

2022年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	立命館大学 理工学研究科 機械工学科
職位または役職	助教
氏名	趙 成岩

1. 研究題目

データ駆動型 LQG を用いた 5 軸制御型のセルフベアリングモータの最適制御

2. 研究目的

近年、SDGs やカーボンニュートラルの達成のためモータの効率改善の要求が高まっている。磁気軸受は、回転軸を非接触で支持するため摩擦損失が低減し、特に高速回転において効率を大幅に改善することができる。また、体内埋め込み型人工心臓など小型化と単純化が要求される機器に用いるため、磁気軸受とモータを一体化したセルフベアリングモータ(ベアリングレスモータ次頁図 1)が提案されている。5 軸制御型セルフベアリングモータは、簡単な構造でありながら、5 軸の位置制御とモータの回転制御を行うことができるため、様々な分野への応用が期待できる。5 軸制御型セルフベアリングモータの問題点として、モデルの変動や不確かさへの対応が挙げられる。セルフベアリングモータはロータダイナミクス、磁気回路、電気回路が複雑に絡み合うため、正確なモデルを導出することが難しく、制御性能に限界が生じる問題がある。この課題に対して本研究では、より正確なモデリング手法を検討するとともに、モデル変動や不確かさを考慮した制御系設計方法を開発する。これらにより、より安定した浮上回転制御の実現を目指す。

3. 研究内容及び成果

データ駆動型 LQG を用いた 5 軸制御型のセルフベアリングモータの最適制御を研究目的とし、以下の成果を得た：

研究成果 1:電磁力学による 5 軸制御型セルフベアリングモータのモデルの構築

モデル作成では、有限要素法を用いることで、より実際の装置に近い磁束密度分布や電流分布を求め、制御電流から制御力までのモデルを作成する。そしてロータを固定した状態での制御力の測定を行い、モデルの精度を検証する。さらにロータを回転させた状態での制御力の測定も行い、回転時の影響をモデルに組み込む。有限要素解析ソフト JMAG と MATLAB/Simulink を用いてモデルを作成する。モデルの検証には図 2 に示した実験装置を用い、6 軸力覚センサを用いてモータトルクや制御力を測定する。静的な測定を行う場合はロータに力覚センサを取り付け、ロータを回転させて測定を行う場合は、ステータに力覚センサを取り付けて反力を測定する。これらの測定装置は新たに製作する必要がある。また実応用のため、駆動回路を原理検証に用いたパワーオペアンプから三相インバータへ変更して測定を行う。

結果として、シミュレーション実験により、当モデルが該当する電磁気特性に合わせるかどうかを検証し、モデルの有効性を把握した。この成果は、査読付国際会議で発表された。

研究成果 2:入出力データを用いたセルフベアリングモータの回転位置や姿勢制御法の構築

実際の装置ではロータ磁石による磁束密度分布とステータの電流分布を理想的な正弦波状にすることができないため、ロータの回転位置や姿勢によって発生する軸受力が影響を受け、またモータの出力トルクの大きさによってパラメータが変動する問題がある。また、現実制御対象のすべての動的特性や非線形効果を完璧に捉えることができないため、モデルの不正確性が生じる可能性がある。実システムには、パラメータが時間とともに変化する可能性があるか、または測定誤差のために不確実性を持つ可能性があり、制御性能に影響を及ぼす可能性がある(図 3)。

データ駆動型 LQG 制御(図 4)では、過去のデータからモデルを学習し、学習したモデルを使用して制御を行う。LQG 制御とは、状態フィードバック制御とカルマンフィルタを組み合わせた制御方法である。状態フィードバック制御は、状態量を直接観測してフィードバックすることにより、状態変数を最適に制御する。データ駆動型部分は、モデルフリーの制御手法であり、センサから得られる実測データを基に、システム状態推定やフィードバック制御を行う。

シミュレーション実験により、提案された制御方法には制御パラメータがオンラインで調整でき(図 5)、回転位置の安定性を大幅に向上させる(図 6)。この成果は、国際会議で発表された。

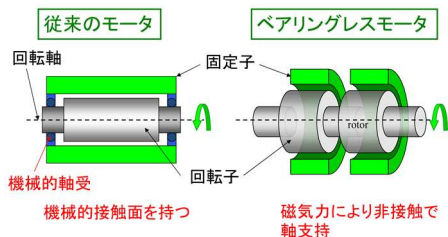


図 1. セルフベアリングモータの特徴

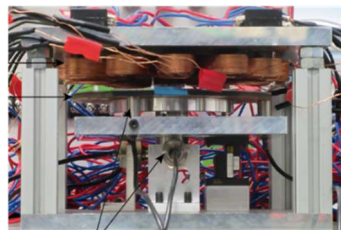


図 2. 実験装置

実際の対象(外乱, モデル化困難な要素)

高次元非線形モデル (物理知識からのモデル)

低次元線形モデル (制御器設計のモデル)

図 3. 実対象からの困難点

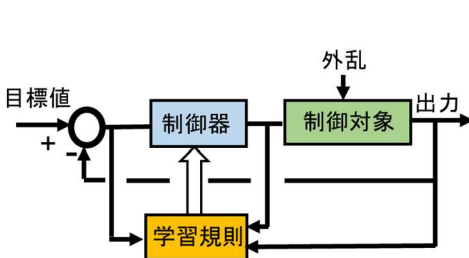


図 4. 実対象からの困難点

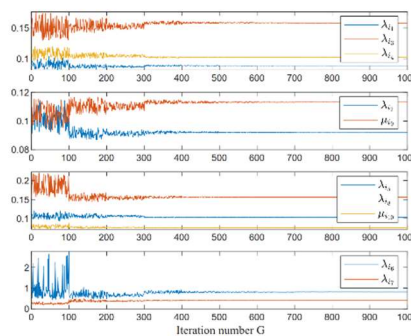


図 5. 制御パラメータ自動調整

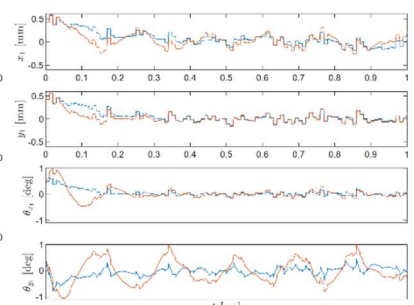


図 6. モータ軸の変位と偏角 (青い線:提案法. 赤い線: LQG 手法)

4. 今後の研究の見通し

上記の研究成果に沿って、モータの小型化、データによる制御方法の開発、または、物理装置での実験に取り込む。

課題 1: 小型化セルフベアリングモータの開発

ベアリングレスモータ(図 1)は、電磁石や永久磁石の磁気力を用いて、主軸の非接触支持・回転が可能な次世代モータである。転がり軸受等の機械接触式の軸受が不要(ベアリングレス)なため、摩擦・摩耗が無く、高速駆動可能、高寿命、無発塵、オイルレス等の特長がある。近年、半導体・液晶製造分野での純水・薬液搬送用ポンプや補助人工心臓等に应用され、注目されている。小型セルフベアリングモータの開発は、デバイスやシステムの設計においてスペースと重量の制約が厳しい場合に特に重要となる。

課題 2: 多様なデータ駆動方法を用いた制御方法を開発し、優位性を示す

今まで採用されたデータ駆動方法は反復計算法となる。将来的に採用されたデータ駆動型方法には、SVM、ニューラルネットワークや自適応少なくとも 3 つの方法を採用する。反復計算法シミュレーションによる検証で完了したが、今後はさまざまなデータ駆動型デザインアプローチの性能を比較するために、代表的なアプローチを用い、シミュレーション実験によって比較する。

課題 3: 物理装置での実験によって提案手法の実用化を探究する

実機実験により、データ駆動型 LQG 制御を実応用に展開する。モータ制御において、高性能な制御を実現するために、データ駆動型制御が有効であると考えられている。図 7 に予定スケジュールを示す。本研究の成果物は、モータ制御に関する知識の深化、および性能の向上に貢献することが期待される。また、この研究は、データ駆動型制御アルゴリズムの開発に対する理解を深め、より効率的で正確な制御システムの開発につながることを期待される。

	9~12月	1~3月	4~6月	7~9月
モデルの作成と検証 (完成)				
制御系設計	←→			
装置実験の検証		←→		

図 7. 予定スケジュール (2023 年度)

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

国際会議(査読付)

Bo Li, Satoshi Ueno, Chengyan Zhao, “Data-Driven Iterative Learning LQG Control of Axial-Gap 5-DOF Self-Bearing Motor”, 2022 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS), Toyama, Japan, 2022.12.

国内会議

大坪 太陽, 趙 成岩, 上野 哲, 「±2 極磁界を用いたアキシシャルフラックスセルフベアリング永久磁石モータの支持力測定」, 第 35 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 広島, 2023. 06.