

2019年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	長岡技術科学大学 電気電子情報工学専攻
職位または役職	准教授
氏名	横倉 勇希

1. 研究題目

協働ロボットのための高逆駆動性多軸モータ駆動システムの開発

2. 研究目的

本研究の目的は、協働ロボットのための高逆駆動性モータ駆動システムを開発することにある。近年、ロボットの利用が急増しているが、人間とロボットが生活空間で直接接触して協働するまでには至っていない。その主たる原因は、モータ駆動システムの「逆駆動性の低さ」にあり、人間に危害を加える事故が実際に起きていることにある。逆駆動性とはモータ駆動システムの外部からの動かしやすさを示し、現状において逆駆動性を低下させている大きな要因として、減速機とオイルシールの摩擦、共振振動の抑制制御、負荷トルクに瞬時に反応できない遅い電流制御での駆動の3つが挙げられる。そこで本研究では、それら3つの問題の解決を目的として、先進的なモーションコントロール技術と最先端のパワーエレクトロニクスを融合させ、多軸ロボットの各軸に搭載される減速機付きPMSM(永久磁石同期モータ)の逆駆動性を制御的および回路的に高めることで、将来の人間との協働に必要なとなるロボットのための高逆駆動性多軸モータ駆動システムを実現する。



図1 従来技術と高逆駆動性多軸モータ駆動システムを用いたアームロボット

3. 研究内容及び成果

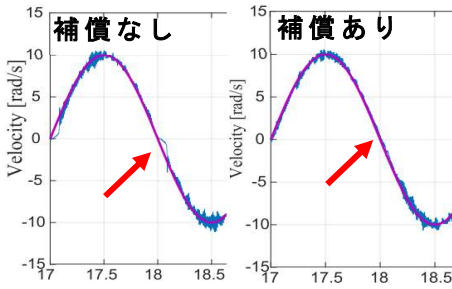


図2 「可変次数外乱オブザーバ」による非線形摩擦補償の効果

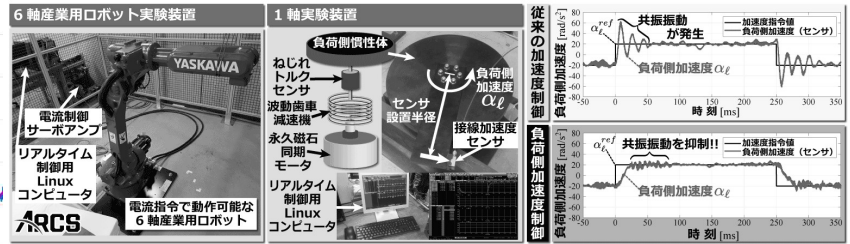


図3 「負荷側加速度制御」による加速度次元の共振振動を抑制する実験結果

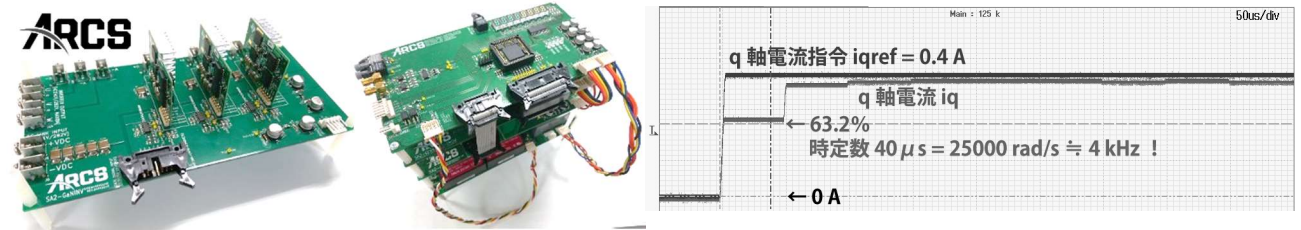


図4 「高速電流制御」のための GaN インバータと独自開発のサーボアンプ, および実験結果

普段、自宅や職場において身の回りを見渡してみても、様々な力仕事を肩代わりしてくれる本格的な人間支援ロボットは未だに実用化されておらず、近年広く普及しているのは、会話ロボットや移動ロボットばかりである。人間に真に役立つ多軸ロボットは産業界、特に工場生産のみに留まっており、その他の企業、学校や家庭などにはほとんど普及していない。その理由は、昨今の大多数のモータ駆動システムは位置制御に特化しており、減速機負荷側から逆に回転することができず、外力に対して柔軟ではないからである。この「逆駆動性」の低いロボットが人間と衝突した際に傷害を追わせてしまう事故がこれまでに幾度となく起きているため、工場においては図1左のように必ず安全柵で囲い、さらに安全柵の扉を開くと非常停止し、人間とロボットを隔離して逆駆動性の問題を回避しており、「協働」とは程遠いのが現状である。そこで本研究では、「いかにして高い逆駆動性を実現するか」を念頭に置き、図1右に示す協働ロボットを開発している。

本研究では、次に述べる逆駆動性低下の3つの要因を取り除いて問題を解決する。まず1つ目として、減速機内のグリスがモータ側に浸透することを防ぐオイルシールが大きな摩擦トルクを発生させ逆駆動性が低下する問題が挙げられる。そこで、ゼロ速に近づくほど次数が上がる可変次数外乱オブザーバにより非線形摩擦モデル無しに補償する手法を用いて解決した。減速機のオイルシールの摩擦トルクを補償するために、ゼロ速に近づくほど次数が上がる可変次数外乱オブザーバを提案し、実証試験を行っている。通常の外乱オブザーバは次数を上げると外乱抑圧性能が上がる代わりに安定性が著しく下がるため、産業用途では0次外乱オブザーバが一般的である。一方の提案手法では、ゼロ速近辺のみを高次外乱オブザーバとし、モータ速度が上がると通常の0次となることから、外乱抑圧性能を上げつつ安定性も確保できる。ゼロ速近辺で生じる非線形摩擦がモデルを直接使用せず補償可能であることをシミュレーションと図2に示す実験結果から確認している。

次に2つ目として、減速機を用いるとモータ側と負荷側慣性の間が「ばね」となり2慣性共振系となり機械共振を誘発する問題がある。従来からの振動抑制制御は、速度制御や位置制御を対象とし、制御的なダンピングを付加する制振手法が用いられる。しかしながら、ダンピングは摩擦を増やすことと物理的に等価であり、結果的に逆駆動性が低下する。そこで本研究では、加速度の次元で振動抑制する「負荷側加速度制御」を提案した。本手法においても図3に示す逆駆動性を低下させずに振動抑制可能なことがシミュレーションと実機実験により確かめられている。

最後の3つ目の問題は、ロボットコントローラの電流制御系の制御帯域が遅すぎることである。従来のPMSM用電流制御の「実効」制御帯域は1~2kHz程度が限界であり、上述の可変次数外乱オブザーバと負荷側加速度制御器の性能低下の主要因になっていることが理論的・実験的に明らかとなっている。そこで、電圧更新に1サンプル遅延が生じない低レイテンシ空間ベクトル変調、絶対値エンコーダの待機時間を回避できる電流ベクトル制御、デッドタイムの著しい短縮が可能なGaNインバータを開発し、図4に示すようにキャリア周波数20kHzで制御帯域4kHzを実現した。

4. 今後の研究の見通し

本研究により多軸ロボットでの逆駆動性の大幅な向上に道筋がついたが、その研究中に、一般的な市販のねじれトルクセンサではレイテンシが物理現象に比較して長大すぎて逆駆動性のボトルネックになることが明らかとなった。そこで、図5に示すセンサを開発し有用であることを確認したが、未だ多軸ロボットでの実証は十分とはいえない状況であるので、今後も継続して研究していく。また、多軸ロボットの場合での大きな問題として、慣性乗積に起因する軸間干渉により 2 慣性共振系ではなく多慣性共振系となって、抑制の難しい機械共振振動が起きる。そこで、軸間干渉を考慮した負荷側加速度制御を考えていく。



図5 「低レイテンシ」ねじれトルクセンサ

5. 助成研究による主な発表論文, 著書名

< 学術論文 (査読付) >

- [1] Hiroataka Muto, Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi, “Time-Variant Haptic Simulator Based on Fine and Fast Real-Time Discretization Using FDTD Method,” *IEEJ Journal of Industry Applications*, vol. 8, no. 6, pp. 926-933, Nov. 2019.
- [2] Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi, “Fine Load-Side Acceleration Control Based on Torsion Torque Sensing of Two-Inertia System,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 1, pp. 768-777, Jan. 2020.
- [3] Yusuke Kawai, Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi, Toshimasa Miyazaki, “Equivalent Resonance Ratio Control in Two-Spring System for Stable Contact Motion in Industrial Robots,” *IEEJ Journal of Industry Applications*, vol. 9, no. 1, pp. 51-60, Jan. 2020.
- [4] Juan Padron, Kiyoshi Ohishi, Yuki Yokokura, Toshimasa Miyazaki, “Velocity Driven N-order Stick Compensator and Slip Suppressor for Nonlinear Friction in an Oil-Seal-Mounted Geared Motor,” *IEEJ Journal of Industry Applications*, vol. 9, no. 2, pp. 168-176, Mar. 2020.
- [5] Yuki Matsui, Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi, Daigo Hotta, Hiroshi Morita, “Quick Force Balance Control Based on Equilibrium Point Movement of Tie-bar Temperature Controllers for Injection Molding Machine,” *IEEJ Journal of Industry Applications*, vol. 9, no. 5, pp. 597-604, Mar. 2020.
- [6] Yusuke Kawai, Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi, “High-Robust Force Control for Environmental Stiffness Variation Based on Duality of Two-Inertia System,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 1, pp. 850-860, Jan. 2021.

< 国際会議論文 (査読付) >

- [1] Shunsuke Suzuki, Yuki Yokokura, Yusuke Kawai, Kiyoshi Ohishi, Toshimasa Miyazaki, “Wideband Load-Side Acceleration Control Based on Load-Side Acceleration Sensing of Two-Inertia System,” The 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON2019-LISBON, pp. 1-6, Oct. 2019.
- [2] Juan Padron, Yuki Yokokura, Yusuke Kawai, Kiyoshi Ohishi, Toshimasa Miyazaki, “Suppression of Stick-Slip in an Oil-Seal-Mounted Geared Motor for Forward-Drivability Improvement,” The 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON2019-LISBON, pp. 1-6, Oct. 2019.
- [3] Yuki Matsui, Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi, “Automatic Force Balance Control for Mold Clamping Device in Injection Molding Machine,” The 6th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization SAMCON2020-TOKYO, pp. 1-6, Mar. 2020.
- [4] Shunsuke Suzuki, Yusuke Kawai, Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi, Toshimasa Miyazaki, “Wide Bandwidth Load-side Acceleration Control for Robust Force Control in Two-inertia System,” The 6th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization SAMCON2020-TOKYO, pp. 1-6, Mar. 2020.

< 受賞 >

第 10 回横幹連合コンファレンス ベストポスター賞 2019 年 11 月 30 日

「ヒューマンインタラクションロボットアクチュエータのための 2 慣性共振系の負荷側加速度制御」