

2017年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関名 (大学、大学院、研究所名)	埼玉大学大学院理工学研究科
職位または役職	助教
氏名	境野 翔

1. 研究題目

二慣性共振特性を考慮した油圧モータの力制御

2. 研究目的

医療や介護で期待される装着型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、研究代表者は閉回路方式で油圧モータを駆動すれば、出力重量比と制御速度を両立可能であると示した。サーボ弁を用いない閉回路方式ではサーボモータと油圧ポンプからなる駆動側が、負荷側である油圧モータを作動油を介して直接制御する。しかし、作動油の圧縮性により共振が誘発され制御を困難にしていた。特に環境や人との柔軟な接触に必須である力制御においては、接触対象物のモデルが事前には不明であるため高速高精度な計測制御が不可欠である。閉回路方式の油圧モータでは、共振を陽に考慮しなければ力のセンシングもその制御も困難であり、油圧モータを人間支援ロボットのアクチュエータとすることは困難である。そこで、初年度の研究では閉回路方式の油圧モータの動特性の解析に成功したため、このモデルに基づいた力センサレスの反力推定と高速高精度な力制御を実現することを2年目の目標とする。

まず、負荷側の圧力センサ情報・駆動側のセンサレス反力情報・負荷側と駆動側双方の位置センサ情報を統合することで、二慣性共振特性を考慮した高精度反力推定法を確立する。実際の圧力情報には多くの非線形成分が重畳されていると予想されるため、非線形性を陽に考慮したモデリングを行うことでこれを解決する。次に、負荷側と駆動側の位置ずれより油の動的な圧縮を計測することで、共振を抑制した広帯域力制御系を実現する。初年度に確認できたように線形化補償を行った油圧モータには通常二慣性共振系における制御系を転用可能である。この二慣性共振特性を考慮して駆動側・負荷側の位置・力情報の四者を利用することで油圧モータにおける広帯域油圧力制御系を確立する。

3. 研究内容及び成果

初年度の研究において二慣性共振特性を考慮した反力推定を実現していたが、圧力からトルクまでの効率の非線形性についてはあきらかにしていなかった。「入力トルク=慣性力+圧力×効率」で示されるため、正しい効率がわからなければ力制御の性能が劣化してしまう。そこで、効率を負荷側と駆動側の回転速度差の2次関数としてモデル化し重回帰分析により係数を求めた。その結果いずれの係数のp値が0.05以下となる非常に精度

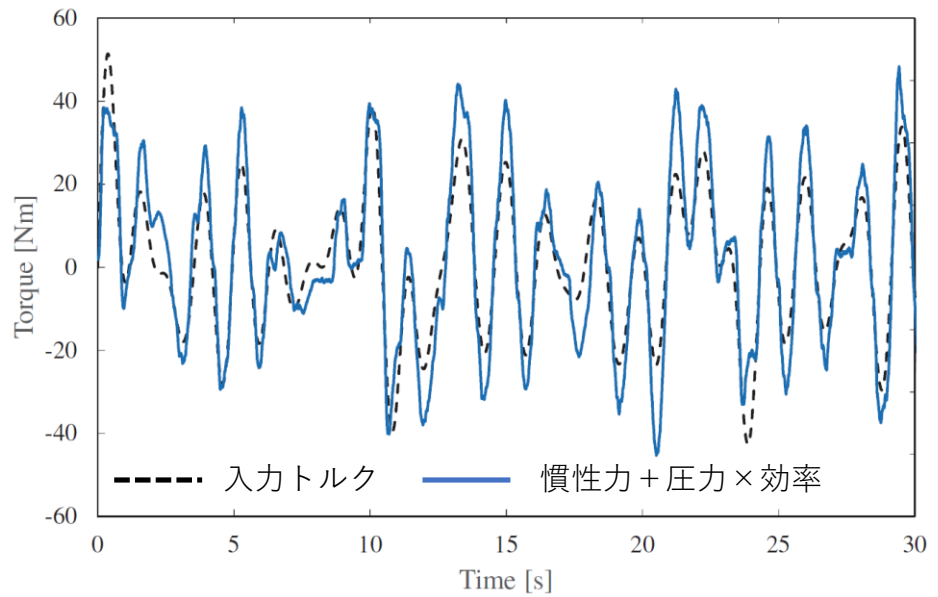


図 1. 圧力効率の推定

の高い効率のモデルを得た。図 1 に上式における左辺である入力トルクを黒破線で、右辺を青実線で示す。効率の非線形性を考慮したことで非常に高い確度で両線が一致していることがわかる。

二慣性共振系において、入力トルクから出力トルクは 4 次系で記述される共振の影響を受ける系である。これは非常に制御系設計が困難であるため好ましくない。そこで本研究課題では、反力トルクとほぼ同等の値となる軸ねじれトルクを制御した。軸ねじれトルクは入力トルクから 2 次系で記述される系であるため簡易な制御系で高い制御性能を実現できる。閉回路方式の油圧システムにおいては軸ねじれトルクは圧力に相当するため、「入力トルク=慣性力+圧力指令値×効率+圧力 PI 制御」で記述される圧力制御系を提案した。慣性力の補償や圧力 PI 制御自体は広く知られた制御系であるため、提案手法の優位性は圧力指令値×効率で記述されるフィードフォワード項にある。この効率に上記で求めた非線形モデルを用いることで、特に負荷側と駆動側の回転速度差が大きくなるときに優位性が顕著になる。図 2 に提案した圧力制御系を用いた際の圧力応答を示す。黒破線が振幅 0.1MPa の正弦波指令値、青実線が提案手法を用いた際の応答、赤実線が効率を一定とした従来手法を用いた際の応答を示す。提案手法を用いることで大幅に追従誤差を低減できたことがわかる。これは油圧システムのような力フィードバックゲインを上げづらいシステムにおいては特にフィードフォワード項が支配的になるためであり、適切なフィードフォワードモデルを作ることによって油圧システムであっても良好な力制御が実現できるのである。

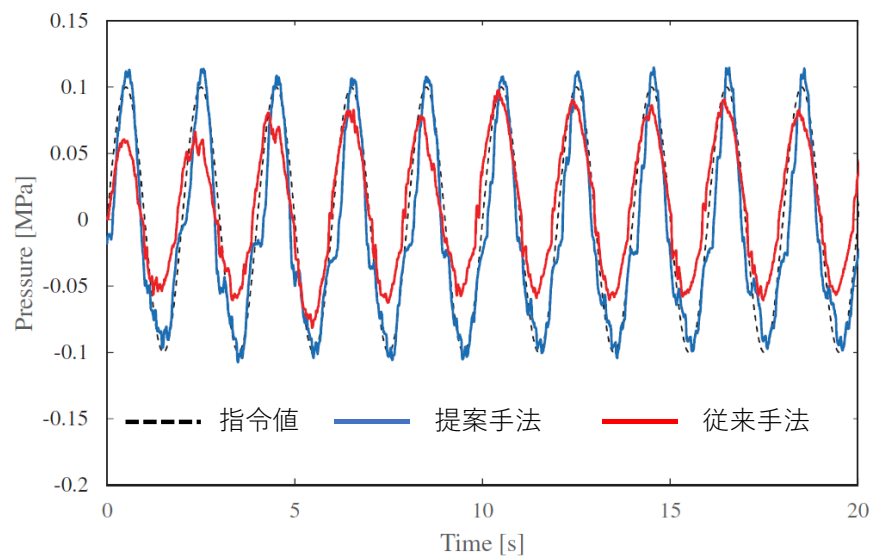


図 2. 圧力制御応答

4. 今後の研究の見通し

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、さらなる広帯域と高バックドライバブル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、人間の手を代替できるハンド型ロボットの関節上に配置できる小型モータは存在していなかった。よって、本研究課題ではハンドロボットに使用可能な小型な油圧モータを開発する。

また、油圧ポンプにおいては油圧シリンダを用いることで摩擦とバックラッシを大幅に低減できることが知られている。そこで本研究課題では、油圧シリンダと直動モータをカップリングすることで直動油圧ポンプとし、高いバックドライバビリティを獲得する。しかし、回転型の油圧ポンプと異なり、直動型の油圧シリンダは可動範囲が限定されているため、作動油の漏れにより原点がドリフトし可動箇所の限界に到達してしまう恐れがある。よって、ドリフト補償装置も新たに開発することでこの問題を解決する。

5. 助成研究による主な発表論文, 著書名

<学術論文誌>(査読あり)

1. **Sho Sakaino**, Tomoki Sakuma, Toshiaki Tsuji: “A Control Strategy for Electro-hydrostatic Actuator Considering Static Friction, Resonance, and Oil Leakage,” IEEJ Journal of Industry Applications, 2018. (Accepted for publication) 18.
2. Kodai Umeda, Tomoki Sakuma, Kenta Tsuda, **Sho Sakaino**, Toshiaki Tsuji: “Reaction Force Estimation of Electro-hydrostatic Actuator Using Reaction Force Observer,” IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 7, No. 3, pp. 250-258, 2018.

<国際会議>(査読あり)

1. Kota I, Kodai Umeda, Kenta Tsuda, **Sho Sakaino**, Toshiaki Tsuji: “Force Control of Electro-Hydrostatic Actuator Using Pressure Control Considering Torque Efficiency,” in Proceedings of the 15th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 385-390, 2018.
2. Kenta Tsuda, Kodai Umeda, Kota I, **Sho Sakaino**, Toshiaki Tsuji: “Analysis on Rigidity of Hydraulic Hoses for Electro-hydrostatic Actuators,” in Proceedings of the 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 2828-2833, 2017

<国内会議>(査読なし)

1. 荒明健太, 梅田滉大, 津田賢汰, 井航太, **境野翔**, 辻俊明, “電気静油圧アクチュエータを用いた2自由度ロボットアームの共振抑制制御,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018, 2P1-H15, 北九州, 6月5日, 2018.
2. **境野翔**, 辻俊明, “電気静油圧アクチュエータの全状態フィードバック制御,” 平成29年度電気学会産業応用部門大会講演論文集, 2-S6-3, 函館, 8月29日-31日, 2017.
3. Koudai Umeda, Kouta I, Kenta Tsuda, **Sho Sakaino**, Toshiaki Tsuji, “Verification of Pressure Dissipation for Force Control Using Electro-Hydrostatic Actuator,” メカトロニクス制御研究会・実世界ハプティクス, MEC-17-004, 東京, 9月22日, 2017.