

補助事業番号 2024M-381  
補助事業名 2024年度 小型で高トルクなアクチュエータの開発 補助事業  
補助事業者名 中央大学工学部電気電子情報通信工学科 橋本秀紀

## 1 研究の概要

本研究は、高齢化社会における生活支援ロボット（エクソスケルトンや電動車いす）に求められる高トルクかつ小型なアクチュエータの開発を目的としている。特に、ロボットの大型化や追加機構による重量増加を避けるため、温度推定に基づく電流制御技術とセンサレス制御技術を組み合わせ、高出力で軽量なモータを実現する。本研究では、(1)モータとインバータの温度推定法、(2)センサレス高精度位置推定法、(3)温度推定に基づいた適応電流制御法の開発を行い、数値検証および実機検証によってそれらの有効性と汎用性を確認した。本成果を発展させていくことで、従来よりも小型で高出力な福祉介護ロボットの実現が可能となり、高齢者の支援の利便性向上に加え、将来的には人間協調ロボットや自動運搬ロボットなどへの応用が期待される。

## 2 研究の目的と背景

近年、少子高齢化の影響で高齢者の人口割合が増加している。それに伴い高齢者や患者の支援を行うエクソスケルトンや電動車いすなどに注目が集まっている。現状では、ロボットを身に着けることや、屋内での使用は大きさによる制約が伴う。また、それらロボットの自重によって装着者や搭乗者自身の身体への負担が余分に生じてしまう。そのため、自律化された産業用ロボットなどと比べてこれらのロボットは高トルク化かつ小型化の両立が要求される。しかし、高トルク化の実現には大型化や外部機構の追加などによるロボットの大型化につながる課題が残っている。

本事業は、小型で高トルクなアクチュエータの開発を目的とする。具体的には、モータとインバータの温度制約下において瞬時的に定格以上の電流を流すことで高トルク化を実現する。また、モータの位置センサの代わりに、センサレス制御も行うことで、アクチュエータの小型化も同時に検討する。これにより、追加機構を用いることなくモータのみで出力を最大化することが可能である。さらに、モータの高トルク化のために追加機構を必要としないので、様々な電動モータに適用することができ、アクチュエータの選択肢の幅を広げることができる。

## 3 研究内容

### (1) モータとインバータの温度推定法の開発に関する研究

本研究項目は、モータ（具体的なモータ内部のコイル）の温度を高精度に推定することを目的として数式モデルの導出、パラメータの導出、実験、問題点の明確化を行った。まず、モータに生じる熱の種類を分類化し、発生する熱および放射される熱、対流熱伝達を

考慮したモデルの作成を行った。また作成したモデルのパラメータを図1に示すシステムを用いて同定することを試みた。

さらに、実際の動作時に対応するために図2に示す実験装置を構築し、回転数を考慮した熱回路網法のパラメータ調整法を開発した。また、インバータについても検討を行い、実際にインバータをモデル化し、熱推定式に組み込んだ手法を提案した。

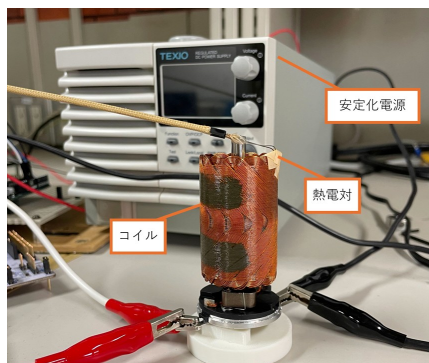


図1 研究内容(1)用いた計測システム

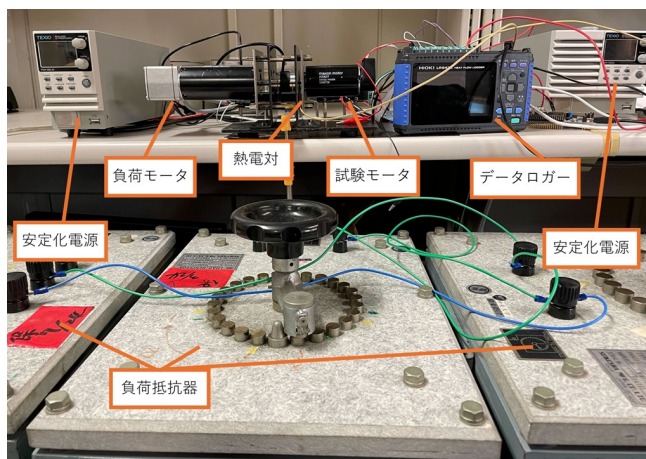


図2 本研究用いたモータのコイル温度推定システム

## (2) センサレスの高精度化の開発

本研究項目では、センサレス制御の高精度化の実現を目的とし、位置センサの代わりに、電流の微分値情報をもとに磁極位置を推定するセンサレス制御法の開発を行った。シミュレーションによる検証を通して、システムの位置推定精度の改善を試みた。また、磁極位置推定の誤差低減のため、ニューラルネットワークベースのフィルタを用いて外乱成分を除去する手法を開発した。最後に実機による検証を行い、フィルタの有効性を確認した。

## (3) 温度推定によるモータの電流制御法に関する研究

本研究項目では、モータとインバータの推定した温度から、適応的に最大電流を制御する手法の開発を行った。提案したシステムは、モータとインバータに統合的な温度制約を設けることで、減速機やヒートシンクといった追加機構を用いることなく高トルク化を実現できる可能性があることが示された。トルク測定器において実際にモータの負荷性能を評価し、制御法の有効性・2つのタイプの電動モータにおける汎用性を確認した。

## 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究はモータ（アクチュエータ）の小型化に着目し、ロボットの大型化や追加機構を使用しない高トルク化を目指している。本研究が完成すれば、既存のエクソスケルトンや電動車いすよりも高出力かつ小型なロボットを製作することができ、高齢者や患者の支援や、電動車いすでの段差乗り上げ時などにおいて利便性を大きく向上させることが可能である。さ

らには、高齢化の進む社会での若年労働力不足の問題を解消するための全自動運搬ロボットの実現や、人間協調ロボットへの活用が期待できる。

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

補助事業実施者は長きにわたり、計測制御システム、ロボティクスシステムに関する研究に着手している。小型で高トルクなアクチュエータの開発は、モータの普及に伴い、多くの企業および研究者が取り扱う課題である。その中でも、補助事業実施者は、そのバックグラウンドであるロボティクス分野での小型で高トルクなモータの必要性を感じており、モータのセンサレス制御による小型化および熱推定による高トルク化の研究について五年ほど前から準備を行ってきた。その中で、本補助事業によって研究助成を受けられたことでロボット用の小型アクチュエータを具体的なアプリケーションとして研究開発を実施でき、良好な成果を得ることができた。今後は、より多くの研究者や社会から注目される技術になると思われる。

#### 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

1. 稲田祐希, 大平峻, **橋本秀紀**, 誘起電圧オブザーバによるセンサレス制御の高精度化, 2024年電気学会産業応用部門大会 2024年8月28日
2. 假水統馬, 大平峻, **橋本秀紀**, ニューラルネットワークを用いたモータ内のコイルの温度推定, 2024年電気学会産業応用部門大会 2024年8月28日
3. Yuto Watanabe, Takashi Ohhira, **Hideki HASHIMOTO**, Embedded Magnetic Absolute Encoder in SPMSM with Permanent Magnets of Different Magnetic Flux Densities, The 50th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2024) 2024年11月5日
4. 高島 航平, 大平 峻, **橋本 秀紀**, ADALINE Networkとループ整形による偏心型磁気式アブソリュートエンコーダの精度向上, 第25回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 2024年12月20日
5. 渡辺 悠斗, 大平 峻, **橋本 秀紀**, 磁束密度が異なる永久磁石を用いた磁力差型 SPMSMに関する研究, 第25回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 2024年12月20日
6. 山下 朋佳, 大平 峻, **橋本 秀紀**, ADALINE ネットワークベースのフィルタによるPMSMの電流微分値を用いたロータ位置推定の高精度化, 第25回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 2024年12月20日
7. Tomoka Yamashita, Kohei Takashima, Takashi Ohhira, **Hideki Hashimoto**, Improved Accuracy of Rotor Position Estimation in PMSM Deadbeat Predictive Control Using ADALINE Network-based Filter, The 2025 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM' 25) (69) 2025年3月2日

8. Kohei Takashima, Tomoka Yamashita, Takashi Ohhira, Hideki Hashimoto, Improving the Accuracy of Eccentric Magnetic Absolute Encoders Using Radial Basis Function Neural Network and Third-Order PLL, The 2025 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM' 25) (83) 2025年3月2日

## 7 補助事業に係る成果物

### (1) 補助事業により作成したもの

モータコイル温度計測システム (図1参照)

モータ温度測定システム (図2参照)

ラズベリーパイを用いたセンサ信号取得システム (下図参照)



図3 本補助事業で作成したラズベリーパイによるセンサ信号取得システム

### (2) (1) 以外で当事業において作成したもの

特になし

## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 中央大学理工学部 (チュウオウダイガクリコウガクブ)

住 所： 〒112-8551

東京都文京区春日1丁目13-27

担 当 者： 教授 橋本秀紀 (ハシモト ヒデキ)

E - m a i l : hashimoto@elect.chuo-u.ac.jp

U R L : <https://sites.google.com/g.chuo-u.ac.jp/hhlab>