報告書 ngr18011（横倉　勇希）

2019 年　11 月　30 日

2018 年度　永守財団　研究助成　研究報告書

所　属　機　関　名	長岡技術科学大学
職位または役職	助教
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，様々な用途においてロボットの利用が急拡大しているものの，人間の生活空間で人間とロボットが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，人間を殺傷してしまう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，現状のモータ駆動システムの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，位置制御や遅い力制御での駆動の 3 つが考えられ，高い逆駆動性とは程遠いモータ駆動システムの設計と制御がなされていることが挙げられる。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，図 1 に示す技術開発によっ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，ロボット各軸に搭載される減速機付き AC サーボ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，人間との協働に必要となる高逆駆動性モータ駆動システムを実現する。

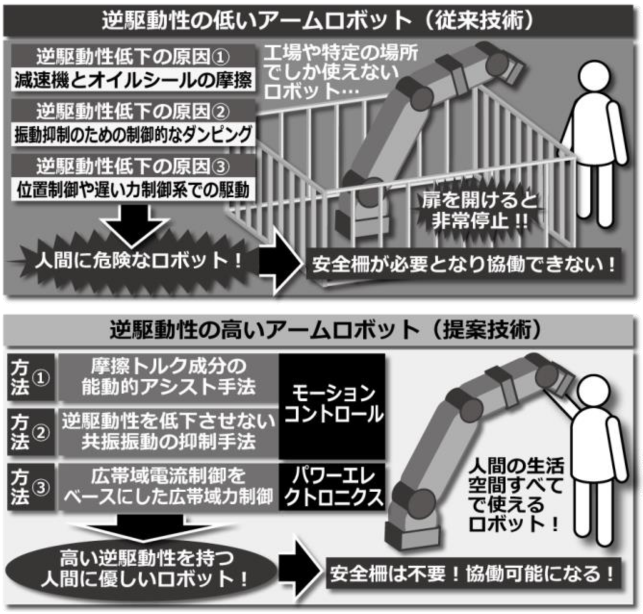

図 1　従来技術と提案技術の比較

3．研究内容及び成果

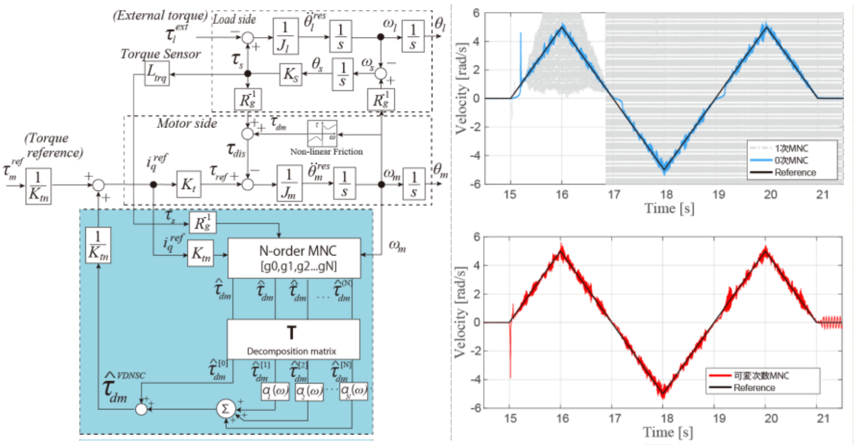

図 2　方法①の可変次数モータ側ノミナル化補償器と実験結果

自宅や職場において身の回りを見渡してみても様々な重労働を肩代わりくれる本格的な人間支援ロボットは未だに見当たらず，その理由は昨今の大多数のモータ駆動システムは逆駆動できず人間を負傷させる危険な存在となっているからである。工場においては「逆駆動性」の低いロボットを安全柵で囲い，人間とロボットを隔離して逆駆動性の問題を回避しているのが現状である。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，逆駆動性が低下してしまう問題の解決を図った。図 1 に示す逆駆動性低下の原因①～③に対して，本研究では高逆駆動性の実現方法①～③を開発した。

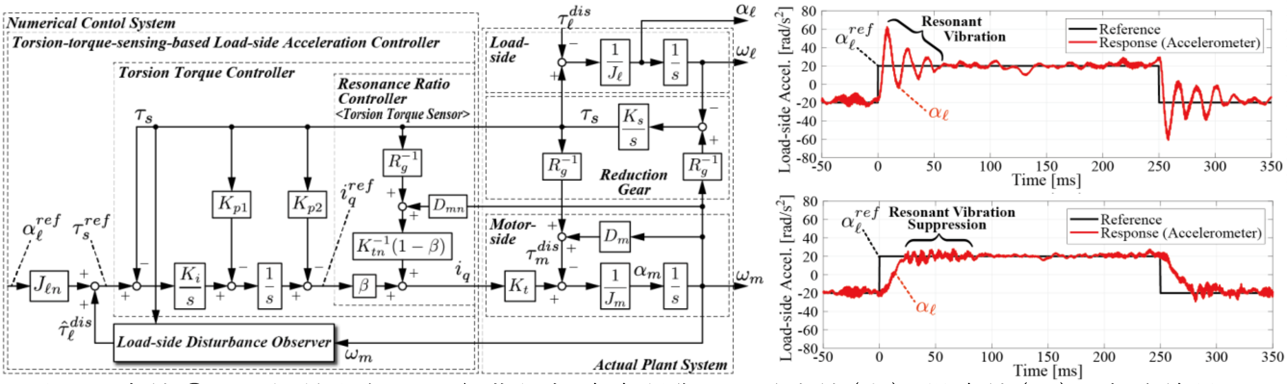

図 3　方法②の 2 慣性共振系の負荷側加速度制御系と従来法（上）と提案法（下）の実験結果

方法①ではオイルシールの非線形摩擦を直接的にモデル化することなく補償可能な可変次数モータ側ノミナル化補償器（MNC）を新たに開発し，摩擦トルク成分を能動的にアシストすることが可能になった。非線形摩擦はゼロ速度付近で顕著に現れるため，ゼロ速度近辺では高い次数を持つ MNC により補償し，増速とともに次数を下げることで，補償能力と安定性の両立が可能になった。図 2 に提案手法のブロック図と実験結果を示す。従来の 0 次 MNC（青）ではゼロ速度付近で非線形摩擦の影響が現れ，単純な 1 次 MNC（灰）では発散してしまっていることが分かる。一方で，提案手法の可変次数 MNC（赤）ではゼロ速度でも指令値に追従し，尚且安定動作する。

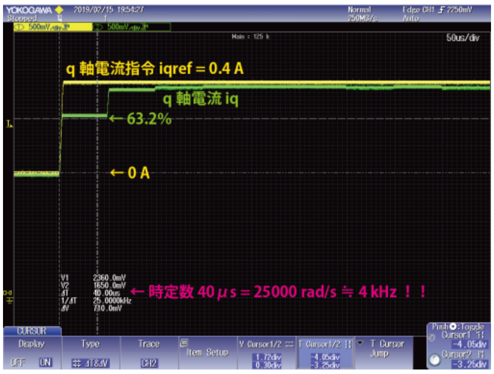

図 4　方法③の広帯域電流制御

方法②では逆駆動性を低下させない共振振動の抑制手法として図 3 に示す 2 慣性共振系の負荷側加速度制御という新たな制御手法を提案した。従来の外乱オブザーバによる加速度制御を 2 慣性共振系に適用すると振動を誘発してしまうが，提案法では加速度の次元で制振できる。

方法③として高速力制御のための広帯域電流制御系を開発した。高い逆駆動性を達成するためには，ロボットの外界からの力に瞬時に反応できる力（トルク）制御が求められ，力（トルク）制御の外側ループ内に存在する内側ループの電流制御系を広帯域化する必要がある。図 4 の実験結果から，およそ 2 サンプルで電流指令に追従し 4 kHz の電流制御が可能となったことが分かる。

4．今後の研究の見通し

研究助成 2018 では速度依存型の可変次数 MNC，2 慣性共振系の負荷側加速度制御，広帯域電流制御により，ロボットの単軸においては逆駆動性の向上が可能となった。しかしながら，3 つの提案手法にはまだ幾つかの課題が残されている。1 つ目においては，速度に対する MNC の次数は実験により試行錯誤的に決定されており，理論的な設計方法が確立されていないこと，および整数次数 MNC だけでなく分数次数の MNC も取り入れることで高性能化する余地があることである。2 つ目の負荷側加速度制御では，内部ループのねじれトルク制御系の広帯域化にまだ余地があること，および市販品のトルクセンサの通信レイテンシが遅く，制御周期を短くできないことが技術的な課題となっている。今後の研究ではそれらの残課題を解決していく予定である。３つの提案手法を多軸モータ駆動システムに拡張し，関節空間ではなく作業空間上での制御構成により，これまでにない高い逆駆動性を持つ本格的な協働ロボットを実現し，社会実装を目指す。

5．助成研究による主な発表論文，著書名

学術論文（査読あり）

1. **Y. Yokokura**, K. Ohishi: “Fine Load-Side Acceleration Control Based on Torsion Torque Sensing of Two-Inertia System,” IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 67, No. 1, pp. 768-777, Jan. 2020 (Early Access).
2. T. P. Thao, K. Ohishi, **Y. Yokokura**: “Fine Sensorless Force Control Realization Based on Dither Periodic Component Elimination Kalman Filter and Wide Band Disturbance Observer,” IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 67, No. 1, pp. 757-767, Jan. 2020 (Early Access).
3. Y. Kawai, **Y. Yokokura**, K. Ohishi, and T. Miyazaki: “Smooth Human Interaction Control using Torsion Torque Controller and Motor-side Normalization Compensator Focusing on Back-forward Drivability,” IEEJ J. Industry Applications, vol. 8, no. 2, pp. 322-333, 2019.
4. H. Muto, **Y. Yokokura**, K. Ohishi: “Time-Variant Haptic Simulator Based on Fine and Fast Real-Time Discretization Using FDTD Method,” IEEJ J. Industry Applications, Vol. 8, No. 6, pp. 926-933, Nov. 2019.
5. J. Padron, K. Ohishi, **Y. Yokokura** and T. Miyazaki: “Velocity Driven N-order Stick Compensator and Slip Suppressor for Nonlinear Friction in an Oil-Seal-Mounted Geared Motor,” IEEJ J. Industry Applications, Vol. 9, No. 1, (Accepted).
6. Y. Kawai, **Y. Yokokura**, K. Ohishi, and T. Miyazaki: “Equivalent Resonance Ratio Control in Two-Spring System for Stable Contact Motion in Industrial Robots,” IEEJ J. Industry Applications, Vol. 9, No. 1, (Accepted).

国際会議（査読あり）

1. H. Muto, **Y. Yokokura**, K. Ohishi, "Haptic Rendering for Time-Variant System Based on FDTD Method Considering Realtime Discretization," The 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON2018, pp. 5092-5097, Oct. 2018.
2. Y. Kawai, **Y. Yokokura**, K. Ohishi, T. Miyazaki, "Force Impulse Control Based on Resonance Ratio Control for Anti-bouncing Motion," The 5th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization SAMCON2019, pp.1-6, Mar. 2019.
3. S. Suzuki, Y. Kawai, **Y. Yokokura**, K. Ohishi, T. Miyazaki, "Contact control of two inertial systems based on velocity damping by equivalent disturbance compensator," The 5th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization SAMCON2019, pp.1-6, Mar. 2019.
4. H. Muto, **Y. Yokokura**, K. Ohishi, "Realtime Discretization of Disturbance Observer Based on FDTD Method for Time-Variant System," The 5th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization SAMCON2019, pp.1-6, Mar. 2019.
5. J. Padron, **Y. Yokokura**, K. Ohishi, "Reduction of non-linear distortion in a stick-slip suppression system using velocity-triggered high-frequency damping," The 5th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization SAMCON2019, pp.1-6, Mar. 2019.
6. J. Padron, K. Ohishi, **Y. Yokokura**, "Stick-slip suppression in geared motor using speed-variant transient components of high-order Motor-side Normalization Compensator," The IEEE International Conference on Mechatronics ICM2019, pp.694-699, Mar. 2019.
7. N. Kamiya, K. Ohishi, **Y. Yokokura**, T. Miyazaki, "Force Sensorless Force Control Using Notch-Type Dual Disturbance Observer," The IEEE International Conference on Mechatronics ICM2019, pp.504-509, Mar. 2019.
8. S. Suzuki, **Y. Yokokura**, Y. Kawai, K. Ohishi, T. 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, pp. 1-6, Oct. 2019.
9. J. Padron, **Y. Yokokura**, Y. Kawai, K. Ohishi, T. 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, pp. 1-6, Oct. 2019.
10. T. P. Thao, K. Ohishi, **Y. Yokokura**: “Advanced Wideband Sensorless Force Control Based on Harmonic Estimation Integrated Singular Spectrum Analysis Based Disturbance Observer,” The 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON2019, pp. 1-6, Oct. 2019.