獲得できなかったばかりか、位置制御の応答速度も非常に遅かった。

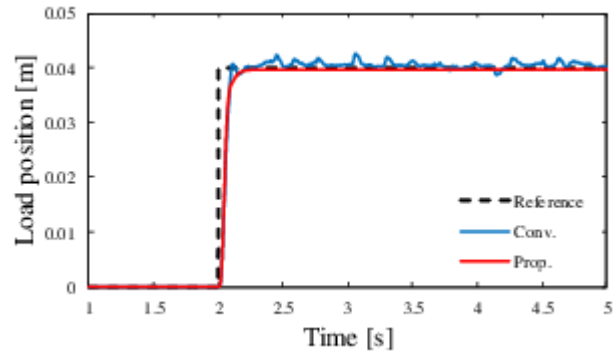
一方、制御系のさらなる改良にも着手している。2つの慣性体が圧縮性のある物体で連結されているシステムを二慣性共振系とよび、EHAの場合では油圧ポンプと油圧モータが圧縮性のある作動油によって連結されている。2慣性共振系は4次システムで表され共振を持つ系である。そのため、フィードバックゲインを共振周波数より高く設定するとモデル化誤差により容易に不安定化してしまうことが知られており、制御帯域が共振周波数で制限されていた。過去2年の永守財団の研究においてもこの制限を超えることはできておらず、長らく二慣性共振系の未解決問題であった。

そこで、本研究課題では2つの慣性体の相対位置に着目して制御系を構成した。相対位置のみを見るとバネ-マス系で記述される2次系であるためモデル化誤差に非常に強く、センシング性能の限界までフィードバックゲインを高くすることができるようになり、共振周波数以上のフィードバックゲインを設定可能になる。よって、相対座標系において外乱オブザーバを構成し、相対座標系における慣性が小さくなるようにフィードバック制御をかけることで、共振周波数を本来の共振周波数より高くできることをあきらかにした。

右図に提案手法のブロック線図を示す。ポンプ側の位置応答  $x_m$  と油圧モータ側の位置応答  $x_l$  の差分を用いることで相対位置を計算として 2 慣性共振系を 2 次系とし、共振周波数を越えた外乱推定を行う。得られた外乱値を  $K$  を用いてフィードバックすることで、共振周波数を  $\sqrt{K}$  倍高くできる。



(a) モデル化誤差なし



(b) モデル化誤差あり

実験結果を上図に示す。破線が指令値、青線が従来手法、赤線が提案手法である。モデル化誤差がない場合、従来手法も提案手法も非常に良好な応答を示しているが、モデル化誤差があった場合(モデルの質量を真値の 1.5 倍とした)、従来手法では非常に振動的な応答となったが、提案手法ではほとんどモデル化誤差の影響を受けていないことがわかる。よって、共振周波数を越えるフィードバックを実現できることが確かめられた。

#### 4. 今後の研究の見通し

現在はキャビテーションの問題の解決に特に注力している。まず、キャビテーションを起こしてしまった一番の原因はチャージ圧、すなわちポンプが駆動していないときの作動油の圧力、を高く設定していなかったことにある。チャージ圧とポンプの駆動によって得られる圧力の差が作動油の飽和蒸気圧を下回ったときに作動油が蒸発して気化することがキャビテーションであるため、チャージ圧を高めればそれだけキャビテーションを予防できる。しかし、本研究で用いたような空気圧シリンダではせいぜい耐圧が 1 から 2MPa 程度しかないものがほとんどであり、不十分である。一方、油圧シリンダは大型のものが多く JIS では内径 35mm 以上のシリンダしか規定されていない。

これらの問題を解決する油圧シリンダとして、H-MUSCLE 社の小型低摺動シリンダを用いて、今後 S-hand の改良を行う予定である。同社のシリンダは内径 20mm かつ耐圧 35MPa であり、さらに推力/質量比も通常の油圧シリンダと比較して 4.4 倍と非常に高い。よって、キャビテーションを予防するのに十分な性能を持っているばかりでなく、ハンドロボットの小型軽量化にも貢献できる。

#### 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

国際会議(査読付)

Kenta Araake, Sho Sakaino, and Toshiaki Tsuji: “Design of Resonance Ratio Control with Relative Position Information for Two-inertia System,” IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2019.