

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03212

研究課題名(和文)人間と環境に優しい家庭用プラグイン安全ACモータドライブシステムの開発

研究課題名(英文)Human and eco-friendly household plug-in safety AC motor drive system

研究代表者

宮崎 敏昌 (Miyazaki, Toshimasa)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90321413

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究成果によって、電解コンデンサレスインバータにおいて問題となる電流高調波を、直接直流リンク電流制御法により抑制し、駆動側の粘性摩擦を、駆動側ノミナル化補償器と軸ねじれトルクと差速度フィードバックによるバックドライブ制御を実現した。提案システムを、HILSを用いた実験検証により評価した結果、電解コンデンサを含まないインバータ及び直流リンク電流直接制御を組み合わせることでトルク脈動の増大が抑制されるため、システムの応答の振動が減少した。以上より、電界コンデンサレス単相三相インバータを用いてACサーボモータをバックドライブ駆動可能な制御系を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、従来一定速度回転での利用にとどまっていた、電解コンデンサレスインバータによる、環境負荷にやさしいモータドライブシステムを、バックドライブ性能などを必要とする最新の協働ロボットへ導入するための手法について検証できた。これにより、小型軽量でメンテナンスフリーな協働ロボットシステムの普及が広く進むことになり、ロボットと人間の共存やウエアラブルなアシストロボットへの広い波及効果が期待できる。

研究成果の概要(英文)：As a result of this research, current harmonics that are a problem in electrolytic capacitorless inverters are suppressed by the direct DC link current control method, and viscous friction on the drive side is controlled by the drive side nominalization compensator, shaft torsion torque, and differential speed feedback. Realized back drive control. As a result of evaluating the proposed system by experimental verification using HILS, the increase of torque pulsation is suppressed by combining the inverter without the electrolytic capacitor and the direct current control of the DC link, and the vibration of the system response is reduced. From the above, we have realized a control system that can back drive an AC servomotor using a single-phase three-phase inverter without an electric field capacitor.

研究分野：モータドライブ

キーワード：電解コンデンサレスインバータ バックドライブシステム 力制御 トルク制御 直流リンク電流脈動

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、生産工場では人間とロボットが同じ現場で協調作業をしており、近い将来、家庭内においても介護福祉機器などの高トルクアクチュエータが人と接触することとなる。そのため、人間にとって安全な小型軽量アクチュエータが必要となる。安全な小型軽量アクチュエータの実現のためには、出力側となるメカ機器からの逆駆動をする性能(バックドライバビリティ)をもつ零スチフネス構造が必要となる。また、環境に配慮した高力率高効率で廃棄物の少ないモータドライブシステムの開発も必要となる。

2. 研究の目的

本研究では、出力軸にトルクセンサを持つギア付き AC サーボモータに対し、モータ軸の加速度制御、負荷側軸の力制御の 2 重系を導入することにより、出力側となるメカ機器から逆駆動する性能(バックドライバビリティ)を持つ零スチフネス構造を実現することで、人間と接触した際にも安全に動作する小型軽量アクチュエータを実現することを目的とする。また、廃棄物となるパワーバッファ(電解コンデンサと鉄芯リアクタ)を使わない電力変換器と、パワーバッファレス制御とプラグイン有効電力制御を導入することで、廃棄物の少ない高力率高効率の電力変換器を実現し、環境に配慮した AC サーボモータ用電力変換器を実現することを目的とする。

これらを組み合わせることにより、人間にやさしい所望のトルクと、環境にやさしいパワーバッファレス化のための単相有効電力制御の両者を成しえる電力変換技術を実現する。その結果、環境にやさしく俊敏に駆動する小型軽量アクチュエータを実現することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の「人間と環境にやさしい家庭用小型軽量安全 AC モータドライブシステム」において、主たる過大は「人間にやさしいアクチュエータの実現」と「環境にやさしい家庭用高性能モータ駆動技術の実現」である。これに対して、以下のように進め、完遂する。最初に、プラグイン有効電力制御、瞬時トルク制御と瞬時磁束制御により、環境にやさしい小型軽量の AC サーボドライブシステムを開発する。次に、ギア出力軸の力制御とモータ軸の加速度制御により、安全で人間に優しい高バックドライバビリティ性能を持つ零市千舟ス制御構造を達成する。その後、提案する家庭用小型軽量安全 AC モータドライブシステムの実証を行う為、HILS 環境に提案する AC モータドライブシステムを実装し、評価を行う。

4. 研究成果

初めに、単相三相インバータについて述べる。単相三相インバータでは、交流電圧をダイオード整流器を用いて整流したのち、大容量の電解コンデンサを用いて平滑化した上で、PWM インバータを用いて三相交流に変換する構成とするのが一般的である。しかし、電解コンデンサを用いることで、システムの大型化、寿命の低下などを招くため、望ましくない。このため、大容量の電解コンデンサを廃し、フィルムコンデンサなどの小型・長寿命の素子を用いることが望ましい。一方で、フィルムコンデンサなどを用いる事による平滑コンデンサの容量の減少により、直流リンクの脈動が増加する。これにより、モータでトルク脈動が発生するため、所望のトルクを出力することが難しくなるという問題がある。また、電流高調波を抑制するために大容量のリアクトルが必要となるため、システムの大型化・低コスト化の妨げとなっている。

これに対して、本研究で検討する直流リンク電流直接制御システムを図 1 に示す。

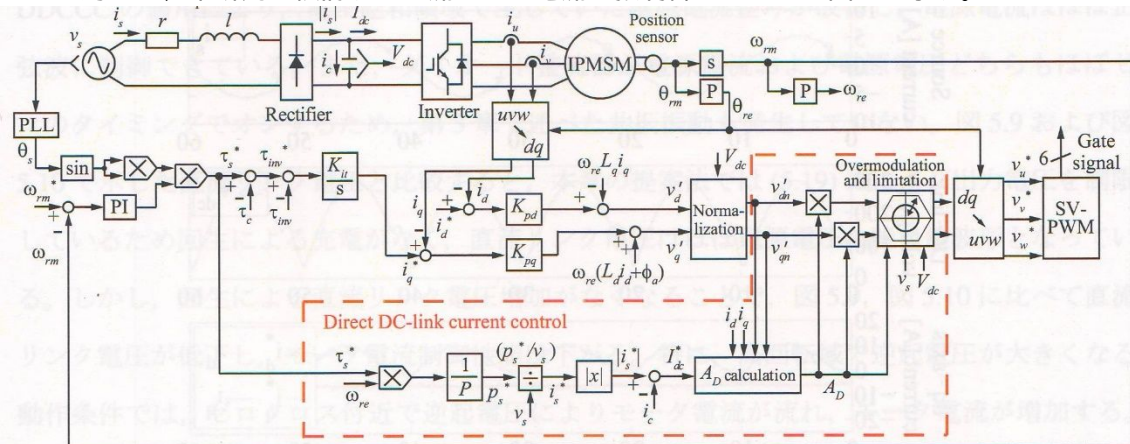


図 1 直流リンク電流直接制御のシステム

先述の通り、電解コンデンサレスインバータにおいては、電流高調波が問題となる。これに対しては、電圧指令高調波を印加することで抑制ができるが、印加する高調波の大きさや位相はオフラインで調整する必要がある。これに対しては、オンラインで直流リンク電流応答を改善する高速電圧フィードフォワード制御(FVFFC)が提案されている。しかし、この手法では、電圧飽和領域においては適用が困難である。また、d 軸電流指令値を試行錯誤的に決定する必要がある。このため、電圧飽和を考慮し、正弦波電源電流を実現する手法である、直接直流リンク電流制御

法を提案する。

次に、逆駆動する性能(バックドライバビリティ)を持つ零スチフネスの構造を実現するためのシステムについて記述する。ロボットのモデルとなる2慣性系において、負荷側から駆動側を見た時、駆動側の粘性摩擦や慣性モーメントは、減速機を介すことにより増大する為、人間が接触することにより負荷側へトルク入力となされても駆動するのが難しい。これにより、ロボットと人間が接触した際の安全性の確保が難しくなる。このため、負荷側にトルク入力となされた際の駆動性、即ちバックドライバビリティを確保する必要がある。

バックドライバビリティを持つ零スチフネス構造を実現する、モータ軸の加速度制御、負荷側軸の力制御を行うシステムを図2に示す。

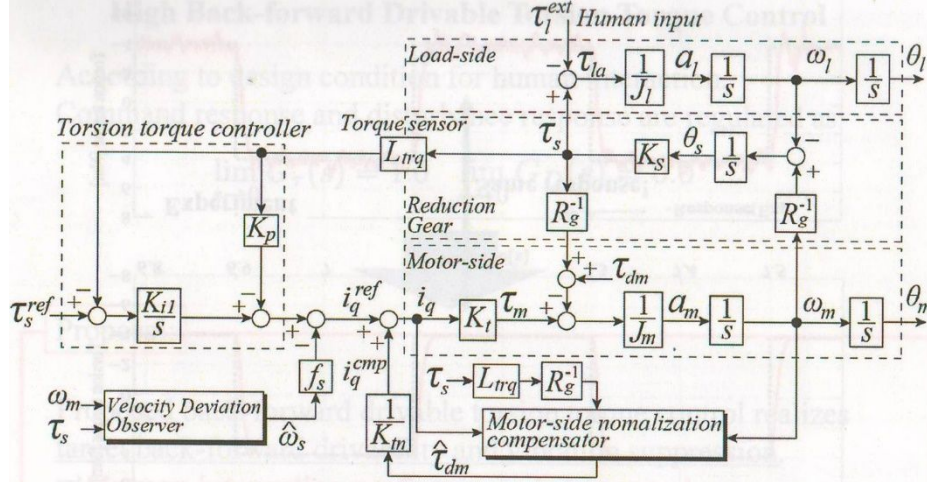


図2 バックドライバビリティを持つ零スチフネス構造を実現するシステム

駆動側の粘性摩擦を、駆動側ノミナル化補償器により補償した上で、軸ねじれトルクと差速度フィードバックにより構成される。

上記のシステムについて、HILSを用いて検証を行った。なお、図2においては、オブザーバを用いて粘性摩擦によるトルク反力と差速度を推定しているが、HILS環境においてはこれらの状態量を直接フィードバックして実験を行った。初めに、パワーバッファとして電解コンデンサをもつインバータを用いて、バックドライバビリティを持つ零スチフネス構造を実現するシステムに関する検証結果について図3に示す。実験条件は表1に示す。

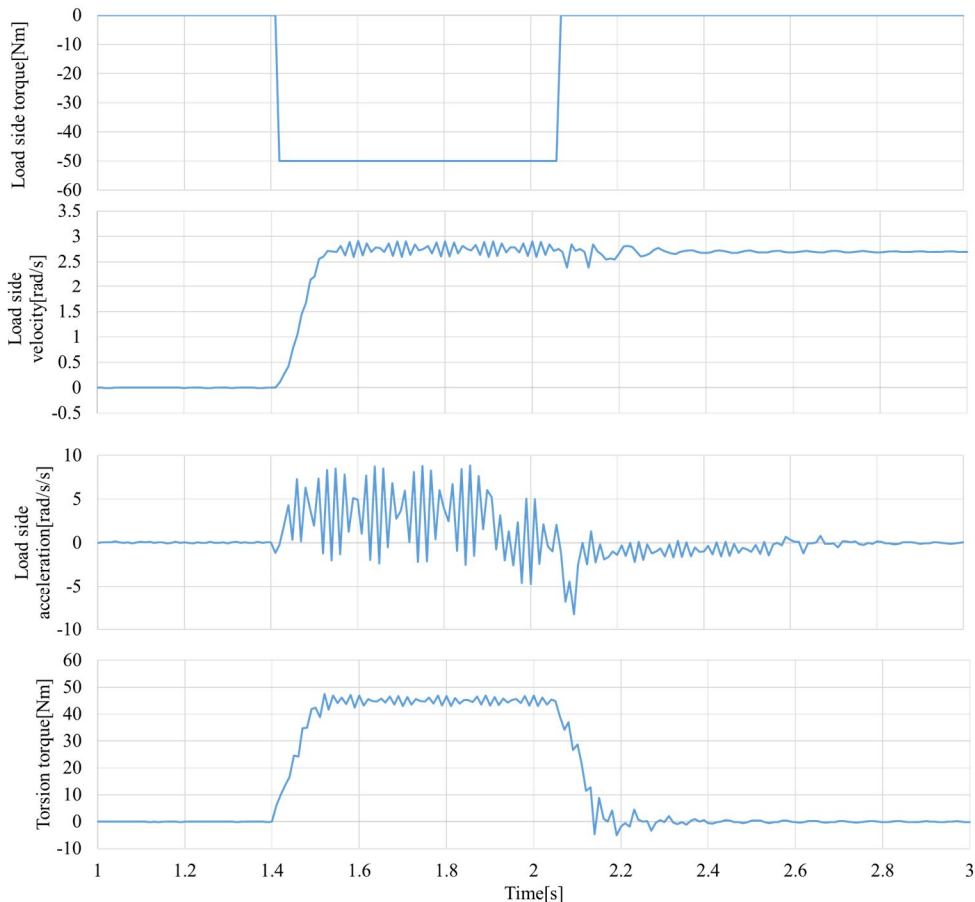


図3 電解コンデンサをパワーバッファとして持つインバータにおける検証結果

表 1 実験条件

名称	記号	値
トルク定数	K_t	0.248Nm/A
駆動側慣性モーメント	J_M	$1.44 \times 10^{-4} \text{kgm}^2$
駆動側粘性摩擦係数	D_M	$9.80 \times 10^{-4} \text{Nms/rad}$
負荷側慣性モーメント	J_L	0.16kgm^2
ばね定数	K_S	$1.26 \times 10^4 \text{Nm/rad}$
減速比	R_g	50
トルク制御比例ゲイン	K_{pt}	0.030
トルク制御積分ゲイン	K_{i1}	50.06
差速度フィードバックゲイン	f_s	15.42
ステータ抵抗	R_a	0.615 Ω
d 軸インダクタンス	L_d	7.1mH
q 軸インダクタンス	L_q	11.3mH
磁束鎖交数	ϕ_a	0.124Wb
極対数	p	2

図 3 より、負荷側からのトルク入力により負荷側に速度が生じており、逆駆動が実現していることが分かる。

次に、パワーバッファとしての電解コンデンサを含まないインバータを用いた場合の結果を図 6 に示す。

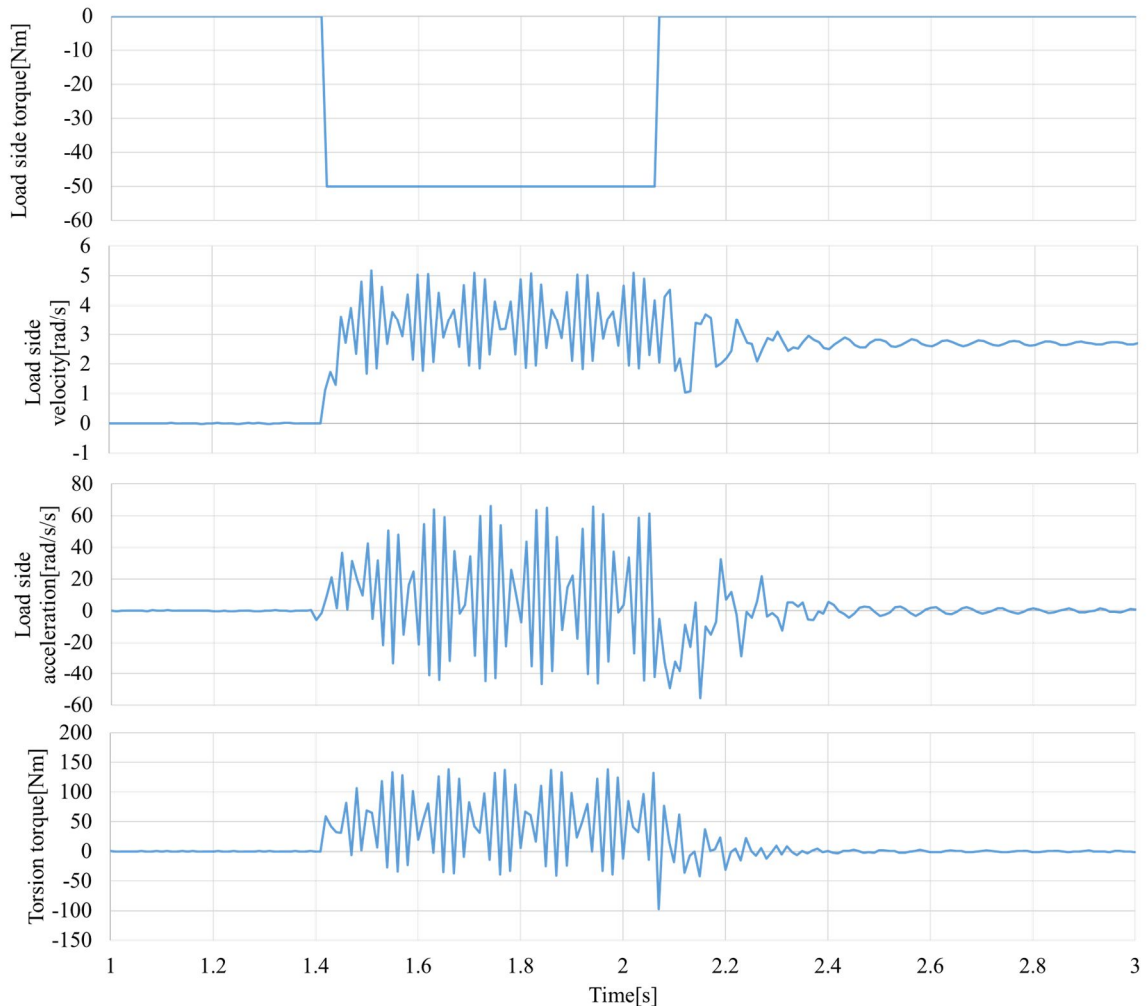


図 4 パワーバッファを持たないインバータにおける検証結果

図 3 の結果に比べて図 4 では、先述の通り電解コンデンサが無いことによりトルク脈動が増大するため、システムの応答の振動が増大している。

次に、電解コンデンサを含まないインバータ及び直流リンク電流直接制御を組み合わせた場合の結果を図 5 に示す。

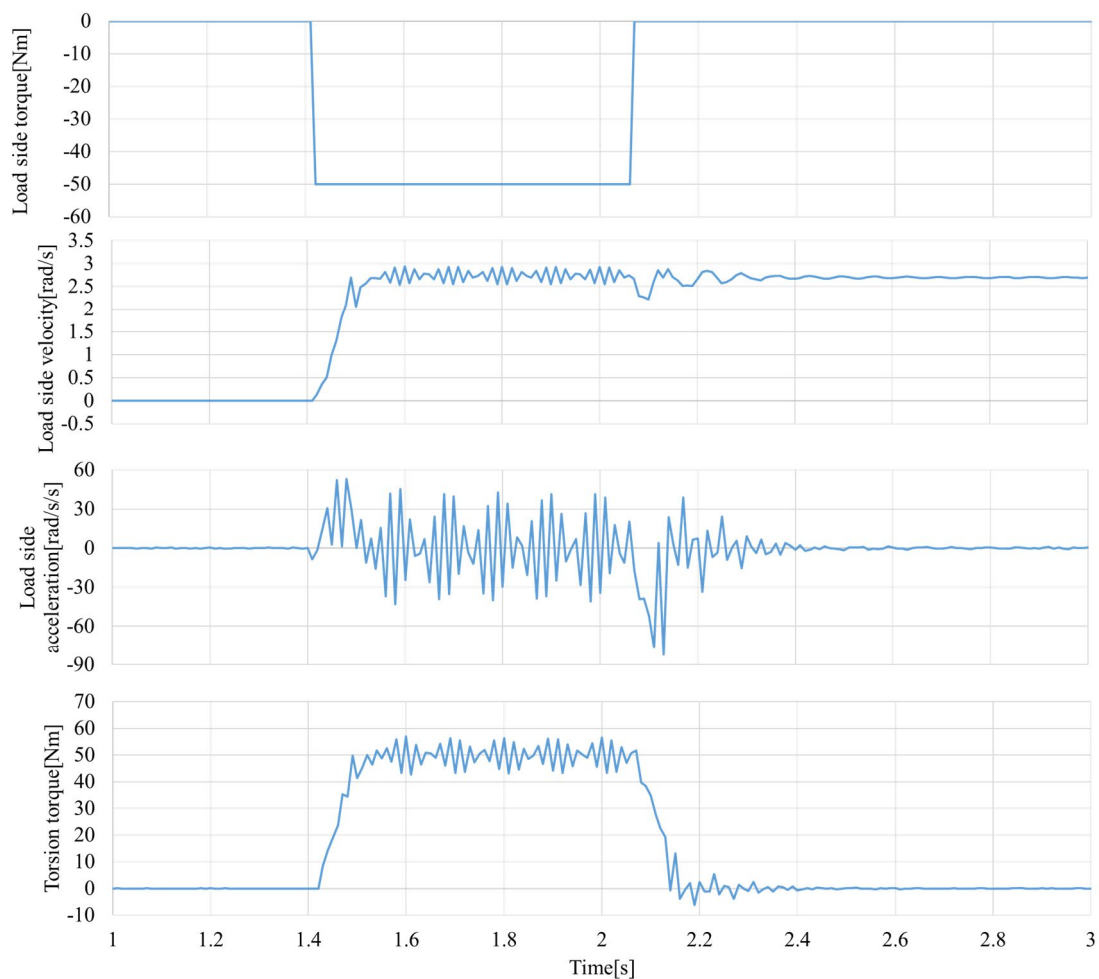


図5 パワーバッファを持たないインバータに対して直流リンク電流直接制御を行った場合における検証結果

この場合、トルク脈動の増大が抑制されるため、システムの応答の振動が図4の結果に対して減少していることが分かる。

以上の結果より、電界コンデンサレス単相三相インバータを用いてACサーボモータを駆動した際に、直流リンク電流直接制御と駆動側ノミナル化補償器、軸ねじれトルクと差速度フィードバックを組み合わせることで、バックドライバビリティを持つ零スチフネス構造が実現できていることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Junichi Fukui, Toshimasa Miyazaki	4. 巻 8
2. 論文標題 Speed Control Method for Tilling Claw of Electric Tiller Considering Actual Periodic Reaction Torque	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ JIA	6. 最初と最後の頁 539-547
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1541/ieejjia.8.539	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Juan Padron, Kiyoshi Ohishi, Yuki Yokokura, Toshimasa Miyazaki	4. 巻 9
2. 論文標題 Velocity Driven N-order Stick Compensator and Slip Suppressor for Nonlinear Friction in an Oil-Seal-Mounted Geared Motor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ JIA	6. 最初と最後の頁 168-176
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1541/ieejjia.9.168	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yusuke Kawai, Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi, Toshimasa Miyazaki	4. 巻 9
2. 論文標題 Equivalent Resonance Ratio Control in Two-Spring System for Stable Contact Motion in Industrial Robots	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ JIA	6. 最初と最後の頁 51-60
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1541/ieejjia.9.51	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Akinori Yabuki, Kiyoshi Ohishi, Toshimasa Miyazaki, Yuki Yokokura	4. 巻 8
2. 論文標題 Quick Reaction Force Control for Three-Inertia Resonant System	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ JIA	6. 最初と最後の頁 941-952
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1541/ieejjia.8.941	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yusuke Kawai, Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi, Toshimasa Miyazaki	4. 巻 8
2. 論文標題 Smooth Human Interaction Control using Torsion Torque Controller and Motor-side Normalization Compensator Focusing on Back-forward Drivability	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 322-333
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1541/ieejjia.8.322	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 牧 優太郎, 宮崎 敏昌	4. 巻 137
2. 論文標題 直列補償方式による非絶縁昇降圧形DC/DCコンバータにおける損失低減法の一方式	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 583-591
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1541/ieejias.137.583	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryota Takahashi, Kiyoshi Ohishi, Yuki Yokokura, Hitoshi Haga, Tenjiro Hiwatari	4. 巻 6
2. 論文標題 Stationary Reference Frame Position Sensorless Control Based on Stator Flux Linkage and Sinusoidal Current Tracking Controller for IPMSM	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 181-191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1541/ieejjia.6.181	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Thao Tran Phuong, Kiyoshi Ohishi, Chowarit Mitsantisuk, Yuki Yokokura	4. 巻 7
2. 論文標題 Disturbance Observer and Kalman Filter Based Motion Control Realization	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1541/ieejjia.7.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiroshi Nakamura, Kiyoshi Ohishi, Yuki Yokokura, Naoki Kamiya, Toshimasa Miyazaki, Akifumi Tsukamoto	4. 巻 7
2. 論文標題 Force Sensorless Fine Force Control Based on Notch-Type Friction-Free Disturbance Observers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 117-126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1541/ieejjia.7.117	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 中川晴貴, 鶴岡勝弘, 大石 潔, 横倉勇輝, 宮崎敏昌
2. 発表標題 単相三相マトリックスコンバータにおける弱め磁束制御に着目した制御性能の比較
3. 学会等名 電気学会東京支部新潟支所研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鶴岡勝弘, 大石潔, 横倉勇希, 宮崎敏昌, 阿部晃大
2. 発表標題 スナバ回路を利用した単相-三相マトリックスコンバータによるAC速度サーボシステムの検討
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川合勇輔, 横倉勇希, 大石潔, 宮崎敏昌
2. 発表標題 高応答バックフォワードドライバビリティのための負荷側速度オブザーバを用いたねじれトルク制御系の広帯域化
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木駿介, 川合勇輔, 横倉勇希, 大石潔, 宮崎敏昌
2. 発表標題 Contact control of two inertial systems based on velocity damping by equivalent disturbance compensator
3. 学会等名 IEEJ SAMCON2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川合勇輔, 横倉勇希, 大石潔, 宮崎敏昌
2. 発表標題 Force Impulse Control Based on Resonance Ratio Control for Antibouncing Motion
3. 学会等名 IEEJ SAMCON2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富山健太, 宮崎敏昌
2. 発表標題 Kicking-out Force Control with Compensation of Torsional Torque in Leg Robot using Bi-articular Muscle
3. 学会等名 IEEJ SAMCON2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木駿介, 川合勇輔, 横倉勇希, 大石潔, 宮崎敏昌
2. 発表標題 外乱にロバストな二慣性系のねじれトルク制御の為の等価外乱補償器
3. 学会等名 電気学会 メカトロニクス制御研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富山健太, 宮崎敏昌
2. 発表標題 二関節筋機構を有するレッグロボットの瞬発的な蹴り出し力制御のための関節モデリング
3. 学会等名 電気学会 メカトロニクス制御研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富山健太, 宮崎敏昌
2. 発表標題 High-precision Kicking Force Control Based on Joint Torque Feedback of Leg Robot with Bi-articular Muscle
3. 学会等名 Mechatronics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鶴岡 勝弘, 阿部 晃大, 大石 潔, 芳賀 仁
2. 発表標題 電圧型単相-三相マトリクスコンバータを用いた位置制御系の検討
3. 学会等名 平成29年度電気学会東京支部新潟支所研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鶴岡 勝弘, 阿部 晃大, 大石 潔, 芳賀 仁, 横倉 勇希, 宮崎 敏昌
2. 発表標題 モータ瞬時最大電流を考慮した単相-三相マトリクスコンバータを用いたACサーボシステム
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換モータドライブ合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Katsuhiko Tsuruoka, Kodai Abe, Kiyoshi Ohishi, Hitoshi Haga, Yuki Yokokura, and Toshimasa Miyazaki,
2. 発表標題 AC Servo System Driven by Single-Phase to Three-Phase Matrix Converter Considering Motor Current Limitation of Uncontrollable Voltage Phase
3. 学会等名 The IEEJ international Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村雄希, 柳洋成, 岩谷一生, 宮崎敏昌
2. 発表標題 DAB コンバータの無効電流低減法に着目した絶縁型DC-AC コンバータの変調方式
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akinori Yabuki, Kiyoshi Ohishi, Toshimasa Miyazaki, Yuki Yokokura
2. 発表標題 Fine Vibration Suppression Control Based on New Two-inertia State Observer Feedback Against Three-inertia Robot Joint
3. 学会等名 The 26th IEEE International Symposium on Industrial Electronics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Toshimasa Miyazaki, Naoki Kamiya, Hiro-shi Nakamura, Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi
2. 発表標題 Dual Notch-Type High-order Friction-Free Force Observers for Force Sensorless Fine Force Control
3. 学会等名 IECON2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	大石 潔 (Ohishi Kiyoshi) (40185187)	長岡技術科学大学・工学研究科・教授 (13102)	
研究 分担者	横倉 勇希 (Yokokura Yuki) (70622364)	長岡技術科学大学・工学研究科・助教 (13102)	