

2016 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

駆動側・負荷側における位置・力センサを用いた油圧モータの共振抑制制御

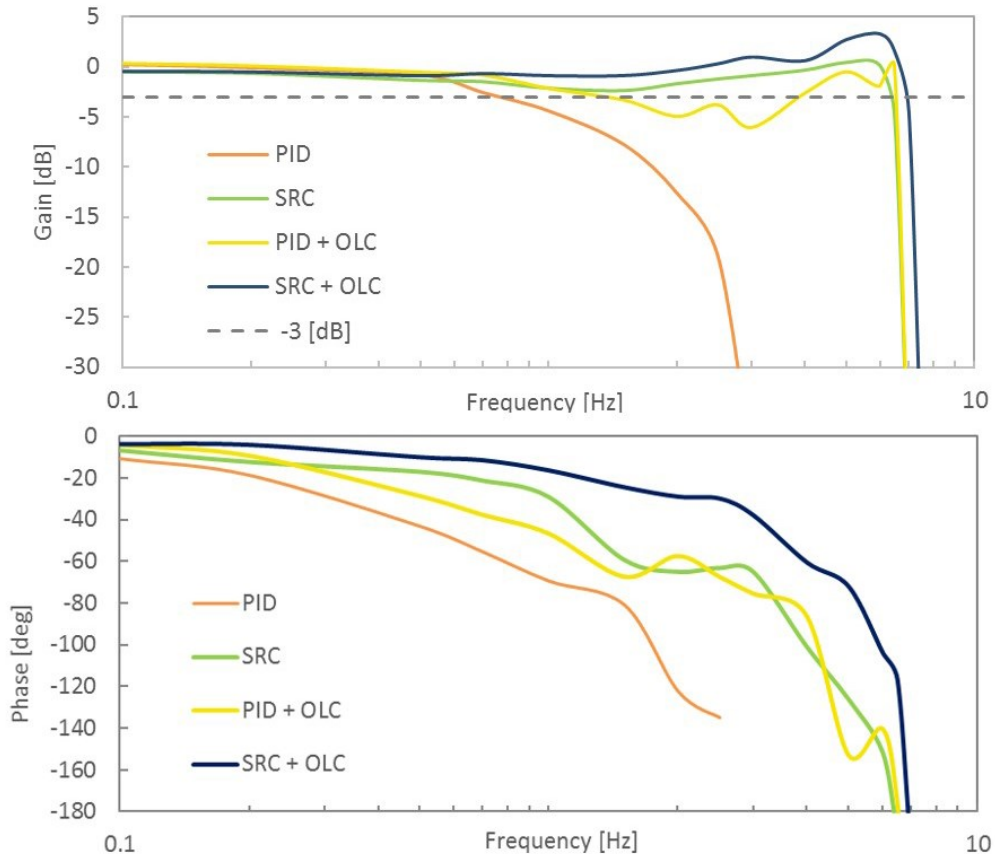
2. 研究目的

医療や介護において、負荷を軽減する装着型ロボットが注目を集めている。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、これらを同時に満たす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。閉回路方式では制御弁等が不要であり、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。よって、油圧システムの大幅な小型化ができるだけでなく、サーボモータと同じ制御周期で制御可能であるため高速制御も両立できる。研究代表者はこれまで、十分な摩擦補償を施せば閉回路方式は作動油の圧縮性により共振が誘発される二慣性共振系でモデル化できることを世界で初めて実証していた。すなわち、油圧システムがメカニカルギアと等価であることを見出した。これまで、電気モータの分野でメカニカルギアの共振を抑圧する手法は多く提案されているため、それらを油圧システムへ適した形で応用することで閉回路方式の油圧システムの大幅な広帯域化が望める。

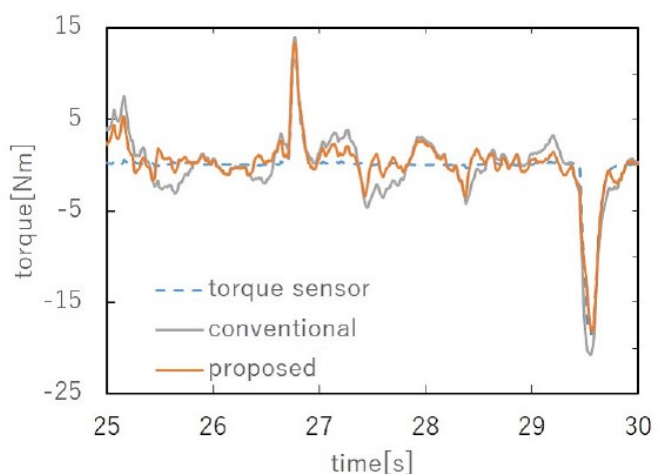
そこで本研究では、閉回路方式の共振を抑圧するために、複数のセンサを用いて制御性能を向上させることを提案する。負荷側のみに位置・圧力センサを実装するのではなく、駆動側にも位置センサを実装する。駆動側力情報はサーボモータでセンサレス推定する。すると、駆動側と負荷側の圧力差が油圧システムの効率低下に相当するためこれを用いて効率の低下を補償することで、油圧システムを線形化することを狙う。一方、駆動側と負荷側の位置ずれにより油の動的な圧縮を計測し、共振を抑制する制御系を設計することで油圧モータの高速・高精度な制御を実現する。油圧システムにおいて二つの位置情報を用いた制御自体が珍しいが、二つの力情報をも用いた例は存在しない。本研究により安価な位置センサと圧力センサを適切に使用することで出力重量比と制御性能を両立したアクチュエータを初めて獲得できる。

3. 研究内容及び成果

申請時に予定したように、静止摩擦を補償するフィードバック変調器を実装することでシステムを線形化し、二慣性共振系として制御した。本研究課題においては、駆動側と負荷側の重心を制御することで共振を不可観測化し、共振の影響を抑圧できる自己共振相殺制御(SRC)により制御性能の向上を図った。また、作動油の漏れを補償する制御(OLC)も実装し評価した。下図に周波数特性を示す。横軸が周波数、縦軸が指令値から応答値までのゲインと位相である。共振を陽に制御モデルに利用し、複数のセンサで重心位置を計算して制御することで作動油の圧縮による位相遅れが大幅に回復されたことがわかる。



以上のように、当初の研究目的を比較的速やかに達成したため、次年度の目的である力制御の準備として、閉回路方式の油圧システムの力計測手法も開発した。油圧システムは速度依存の摩擦等の非線形要素が存在するため、圧力センサを用いるだけでは正確な反力推定は不可能であった。そこで、本研究課題では、負荷側の位置、速度、加速度情報をも利用することで反力推定性能を向上させた。右図が実験結果である。縦軸がトルク、横軸が、時間、破線が真値、橙線が提案手法、灰線が従来手法での推定値である。反力のピーク時と、フリーモーション時に特に推定精度が改善され、反力推定の平均二乗誤差を4割弱低減することに成功した。



4. 今後の研究の見通し

初年度の研究により、油圧閉回路システムにおける二慣性共振特性を考慮した位置制御系を実現し、油圧システムの非線形要素のモデリングにも成功した。よって、2 年目は力制御系の研究に従事する。

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。次に、負荷側と駆動側の位置ずれより作動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ため、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。例えば横倉らによって提案されている二慣性共振系におけるねじれトルク制御を実装する。

また、その他の未解決問題として多自由度化がある。本研究で用いた実験機は一自由度のロボットであったが、実際のロボットは多自由度系である。多自由度系になれば二慣性共振系でモデル化される各関節の油圧閉回路同士が連成振動し、制御帯域を狭くすることが予想される。具体的には一自由度の二慣性共振系は 4 つの状態変数で記述されるが、例えば二自由度の二慣性共振系は 8 つの状態変数で記述され、制御系設計が困難になるだろう。高次系における位置制御系の設計論は電気モータの分野を含めても十分議論されておらず、高次系の力制御となればほとんど研究報告例がない未踏の領域である。よって、最終年度には高次系での制御系設計論をあきらかにすることを目標とする。

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. Tomoki Sakuma, Kenta Tsuda, Koudai Umeda, **Sho Sakaino**, Toshiaki Tsuji: “Modeling and Resonance Suppression Control for Electro-hydrostatic Actuator as a Two-Mass Resonant System,” Advanced Robotics, pp. 1-11, 2017.
2. Kenta Tsuda, Tomoki Sakuma, Koudai Umeda, **Sho Sakaino**, Toshiaki Tsuji: “Resonance-suppression Control for Electro-Hydrostatic Actuator as Two-inertia System,” IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 6, No. 5, pp. 320-327, 2017.
3. **Sho Sakaino**, Takayuki Furuya, Toshiaki Tsuji: “Bilateral Control between Electric and Hydraulic Actuators Using Linearization of Hydraulic Actuator,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 64, No. 6, pp. 4631-4641, 2017.

<国際会議>(査読あり)

1. **Sho Sakaino**, Toshiaki Tsuji: “Oil Leakage and Friction Compensation for Electro-Hydrostatic Actuator Using Drive-side and Load-side Encoders,” in Proceedings of the 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 5088-5093, 2016.
2. Kenta Tsuda, **Sho Sakaino**, Toshiaki Tsuji: “Bilateral Control between Electric and Electro-Hydrostatic Actuators Using Feedback Modulator,” in Proceedings of the 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 506-511, 2016.

<国内会議>(査読なし)

1. 井航太, 佐久間智輝, 梅田滉大, 津田賢汰, **境野翔**, 辻俊明, “電気性油圧アクチュエータのトルク効率と内部漏れ流量のモデリング,” ROBOMECH2015, 2P1-E04, 5 月 10-13 日, 2017.