報告日： 2020 年 10 月 26 日

報告者： 筑波大学 システム情報系
准教授 境野 翔

１． 研究概要

（和文）

(1) 課題名（日本語）

電気静油圧アクチュエータの高精度制御のための作動油漏れ補償

(2) 研究者氏名、職名

境野 翔、准教授

(3) 研究概要（日本語）

電気静油圧アクチュエータは、サーボモータと連結したサーボポンプにより直接油圧アクチュエータを駆動する油圧システムであるため小型高出力、かつ制御弁と油圧タンクが不要という優れた特性を持つため、ロボット向けアクチュエータとして注目を集めている。しかし、作動油の漏れの影響により制御性能が劣化していた。よって、本研究課題では、ポンプとアクチュエータの応答の差を計測することにより作動油の漏れを計測し補償する制御系を提案した。

(4) キーワード

電気静油圧アクチュエータ、漏れ補償、位置制御、力制御、モーションコントロール

（英文）

(1) Research title

Oil Leakage Compensation for High Precision Control of Electro-hydrostatic Actuator

(2) Name of researcher with title of position

Sho Sakaino, Associate Professor

(3) Summary

Electro-hydrostatic actuators are hydraulic systems that drive a hydraulic actuator directly by a servo pump connected to a servomotor, which makes it compact and high-powered, and it has excellent features such as no need for a control valve and hydraulic tank. However, control performance is deteriorated due to hydraulic oil leakage. In this research, a control system to measure and compensate for the leakage of hydraulic oil by measuring the difference between the pump and the actuator is proposed.

(4) Key Words

Electro-hydrostatic Actuator, Oil Leakage Compensation, Position Control, Force Control, Motion Control

２．本研究の意義・特色

小型高出力かつ制御性能の高いアクチュエータを開発することはロボット研究の最大の課題と言っても過言ではない。これまでの研究代表者の研究により電気静油圧アクチュエータはそれを満足するアクチュエータであると期待できることがわかってきたが、作動油の漏れの影響により満足な制御性能を得られていなかった。

よって、本研究課題では。油圧ポンプ側と油圧モータ側の双方の位置センサの応答のずれより容積効率を、サーボモータ側でのセンサレス反力推定情報と油圧モータ側での圧力センサ応答よりトルク効率を推定する。二つの位置情報を用いた制御系自体は珍しいものではないが、二つの力情報をも用いる制御系は非常に珍しく、これまで油圧以外の、例えば電気モータの研究分野においてもほとんど見られない。これは出力段の力を検出するトルクセンサは一般に非常に高価かつ剛性が低く、出力段での力を直接検出できる現実的な方法がなかったからである。一方、油圧システムにおけるトルクは圧力センサを用いることで非常に容易かつ安価に検出することができる。ゆえに、位置・力情報の 4 者を用いた制御系は EHA 以外では現実的ではなく本研究課題によって初めて実用的になることに意義と特色を有する。

３．実施した研究の具体的内容、結果

本研究課題は、作動油の漏れを内包した電気静油圧アクチュエータの動特性をモデリングすることから開始した。研究代表者がこれまで実証したように、電気静油圧アクチュエータは作動油の圧縮性に起因する共振を有する二慣性共振系である。しかし、研究を進めていくうちにこのモデルで考慮していなかった作動油の漏れの影響が圧力差に大きく影響を与えることがわかった。よって、本研究課題では作動油の漏れを油圧ポンプと油圧モータ間の速度差に比例するとしてモデル化し、二慣性共振系に修正項を加えた。その結果、重相関 0.98 以上の非常に高い確度で電気静油圧アクチュエータを同定できることがあきらかになった[発表論文 2]。

次に、このモデルに基づき位置制御系を構成した。二慣性共振系は電気モータ制御の分野で広く知られているモデルであり、剛体として制御すると振動を誘発してシステム全体が不安定になることが解明されている。これまでの二慣性共振系の研究において、共振を不可観測化し剛体モードにのみ高いフィードバックゲインを実装することで広い制御帯域を獲得する自己共振相殺制御などが有用であることが知られている。しかし、電気静油圧アクチュエータでは、作動油の漏れがあるためモデル化誤差が大きくそのままでは自己共振相殺制御を実装することはできない。通常のモーションコントロールでは外乱オブザーバと呼ばれる制御器を実装するとモデル化誤差に対して頑健になることが知られているが、二慣性共振系に外乱オブザーバを実装すると共振の影響で容易に不安定化してしまう。そ

こで、こちらについても共振の影響のない剛体モードにのみ外乱オブザーバを実装する自己共振相殺外乱オブザーバを実装することで作動油の漏れを計測・補償した。しかし、これら 2 つの制御系を実装してもまだ不十分である。それは、電気静油圧アクチュエータは静止摩擦が大きいため、低速時の制御性能が劣化するからである。なぜならば電気静油圧アクチュエータは油圧ポンプと油圧モータが直接作動油を介してカップリングされているため、双方の静止摩擦の和が動作に影響する。よって、油圧モータの静止摩擦だけが問題となる通常の油圧システムよりその影響が顕著である。そこで、静止摩擦を補償するために、必ず最大静止摩擦力以上の入力を与え、その量子化誤差をフィードバックして補償するフィードバック変調器を合わせて実装することで静止摩擦に対処した。以上のように、自己共振相殺制御、自己共振相殺外乱オブザーバ、フィードバック変調器の三者を組み合わせることで、従来と比較して 3 倍以上の位置制御帯域を実現した[発表論文 1]。この結果は高く評価され、2020 年度電気学会産業応用部門論文賞を受賞した。

また、作動油の圧縮や漏れを考慮した力制御の実現にも注力した。それにあたりまずは、トルクセンサレスでの反力推定法を開発した。力制御系において作動油の漏れはバックラッシと等価の影響を与える。なぜならば、油圧モータに外部から力が印加されたとしても油圧ポンプまで完全には伝達しないからである。すなわち、このバックラッシは油圧モータと油圧ポンプの速度差として計測できる。よって、速度差がゼロとなるようにフィードバックをかけることで作動油の漏れの影響を低減した。また、力制御時においても電気静油圧アクチュエータの静止摩擦は大きな影響を与える。よって、こちらもフィードバック変調器を実装することで静止摩擦の影響を除去した。最終的に作動油の漏れと静止摩擦の影響を除去した系において、油圧ポンプ側での駆動トルクと差圧の情報を用いることで、トルクセンサレスでの反力推定が実現できる。提案手法を用いることにより、差圧のみを用いた単純な反力推定法と比較してトルク推定誤差を 1/3 程度に低減することに成功した[発表論文 3]。

次に、推定された反力を利用した力制御系を実現した。先に述べたとおり、電気静油圧アクチュエータは二慣性共振系であるため、力制御系も容易に振動してしまう。そこで、油圧ポンプ側の慣性を相対的に小さくし振動しやすくすることで、油圧モータ側の振動を小さくする共振比制御を実装することで安定化を図った。共振比制御を実装する際にはバネのねじれトルクに相当する力をフィードバックする必要がある。電気静油圧アクチュエータにおいては、油圧モータと油圧ポンプのトルクの差がそれに相当するが、差圧により容易に計測することができる。本研究課題では、共振比制御により振動しづらくした油圧モータ側のトルクを PI 制御により追従させることで力制御系を実現した。その結果、ステップ指令値に対して目標トルク±5%以内の範囲内に収まるまでの整正時間を 1/6 以下にまで低減させることに成功した。制御帯域も 4.5Hz 程度から 6.5Hz 程度まで大幅に改善することに成功した。本成果は現在論文投稿を予定している。

以上のように、作動油の漏れのある二慣性共振系として電気静油圧アクチュエータをモ

デル化し、油圧モータと油圧ポンプの位置と力情報を計測制御することで、これまでにない電気静油圧アクチュエータの制御性能を位置制御・力制御ともに実現することに成功した。

４．本研究を実施したグループに属する主な研究者の氏名・職名
境野　翔、准教授

５．研究実施時期
2017　年　1　月　1　日から　2018　年　12　月　31　日まで

６．本研究に関連して発表した主な論文等
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, Vol. 8, No. 2, pp. 279-286, 2019. (電気学会産業応用部門論文賞受賞)
2) 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.
3) 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.

７．内外における関連研究の状況
研究代表者はすでに電気静油圧アクチュエータの制御に関わる諸問題はほとんど解決したと考えており、現在は電気静油圧アクチュエータの実応用に向けてハードウェアの改良に注力し、油圧ハンドの開発などを行っている。国外に目を向けると、Jong-Hyeok Kim, and Yeh-Sun Hong, “Improvement of Backdrivability of a Force-Controlled EHA by Introducing Bypass Flow Control,” International Journal of Precision Engineering and Manufacturing 21(7)など、制御系ではなく油圧回路の構造自体に工夫をする方向で制御性能を高める研究に注目が集まっている。

８．今後の発展に対する希望
本研究課題により電気静油圧アクチュエータの実応用への大まかな道筋があきらかになったため、今後はロボットに実装するためのハードウェアに関わる諸問題を解決することが必要である。特に油圧システムの諸部品は大型なものが多く、ロボットに適した仕様の

ものが少ないため、これが油圧駆動ロボットの実応用における障壁となっている。例えば、作動油の冷却システムやロボットハンドのような繊細な部位のためのアクチュエータに代表されるように、既存の油圧システムでも必要とされる装置をロボット用に転用するための技術開発が望まれる。