

2021年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	岐阜大学
職位または役職	特任助教
氏名	八田 禎之

1. 研究題目

磁気ねじ構造に基づいた二自由度モータにおける位置・力ハイブリッド制御

2. 研究目的

本研究は、ロボットの小型化を実現すると共に、エネルギー効率の向上を目的とした磁気ねじ構造に基づいたラジアルギャップ型二自由度モータの開発を行う。

現在、ロボットは社会を支える重要な要素の一つであり、少子高齢化による労働者の減少においてその需要がますます高まっている。ロボットは単純な荷物の搬送だけでなく、手先に装着されるツールを用いた研磨・バリ取り等の加工工程にも導入されている。また、ロボットには、手先を所定の位置に移動させる位置制御だけでなく、所定の力を出力する力制御も一般的に導入されつつある。力制御の適用により、位置制御では難しかった微小なバリ取りにも適用可能となった。ロボットは今後活用の幅がさらに広がることが予測されるが、サイズ及び重量により導入の難しい環境が考えられる。ロボットのサイズ及び重量の課題を解決するために、ロボット及びそのツールに搭載される複数台分のモータの動作を一台で実現可能な多自由度モータの研究が数多く行われている。

本研究は、ロボットにおける小型化を目的として磁気ねじ構造に基づいたラジアルギャップ型二自由度モータの開発研究を行う。本二自由度モータには、ボールねじを永久磁石によって再現した磁気ねじ構造が適用されている。磁気ねじは、ボールねじのスクリューとナットに相当する部品が磁力によって結合されており、非接触となっている。そのため、磁気ねじ構造が適用された本二自由度モータは、摩擦等によるエネルギー損失を抑制しつつ、推力の向上を実現する。

最初に、本二自由度モータにおいて回転及び直動を独立に制御可能な制御器を設計する。特に、位置制御と力制御のように異なる制御が回転方向と直動方向に適用された場合にも独立に制御可能な位置・力ハイブリッド制御の実現を目指す。次に、その設計に基づいて本二自由度モータの改良を行い、改良した実機により設計した制御器の検証を行う。

3. 研究内容及び成果

本研究では、磁気ねじ構造に基づいた二自由度モータにおける位置・力ハイブリッド制御を実現するために、モード分解に基づいた制御手法を導出した。本二自由度モータは、二個の固定子と、二個の回転子、そして出力である一個の可動子から構成される。二個の回転子の回転に応じて、可動子には推力及びトルクが発生する。しかしながら、本二自由度モータのプラントモデルは図 1 に示すように複雑な構造となっている。そこで、二個の回転子の回転角の和に応じたモータ動作を和のモード、二個の回転子の回転角の差分に応じたモータ動作を差のモードとすることにより、本モータのプラントモデルを図 2 のように独立な二つのモデルに分解可能であることを示した。

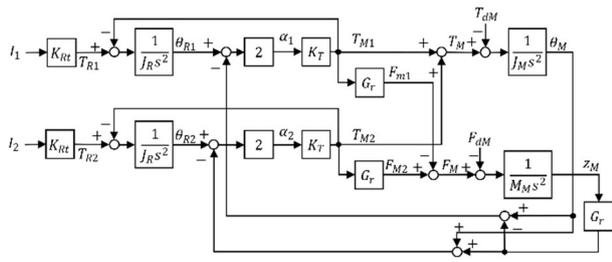


図 1 磁気ねじ構造に基づいた二自由度モータのプラントモデル

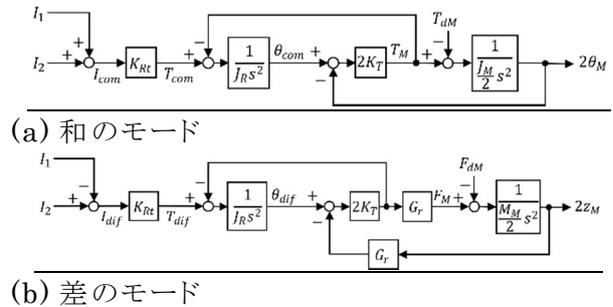


図 2 プラントモデルの等価変換

図 2 の和のモードは可動子の回転動作に作用し、差のモードは可動子の直動動作に作用する。したがって、図 3 に示すように和のモードにおいて位置制御を実装し、差のモードにおいて力制御を実装することにより位置・力ハイブリッド制御を実現する。また、図 2 からわかるように、それぞれのモードにおけるプラントモデルは一般的な二慣性系モデルである。

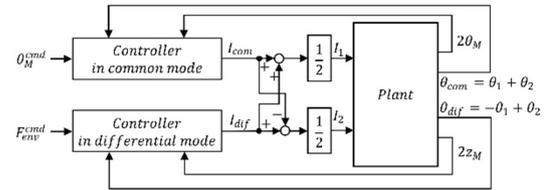
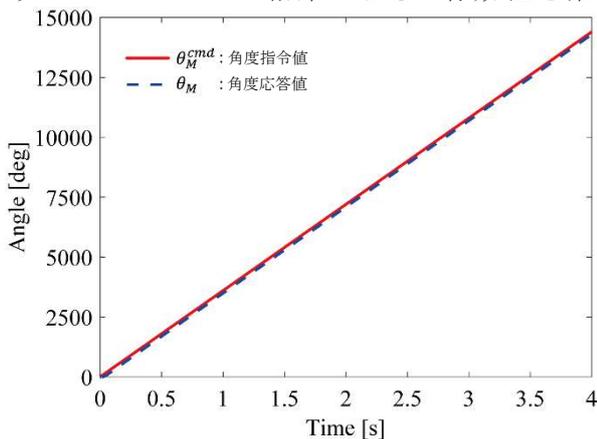
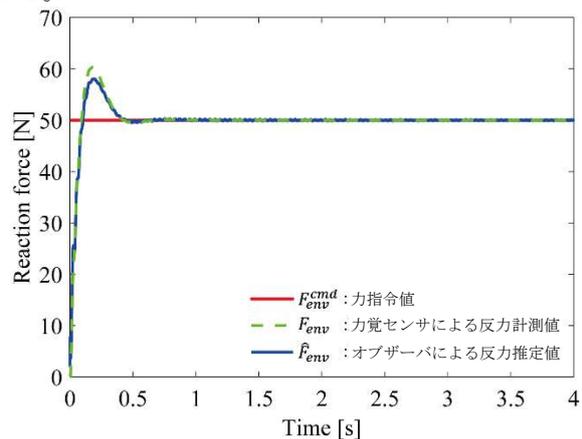


図 3 位置・力ハイブリッド制御におけるブロック線図

したがって、それぞれのモードにおいて二慣性系モデルの制御手法を適用可能である。各モードにおいて二自由度制御とカスケード制御を組み合わせた制御器を適用した。シミュレーションにおいてドリルのように等速度回転を行いながら、一定の力で押し付ける動作の検証を行い、図 4 に示すようにシミュレーション結果からその有効性を確認した。



(a) 可動子の角度応答値



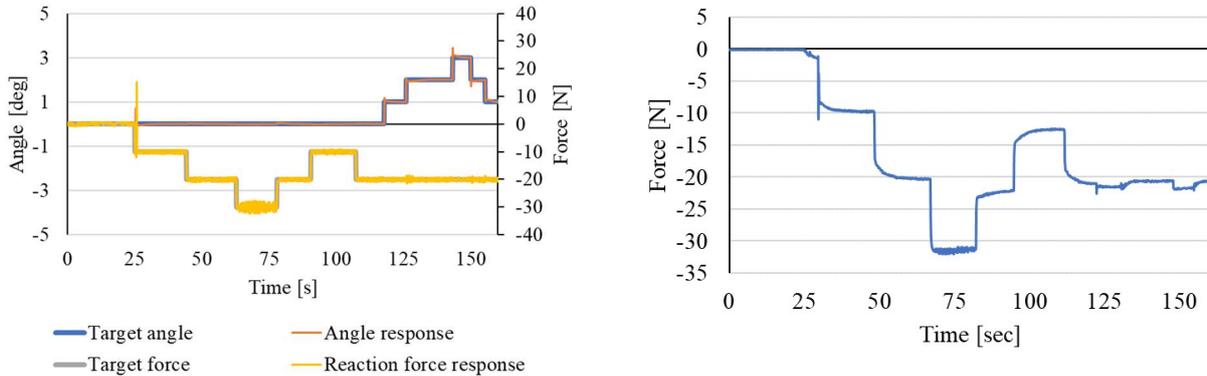
(b) 可動子における力応答値

図 4 シミュレーション結果

また、実機検証を行うにあたり高精度な反力推定を可能とするために、回転エンコーダの交換を含めた実験機の改良を行った。改良後の実験機を図 5 に示す。この実験機による実験結果を図 6 に示す。図 6 (a)からわかるように、力指令値が変化した際、角度が変化することなく反力が指令値に追従していることがわかる。また、角度指令値が変化した際、反力が変化することなく角度が指令値に追従していることがわかる。しかしながら、図 6 (b)の力覚センサでは反力がわずかに誤差を有していることが確認できた。これは、摩擦モデル及びモータパラメータを十分に同定できていないためと思われる。



図 5 改良後の実験機



(a) 可動子の角度及び推定反力応答値

(b) 力覚センサによる計測値

図 6 実験結果

4. 今後の研究の見通し

研究成果において示したように、摩擦モデル及びモータパラメータの同定が十分でなかったために、反力において誤差が確認できる。周波数特性を計測可能な環境を構築し、周波数特性等に基づいて十分なパラメータ同定を行っていく予定である。

また、本モータは可動子の直動及び回転を計測する直動エンコーダ及び回転エンコーダと、二個の回転子の回転を計測する回転エンコーダの合計四個のエンコーダを必要とする。本二自由度モータの開発目的である小型化を実現するためにはエンコーダの削減も重要である。そこで、図 2 に示す二慣性系モデルの特性を生かし、可動子側エンコーダによって、回転子の角度を推定する手法を開発する。2022 年度では、回転モータと減速機を組み合わせた一般的な二慣性系モデルで検証を行い、その検証結果に基づいて 2023 年度にはその推定手法を本二自由度モータに適用し、二個のエンコーダのみで位置・力ハイブリッド制御を実装する。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

1. Yoshiyuki Hatta, Kazuaki Ito, and Yasutaka Fujimoto "Preliminary Analysis for Two-Degree-of-Freedom Magnetic Geared Screw Motor with High Torque Density," 2022 17th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, AMC2022, pp. 24-29, Feb. 2022 (査読あり).
2. 八田 禎之, 伊藤和晃, "二慣性系における負荷側角度と非線形カルマンフィルタに基づいた駆動側角度推定," 2022 年電気学会産業応用部門大会, No. 2-10, pp. II-97-II-102, Sep. 2022.
3. Yoshiyuki Hatta and Kazuaki Ito, "Hybrid Angle/Force Control for Two-Degree-Of-Freedom Magnetic Screw Motor", Society of Instrument and Control Engineers Annual Conference 2022 (SICE2022), No. FrA02.6, pp. 874-877, Sep. 2022 (査読あり).