

令和元年6月17日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06410

研究課題名(和文)高バックドライバブルな円形油圧シリンダの開発と制御系設計

研究課題名(英文)Development of Backdrivable Circular Hydraulic Cylinder and Controller Designing

研究代表者

境野 翔(Sakaino, Sho)

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号：70610898

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文):油圧閉回路方式の油圧モータにおいて相関係数0.98の非常に高い圧力損失モデルを獲得したことにより高精度反力推定を実現し、さらに、軸ねじれトルクを共振比制御によって補償することで安定化し、従来手法の5倍ほどになる非常に広い制御帯域を獲得し、始動トルクを5分の1ほどに低減した。また、球体関節形油圧アクチュエータを開発し、直交する異なる動作を一つのアクチュエータで実現した。さらに、2つのシリンダを用いた油圧閉回路により容積効率99.3%を実現し、交差式四節リンク機構を駆動することでバックラッシのないフィンガロボットを開発した。並びにフィンガロボット5本からなるロボットハンドを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間支援ロボットには軽量・高速制御可能、そして外力に倣う能力バックドライバビリティが高いこと、の3点が要求されるが、これらを同時に満足するアクチュエータが存在しなかった。そこで、軽量かつ高速制御可能である油圧閉回路方式の油圧モータにおいてバックドライバビリティを改善すれば理想的なアクチュエータとなる。本研究では、バックドライバビリティを向上させる計測制御技術とバックドライバビリティを向上させる機構を開発し、5倍広い制御帯域、5分の1の始動トルク、99.3%にも達する高い容積効率等、過去のアクチュエータにない優れた性能を実現し、人間支援ロボットのアクチュエーションの問題を解決した。

研究成果の概要(英文): In this study, controllers and structures of electro-hydrostatic actuators (EHAs) were studied to obtain actuators with light, broad control bandwidth, and high backdrivability. First, high precision reaction torque estimation for EHAs was obtained by creating a pressure loss model whose correlation coefficient was 0.98. Then, a torque controller against torsion torque was proposed. The torsion torque was suppressed by using a resonant ratio control making the system stable. As a result, five times wider control bandwidth and one fifth starting torque were obtained. Second, the structure of EHAs was studied, and a spherical hydraulic motor was invented enabling two orthogonal motions only by an actuator. Furthermore, an EHA using two linear cylinders realizes volume efficiency of 99.3%. By using the actuator, a backlashless finger robot was obtained with a cross-type four-bar linkage structure. Finally, a robot hand comprises five sets of the finger robots was developed.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：油圧アクチュエータ バックドライバビリティ 力制御 油圧閉回路 二慣性共振系 電気静油圧アクチュエータ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

医療、介護の現場において、図1のように負荷を軽減するウェアラブルな人間支援ロボットが注目を集めている。人間支援ロボットには、軽量であること、高速に制御できること、バックドライバビリティが高いこと、の3点が要求される。バックドライバビリティとは予期せぬ外力にアクチュエータが応ずる能力のことで、柔らかい環境接触や人間支援の安全性の担保には必須である。バックドライバビリティの向上には摩擦が少ないことが必要である。しかし、これら3点を同時に満たすアクチュエータが存在しないことが問題であった。

このような背景の基、研究代表者はこれまで人間支援ロボットのアクチュエーションについて比較検討してきた。その結果、閉回路方式で油圧モータを駆動すれば、出力重量比と制御性能を両立可能であり、人間支援ロボットに応用できることを明らかにした。現在、油圧閉回路を用いたロボット制御はホットピックになっている。油圧モータは動力源を地面に置けるため出力重量比に優れ、油圧閉回路は高速制御が可能な回路である。図2に油圧閉回路の原理を示す。電気サーボモータで駆動したポンプのパワーが管路を通して直接油圧モータに伝達するため、電気サーボモータと制御周期が等しくなる。つまり、油圧回路が減速機のようにモデル化される。しかし、油圧モータは水車のように羽で回転するため構造が複雑で小型化に限界があり、特に低速度域で油のリーク(漏れ)も多かった。油のリークは静止摩擦と同様の効果があるため、結果として低速度域での摩擦が増大していた。一方、直動シリンダは機構が単純なため、非常に軽量かつ低リークである。すなわち低摩擦でもある。よって、低リーク低摩擦であるシリンダを円形にした回転型の油圧モータを開発すれば、小型軽量・高速制御可能・高バックドライバブルな回転モータができるとの着想に至った。トレードオフとして可動範囲が制限されるが、人間を模したロボットを作るのならば無限に回転できる必要はない。



図1.ウェアラブルロボット

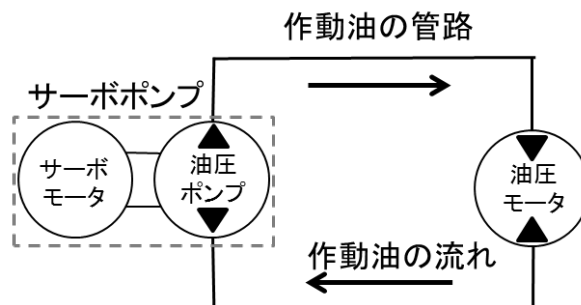


図2.油圧閉回路の原理

2. 研究の目的

近年、人間支援ロボットが医療・介護等を始めとして大きな注目を集めている。しかし、1.出力に対して軽いこと、2.高速制御できること、3.安全性を担保するため外力に耐える能力「バックドライバビリティ」が高いこと、以上の3点を同時に満たすアクチュエータが存在しないことが技術障壁となっていた。1、2の問題については、出力重量比に優れる油圧モータを油圧閉回路方式で制御することで解決する。3については油圧モータの油のリーク(漏れ)が摩擦の増大を引き起こし、結果としてバックドライバビリティ悪化の原因となっていた。よって、リークの少ないシリンダを円形とすることでバックドライバビリティを改善する。

3. 研究の方法

(1) 円形シリンダの開発

油圧モータは入力と出力を入れ替えると油圧ポンプになるため、油圧ポンプと油圧モータを二つの大きさの異なる円形シリンダで設計し、図3のような構成とする。閉回路方式で制御する場合、サーボモータから油圧モータまでの減速比は油圧ポンプと油圧モータの断面積比で決定されるので、油圧ポンプを油圧モータより小型にすることで大きな減速比を得られる。CADによる有限要素法解析で過剰な圧力集中などが発生しないように事前に調査する。

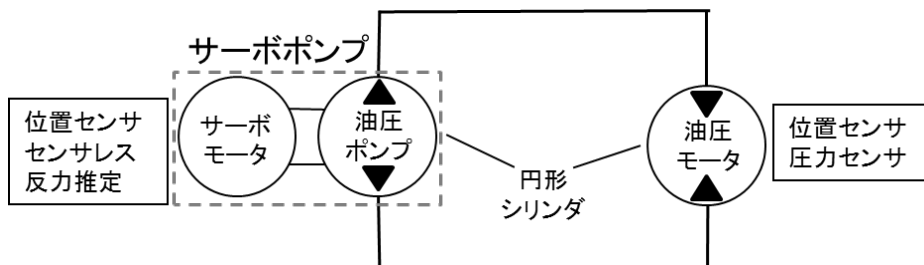


図3.円形シリンダによる油圧閉回路とセンサの配置

(2) 圧力損失モデルの確立

油圧モータは油の圧縮性により一次遅れ特性を有し、その共振周波数により制御帯域が制限されていた。また、油のリークが圧力損失を引き起こし、摩擦のように作用するためバックドライバビリティが低下していた。これらを解決するために、油圧モータ側のみに位置・圧力センサを実装するのではなく、図3のようにサーボポンプ側にも位置センサを実装する。サーボポンプにおける力情報はサーボモータを用いてセンサレスで推定できるため、ポンプ側、モータ側両方で位置と力情報を計測できるフルクロードと呼ばれる構成になる。サーボポンプと油圧モータの位置のずれより、油の動的な圧縮の計測が可能になる。一方、油のリークによる圧力損失は油のリークが速度依存特性を持つため、単純にサーボポンプでの反力推定値と圧力センサの差分から推定することは困難である。よって、サーボポンプでの反力推定値、圧力センサの測定値、油圧モータの速度測定値の3者を入力として、圧力損失をリアルタイム推定できるモデルを確立する。

(3) 広帯域・高バックドライバビリティ制御の開発

電気モータにおいてねじれ剛性をフルクロード制御で補償する手法は広く知られている。これを油圧モータに転用し制御の広帯域化を図る。また、油のリークによる圧力損失は、研究計画2で確立したモデルを利用してフィードフォワード制御で補償する。フィードフォワード制御による完全な圧力補償は不可能であるため、摩擦が僅かに残る。そこで、研究代表者がこれまで提案済みの摩擦低感度化制御を用いることでさらに補償しきれなかった摩擦の影響を抑える。結果として、高いバックドライバビリティを実現する。

4. 研究成果

(1) 円形シリンダの開発

本研究課題では当初、1 置自由度回転を行う円形シリンダの開発を予定していた。しかし、開発を進める上で、円形シリンダと同様な特性を持つベーンモータを2つ組み合わせることで、2 自由度の球体関節アクチュエーションが獲得できることがあきらかになってきた。図4に開発した球体関節駆動可能な油圧モータの概略図を示す。左図に示す第1軸においては、青で示される「羽」が作動油により回転する。一方、左図の灰色部は青色部を固定するケースである。このケースが第2軸の羽となる。右図の青色部が、第1軸のケースであり、第2軸の羽になる。このように第1軸のケースを第2軸の羽として共用することで小型化に貢献した。市販の電気サーボモータ、油圧モータとの比較結果を表1に示す。電気モータと比較すれば、高トルク化、油圧モータと比較すれば小型化に成功したことがわかる。

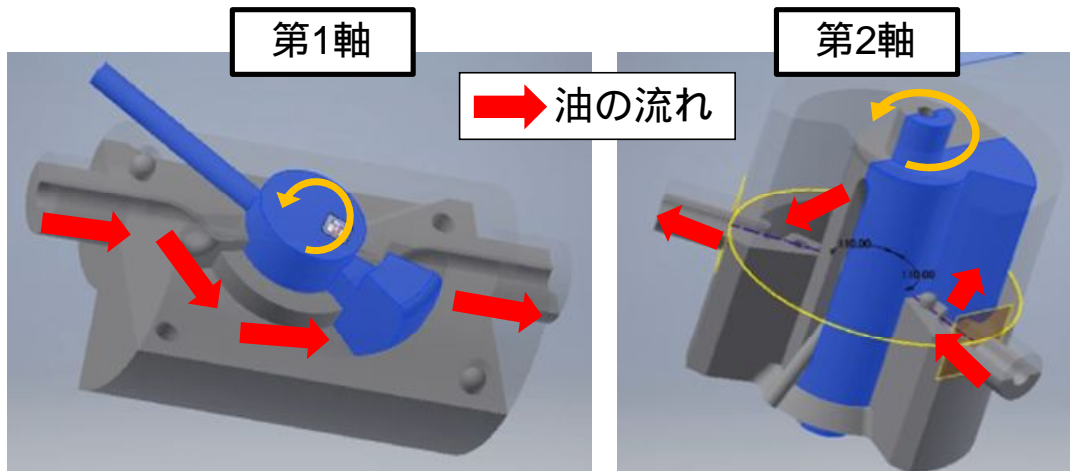


図4. 2自由度球体関節油圧モータ

表1. 性能比較

比較項目	電気モータ	油圧モータ(従来)	提案モータ第1軸	提案モータ第2軸
定格トルク[Nm]	8.00	108	30.0	80.0
体積[cm ³]	130	688	200	

(2) 圧力損失モデルの確立

これまで油圧閉回路の動的モデリングは困難であった。これは、電気モータと比較すると大きな静止摩擦が存在するためである。そこで、フィードバック変調器と呼ばれる静止摩擦補償器を実装して同定することで、油圧閉回路の解析に成功した。その結果、油圧ポンプと油圧モータが二つの慣性体を構成し、圧縮性を有する作動油がバネとして作用する図5のような二慣性共振系であることがあきらかになった。また、圧力の効率がポンプ側(駆動側)の角速度に比例して生じることもあきらかにし、重相関0.98以上の非常に高い確度のモデルを獲得できた。すなわち、油圧閉回路の非線形性はほとんど静止摩擦によって生じており、十分な静止摩擦補償がなされたなら線形システムとみなせることがあきらかになった。

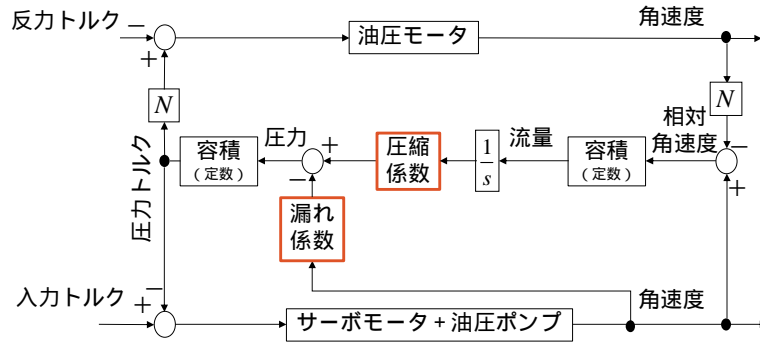


図5. 油圧閉回路のモデル

(3) 広帯域・高バックドライバビリティ制御の開発

油圧閉回路が二慣性共振系であるということは、ギア付き電気モータと同じモデルであることを意味する。すなわち、油圧閉回路のモデルを解明したことで、電気モータ制御の分野で広く用いられている手法を転用できるようになったことを意味する。電気モータの高精度な制御のためには外乱オブザーバを用いて外乱を抑制することが効果的であることが知られている。しかし、二慣性共振系に外乱オブザーバを実装すると、振動を誘発しシステム全体が不安定になりがちであることが知られている。油圧閉回路の場合においては、外乱オブザーバを用いてサーボポンプの制御性能を高くしすぎると、油圧モータの応答が振動的になる事を意味している。逆説的に言えば、油圧モータの慣性を見かけ上サーボポンプより重くすることができれば、サーボポンプの振動の影響が油圧モータ側にはほとんど現れず、安定した高精度な制御が可能になる。このように仮想的に出力軸の慣性を増大させる安定化制御を共振比制御と呼ぶ。よって、共振比制御を利用して共振を抑圧することで、高い制振性能を実現した。また、力制御は制御入力に直接制御出力に伝達するため作動油の漏れの影響が大きく現れる。よって、作動油の漏れについても明示的に同定して補償した。

図7に共振比制御、漏れ補償制御を併用した力制御系を示す。この時、目標値との定常偏差を除去するためPI制御系を実装した。

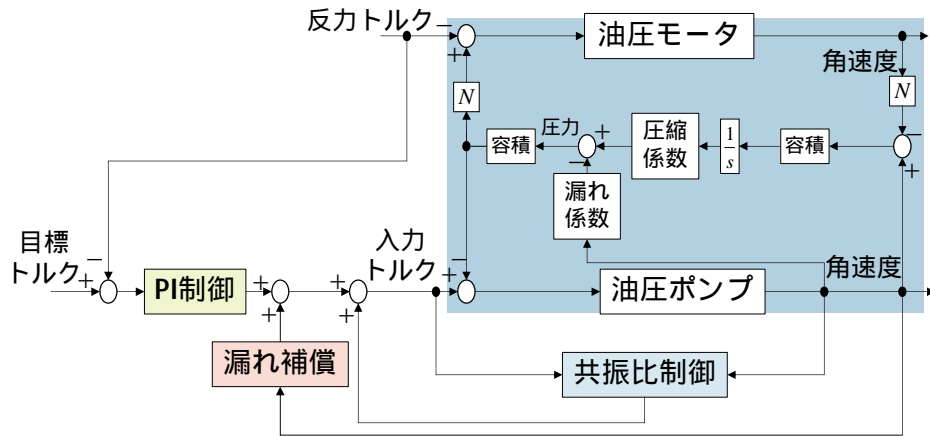
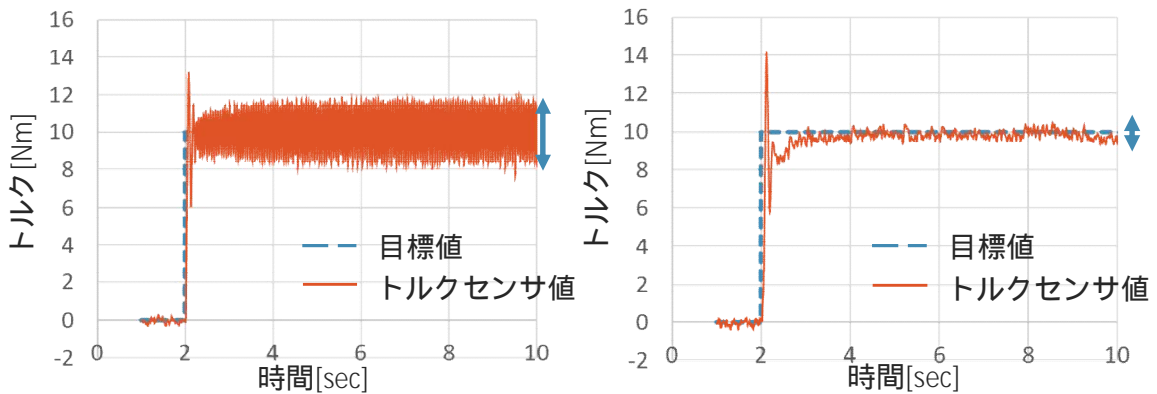


図7. 油圧閉回路の力制御系



(a) 従来手法(共振比制御なし)

(b) 提案手法(共振比制御あり)

図8. 力制御応答

図8に実験結果を示す。共振比制御により作動油の圧縮による振動を抑圧し、安定かつ立ち上がりの早い力制御を実現できた。また、図9で制御帯域を比較した。無制御時を黒線で、従来手法が安定するようにPI制御のゲインを落とした手法を青線で、提案手法を赤線で示す。図

9より、提案手法では5倍ほど広い制御帯域を獲得できたことがわかる。一方、従来手法では無制御時よりも位相遅れが増大してしまったことがわかる。また、表2でバックドライバビリティの比較として、負荷側を人間が駆動したときの必要トルク、並びに駆動時の駆動側角速度を示す。表2からもあきらかなように、バックドライブに必要なトルクを無制御時の1/5に低減しただけでなく、制御によって摩擦の影響が低減されたため、駆動時の角速度も2倍に向上することに成功した。すなわち、いずれの指標においても提案手法により、人間は油圧モータを「軽く」体感することができたことを示している。

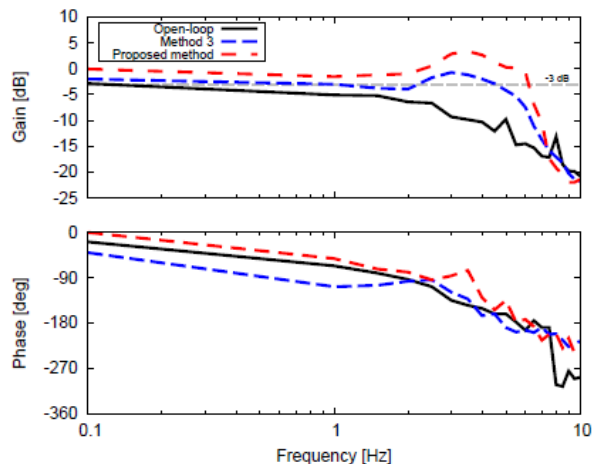


図9. 制御帯域

表2. バックドライバビリティの比較

	無制御	従来手法	提案手法
負荷側トルク [Nm]	25.4	7.82	5.95
駆動側角速度 [rad/s]	1.10	1.60	2.22

(4) フィンガロボットの開発

さらに、当初の予定より順調に研究がすすんだため、2つのシリンダを駆動側と負荷側として構成する新たな油圧閉回路システムを開発した。その結果、図10において駆動側(入力)と負荷側(出力)の応答が定常状態ではほぼ一致していることからわかるように、容積効率 99.3%の非常に高効率の油圧閉回路を実現できることがあきらかになった。

図11に示すように、この油圧閉回路により交差式四節リンク機構を駆動するバックラッシのないフィンガロボットを開発した。さらに図12に示すようにフィンガロボット5本からなるロボットハンドを開発した。

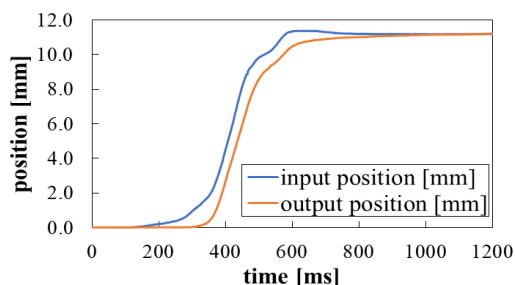


図10. 駆動側と負荷側の位置応答

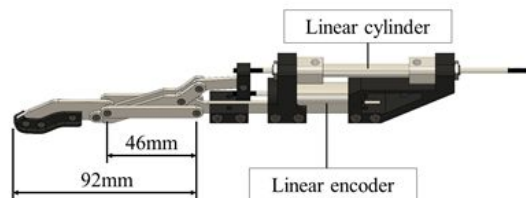


図11. フィンガロボット

(5) まとめ

以上より、ハードウェア並びにソフトウェアの両面からバックドライバビリティを向上させる油圧閉回路システムを確立した。特に、2自由度の球体関節アクチュエータの開発の成功や、ロボットハンドの開発など、当初の目標を著しく上回る成果を得たことは留意すべきである。



図12. ロボットハンド

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計6件)

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. DOI: <https://doi.org/10.1541/ieejjia.8.279>

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. DOI: <https://doi.org/10.1541/ieejjia.7.250>

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, Vol. 32, No. 1, pp. 1-11, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/01691864.2017.1392343>
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. DOI: <https://doi.org/10.1541/ieejjia.6.320>
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. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2674631>
Sho Sakaino, Toshiaki Tsuji: “ Development of friction free controller for electro-hydrostatic actuator using feedback modulator and disturbance observer, ” ROBOMECH Journal, 4:1, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40648-016-0070-2>

[学会発表](計12件)

Kenta Araake, Sho Sakaino, Toshiaki Tsuji: “ Design of Resonance Ratio Control with Relative Position Information for Two-inertia System, ” in Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2019. (Accepted for publication)
Kota I, Koudai 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.
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.
Kenta Tsuda, Koudai 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.
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.
井航太, 佐久間智輝, 梅田滉大, 津田賢汰, 境野翔, 辻俊明, “ 電気静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, ” ロボティクス・メカトロニクス講演会2017, 2P1-E04, 5月10-13日, 2017.
境野翔, 辻俊明, “ 電気静油圧アクチュエータの共振抑制制御, ” 平成29年電気学会全国大会, 富山, 3月15-17日, 2017
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.
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.
佐久間智輝, 津田賢汰, 梅田滉大, 境野翔, 辻俊明, “ 電気静油圧アクチュエータの2慣性共振モデルとその制御, ” 第34回日本ロボット学会学術講演会, 3E2-01, 山形, 9月7-9日, 2016
梅田滉大, 佐久間智輝, 津田賢汰, 境野翔, 辻俊明, “ 油圧アクチュエータにおける高精度な反力推定法, ” ロボティクス・メカトロニクス講演会2016, 2A1-04b3, 横浜, 6月8-11日, 2016
津田賢汰, 佐久間智輝, 梅田滉大, 境野翔, 辻俊明, “ 電気静油圧アクチュエータの動特性同定, ” ロボティクス・メカトロニクス講演会2016, 2A1-04b1, 横浜, 6月8-11日, 2016

[その他]

ホームページ等

<http://mclab.iit.tsukuba.ac.jp>

6. 研究組織