

2023 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	岐阜大学 工学部 機械工学科 知能機械コース
職位または役職	助教
氏名	八田 禎之

1. 研究題目

磁気ねじ型二自由度モータにおけるセンサレス位置・力ハイブリッド制御

2. 研究目的

本研究は、図 1 に示す磁気ねじ型二自由度モータにおける可動部品の位置を検出するエンコーダの台数削減を目的とする。磁気ねじ型二自由度モータは一台で回転モータとリニアモータの動作を実現可能なモータである。前々年度では、本モータの動力学モデルにモード分解を適用することによって回転動作及び直動動作を独立な二慣性系に等価変換し、回転方向の位置と直動方向の推力を独立かつ同時に制御可能な位置・力ハイブリッド制御を開発した。しかしながら、本モータの制御では、図 1 に示すように右ねじ回転子部の回転角度、左ねじ回転子部の回転角度、可動子部の回転角度及び直動位置をそれぞれ検出する必要がある。すなわち、合計 4 個のエンコーダが必要となる。そこで、前年度の研究では磁気ねじ型二自由度モータにおけるエンコーダ削減の基礎的な検討を行った。その検討として、一般的な二慣性系に対して駆動側位置エンコーダを使用せず、負荷側位置エンコーダのみでフルクロード制御を実現する駆動側位置センサレス制御を開発した。本年度は、前年度の「二慣性系における駆動側位置センサレス制御」と前々年度の「磁気ねじ型二自由度モータにおける位置・力ハイブリッド制御」を統合し、「磁気ねじ型二自由度モータにおけるセンサレス位置・力ハイブリッド制御」の研究開発を行う。

前年度の「二慣性系における駆動側位置センサ

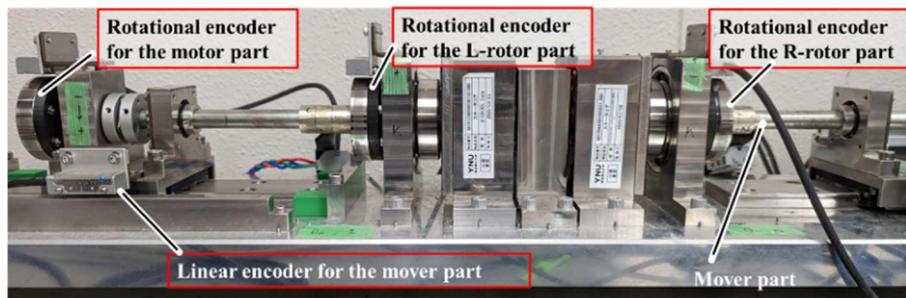


図 1 磁気ねじ型二自由度モータの実験機

レス制御」では、動力学モデルと電気回路モデルから導出した非線形状態方程式に基づいて駆動側位置を推定する拡張カルマンフィルタを構築した。磁気ねじ型二自由度モータでは、動力学モデルの等価変換後、可動子部の回転角度及び直動位置が二慣性系における負荷側位置に相当し、右ねじ回転子部及び左ねじ回転子部の回転角度から求まるモード次元の回転角度が二慣性系における駆動側位置に相当する。そこで、本研究では動力学モデルだけでなく電気回路モデルも含めた磁気ねじ型二自由度モータのモデルに対してモード分解を適用し、電気回路の次元から独立な二慣性系を確立する。その上で、モード次元の回転角度推定と、その推定値を用いた位置・力ハイブリッド制御の実現を目指す。これにより、磁気ねじ型二自由度モータの実用化に貢献する。

3. 研究内容及び成果

申請時の実施計画に従い実験機のモデル同定を行った。実験機として、図 1 に示す磁気ねじ型二自由度モータを使用し、図 2 のブロック線図によって示されるモデルの同定を行った。本モデル同定として、周波数特性の計測を行った。計測結果を図 3 及び 4 に示す。図 3 は図 2(a)のブロック線図に相当する周波数特性を示し、図 4 は図 2(b)のブロック線図に相当する周波数特性を示す。図からわかるようにそれぞれ二慣性系の特性を示しており、図 2 のブロック線図の有効性を示す結果が得られた。

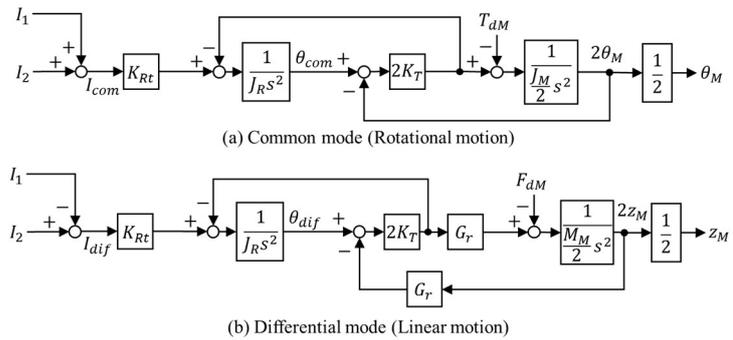


図 2 等価変換後のブロック線図

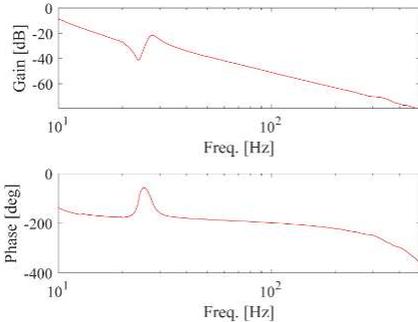


図 3 和のモードにおける周波数特性

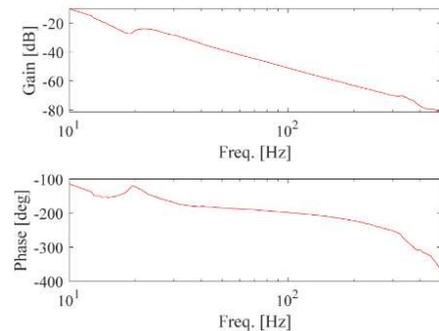


図 4 差のモードにおける周波数特性

同定結果に基づいて、右ねじ/左ねじ回転子部の回転角度、右ねじ/左ねじ固定子部の q 軸電流を推定する拡張カルマンフィルタ (EKF: Extended Kalman filter) を設計し、シミュレーションによってその性能を検証した。可動子を一定速に回転させながら、一定の推力で押し付けるハイブリッド制御を実行している際にセンサによって計測した値と EKF 及びマルチエンコーダ型反力推定オブザーバ (MEBRFOB : Multi-encoder-based reaction force observer) によって推定した値の比較結果を図 5~7 に示す。

図 5 及び 6 は、2 個の回転子の回転角度及び q 軸電流を示す。 θ_1 及び I_{q1} は右ねじ回転子

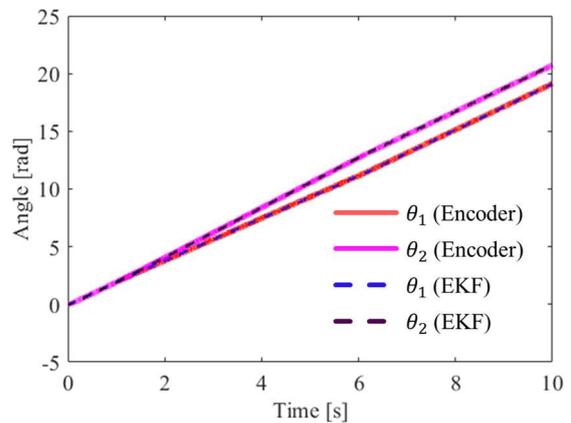


図 5 回転子の回転角度

部の回転角度及び右ねじ固定子部の q 軸電流を示し、 θ_2 及び I_{q2} は左ねじに関するものを示す。両図ともに、EKFによる推定値がセンサ値に追従していることがわかる。また、図7は、可動子部の反力(推力)におけるセンサ値及びMEBRFOBの推定値を示す。MEBRFOBは、EKFによって推定された q 軸電流及び回転子部角度、エンコーダで計測された可動子部の直動位置を用いて反力を推定する。図より推定値のオーバーシュートが確認できるが、推定値がセンサ値に追従していることがわかる。このように、磁気ねじ型二自由度モータにおけるEKF及びMEBRFOBの有効性がシミュレーションによって確認できた。そして、そのEKF及びMEBRFOBによる推定値をフィードバックするセンサレスハイブリッド制御器を図8に示すように設計した。

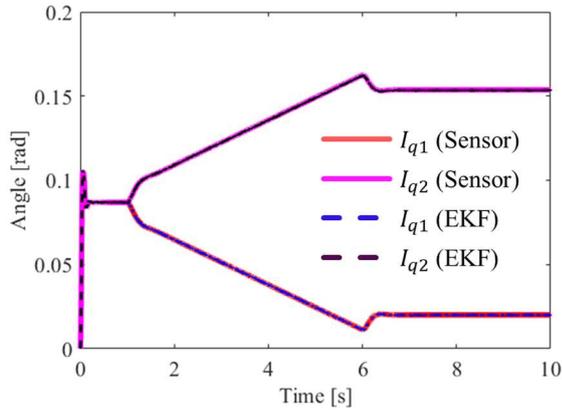


図6 q 軸電流

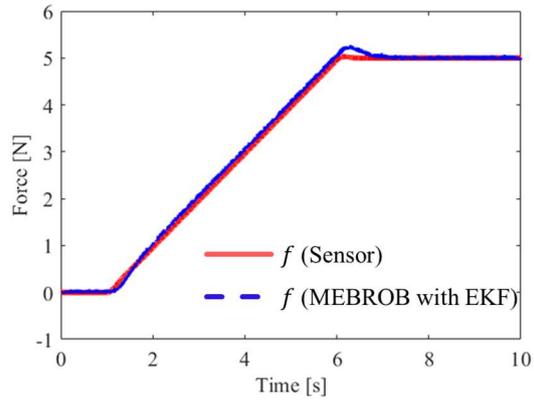


図7 可動子の反力

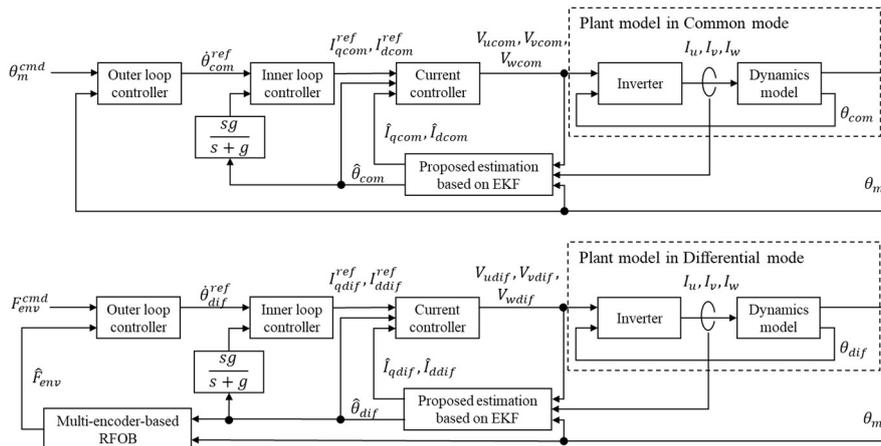


図8 EKF及びMEBRFOBを用いたセンサレスハイブリッド制御のブロック線図

4. 今後の研究の見通し

引き続き、磁気ねじ型二自由度モータにおけるセンサレスハイブリッド制御の研究を進める。今回は、シミュレーションによってEKF及びMEBRFOBを組み合わせた推定の有効性を確認できたが、その実機による推定及びフィードバック制御がまだ実現されていない。EKF及びMEBRFOBの推定精度が不十分であることが原因と考えられるため、EKF及びMEBRFOBの性能向上を進める。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

- 1 Yoshiyuki Hatta and Kazuaki Ito, “Design of Hybrid Angle/Force Control for Two-Degree-of-Freedom Magnetic Screw Motor Based on Modal Information,” IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.13, No.2, pp.155-164, 2024 (査読あり).
- 2 大学見本市 2024, “低損失及び高推力/トルク密度を実現する直動/回転モータの開発,” 2024年8月22, 23日