

2020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

固定子巻線温度オブザーバに基づく高逆駆動性モータ駆動システム

2. 研究目的

本研究の最終的な目的は、将来の人間との協働に必要なロボット用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。近年普及している従来のロボットは生活空間で人間と直接接触して協働するまでには至っていない。その主な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軸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の摩擦が挙げられる。特にアーム型ロボットではモータトルクの増強のために高い減速比が設定され、摩擦が顕著に増大する。そこで本研究では、PMSM(永久磁石同期モータ)の固定子巻線温度オブザーバを活用しモータ単体の最大トルクを限界まで引き上げることで、ロボット駆動に必要な減速比を低減させ、逆駆動性の向上を目指す。



図1 従来の産業用ロボットの問題点と将来必要となる社会に「真に役立つ」協働ロボット

3. 研究内容及び成果

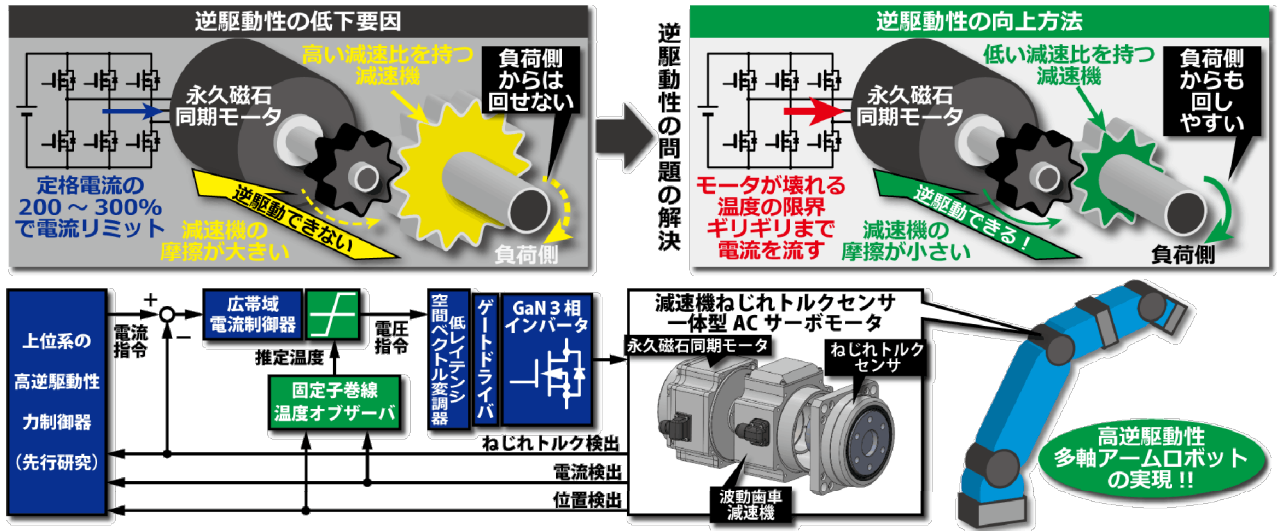


図 2 逆駆動性の低下要因と本研究開発での新たな逆駆動性の向上方法の提案

自宅や職場で身の回りを見渡してみても、物理的な作業を代替できる本格的な人間支援ロボットは未だに見当たらない。近年になり人間のそばで活動できるロボットが開発されているが、広く普及しているのは会話や床清掃するロボットのみである。特にアーム型ロボットは産業界のみに留まり他業界の企業や一般家庭には普及していない。その理由は、昨今の大多数のモータ駆動システムは速度制御や位置制御に特化しており、減速機付きモータの外側からモータ側に向かって逆向きに駆動されることは元来想定されておらず、外力に対して全く柔軟ではない。「逆駆動性」の低いロボットが人間と衝突する事故が幾度となく起きているため、工場においては 図 1 左のように安全柵で囲いロボットを隔離して逆駆動性の問題を回避しており、人間との「協働」とは程遠いのが現状である。そこで本研究では、高い逆駆動性の実現手法を礎として、図 1 右のような社会に「真に役立つ」協働ロボットの開発を計画している。

本研究開発では、逆駆動性の低下要因に対して、先行研究とは異なる図 2 に示す新たな逆駆動性の向上方法により問題を解決する。産業界で広く使われているシリアルリンクアーム型ロボットの場合では各軸に必要なとされるトルクが大きいため、モータ単体の発生トルクでは賄えない。加えて、モータ自体も動かされるためリンクの先端に行くほど軽量でなければならない。そこで減速機を用いてトルクを増強し重量出力比を稼ぐわけであるが、トルクが一番加わる軸では一般的に 1:100~120 という高い減速比に設定されることが多い。減速比が高ければその分だけ摩擦と見かけの慣性も著しく増大し逆駆動性は大幅に低下する。従って、減速比をできるだけ下げ、代わりに重量そのままモータ単体のトルクを大きくできることが望ましい。しかしながら、モータ単体の発生トルクを大きくするために大電流を流すと温度が上昇し回転子磁石が不可逆減磁して破壊に至る。また、温度上昇した上で衝撃が加わると軸受も壊れる。一方で、産業用ロボットに良く用いられるサーボアンプは温度に関係なく定格電流の 200~300% でざっくりと電流リミットを掛けることでモータ自体の破壊を防いでおり、言い換えれば「本当の」瞬時最大電流まで流しきれていない。

そこで本研究では、熱源となっている固定子巻線の温度をセンサレスで推定可能な温度推定器を構成し、固定子巻線から回転子磁石までの熱抵抗と熱容量に基づいて磁石温度を算出した後、推定温度に従って電流制御器の電流リミットを逐次変更することで、従来よりも瞬時最大電流を引き上げることを狙った。ここで問題となるのは、電圧外乱とインダクタンス変動が抵抗値から温度への換算に非常に敏感に効いてくることであり、電圧外乱オブザーバを組み合わせることで温度推定値から外乱を取り除く手法の動作を確認している。本手法により、大トルクを瞬間的に印加してロボットの加速度も大きくできるので、人間や物体との接触力に瞬時に反応して安全を保てるようにもなり、加えて PMSM の瞬時最大トルクが増強されるため、付属の減速機の減速比を下げることができ、結果として高い逆駆動性が実現できる。

4. 今後の研究の見通し

2018～2020 の永守財団研究助成では、「協働ロボットのための高逆駆動性モータ駆動システムの開発」を主題として、高い逆駆動性の実現のために、2 慣性共振系の負荷側加速度制御およびねじれトルク制御、次数切り替え形外乱オブザーバによるモデルレス摩擦補償、実効帯域 4kHz を持つ PMSM 用高速電流制御系と独自開発のサーボアンプ、検出遅れがほぼ無い低レイテンシねじれトルクセンサ、そして不可逆減磁の一手手前まで PMSM を使い切る温度推定器と電流制御系のそれぞれを個別に開発し、それぞれの要素技術を成熟させてきた。今後の研究では、上記の個別の要素技術研究の研鑽を引き続き行うとともに、すべてをまとめて一つの多軸ロボットシステムに統合し、産業界での社会実装を目指す。

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] Hiroki Iwata, Kiyoshi Ohishi, Yuki Yokokura, Yuji Okada, Yuji Ide, Daigo Kuraishi, Akihiko Takahashi: “Robust Estimation Method for Stator Temperature Based on Voltage Disturbance Observer Autotuning Resistance for SPMSM,” *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 9, No. 4, pp. 341-350, Jul. 2020.
- [2] 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, Sep. 2020.
- [3] Yusuke Kawai, Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi, Toshimasa Miyazaki: “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.
- [4] Shunsuke Suzuki, Yusuke Kawai, Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi, Toshimasa Miyazaki, Taiga Shinozaki: “Single-Inertialization Based on High-Backdrivability Control Using Equivalent Disturbance Compensator for Human Interaction Robot,” *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 10, No. 3.
- [5] Juan Padron, Yusuke Kawai, Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi, Toshimasa Miyazaki: “Stable Torsion Torque Control Based on Friction-Backlash Analogy for Two-Inertia Systems with Backlash,” *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 11, No. 2 (Accepted). (他 1 件)

< 国際会議論文 (査読あり) >

- [1] Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi: “Wideband Backforward-Drivability Motor Drive Based on Fast Current Control of Geared SPMSM,” *The IEEE International Conference on Mechatronics ICM2021-CHIBA*, pp. 1-6, Mar. 2021.
- [2] Juan Padron, Yusuke Kawai, Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi, Toshimasa Miyazaki: “Stable Torsion Torque Control for Two-Inertia Systems with Backlash Based on Duality of Nonlinear Friction and Backlash,” *The 7th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization SAMCON2021-CHIBA*, pp. 232-237, Mar. 2021.
- [3] Sora Nagao, Yusuke Kawai, Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi, Toshimasa Miyazaki: “Load-Side Reaction Force Control Based on Model-Matching Controller for Two-Inertia System with Environment,” *The 30th IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE2022-KYOTO*, pp. 1-6, Jun. 2021.
- [4] Juan Padron, Yusuke Kawai, Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi, Toshimasa Miyazaki: “A Method for Gear Impact Suppression in Torsion Torque Control of Two-Inertia Systems with Backlash,” *The 30th IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE2021-KYOTO*, pp. 1-6, Jun. 2021. (他 1 件)

< 受賞 >

IEEE International Conference on Mechatronics 2021, ICM2021 Outstanding Paper Award.
“Wideband Backforward-Drivability Motor Drive Based on Fast Current Control of Geared SPMSM”