

## 2023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(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

**研究成果 1: 非線形制御手法によるセルフベアリングモータの軸方向変位制御の改善**

本年度の研究では、磁気軸受モータの軸方向変位制御に焦点を当て、非線形制御手法を適用して線形制御器設計モデルに変換する方法を開発した。具体的には、状態フィードバック線形化を用いて、システムの非線形動特性を線形状態空間モデルに変換した。これにより、従来の線形制御設計手法を適用可能とし、制御器の設計と実装を容易にした。

制御入力的设计においては、システムを線形化・デカップリングするための入力を導出し、各出力に対する相対次数を計算することで、システムが完全にフィードバック線形化可能であることを示した。また、仮想制御入力を導入し、比例微分 (PD) 制御器を設計することで、出力が参照信号に正確に追従するようにした。

さらに、パラメータ推定誤差の存在下でのシステムの安定性を確保するために、リアプノフ関数に基づく安定性解析を行った。具体的には、パラメータ不確実性がシステムの誤差動特性に及ぼす影響 (図 3) を考慮し、誤差の最終的な有界性を示した。これにより、提案した制御戦略がパラメータ不確実性に対してもロバストであることを確認した。この成果は、高精度なセルフベアリングモータの制御に貢献するものであり、学術的にも実用的にも重要な意義を持つ。

**研究成果 2: 入力出力データ駆動型 LQG 制御によるセルフベアリングモータ制御**

本研究では、入力出力行動モデルを用いたデータ駆動型の線形二次ガウス (LQG) 制御手法を、傾斜制御型軸間隙セルフベアリングモータの変位制御に適用した。従来の LQG 制御は多くの実用的な問題で広く用いられているものの、非線形プロセスや高次の動的モデリング、モータの複雑な構造やノイズによる悪影響を効果的に扱うことが難しいという課題があった。

本研究では、この問題を解決するために、システムの実際の入力出力データを最大限に活用して、システムの動的挙動を再構築し、動的な状態推定に依存しない静的なフィードバック制御ゲインを計算する手法を提案した。これにより、モデルフリーのデータ駆動型手法で得られる動的フィードバックゲインと競合する性能を持つ制御器を設計することが可能となり、軸間隙セルフベアリングモータの変位制御性能を効果的に向上させた。

具体的な取り組みとして、まず、傾斜制御型軸間隙セルフベアリングモータの動的モデルを構築し、動作点での線形化された状態空間モデルを取得した。次に、データ駆動型アプローチを用いて、入力出力データからシステムの動的挙動を再構築した。この際、従来の状態空間モデルで必要とされる動的な状態推定を排除し、制御設計の簡素化と実装効率の向上を図った。

制御器の設計には、勾配降下法を用いて静的なフィードバックゲインを計算し、システムの安定性と性能を保証した。このアプローチにより、従来の方法では対処が難しかった非線形性やノイズの影響を効果的に緩和することが可能となった。提案したデータ駆動型 LQG 制御手法は、ノイズの存在下でも軸間隙セルフベアリングモータの変位制御において高い性能を発揮することが確認された。また、外乱やパラメータ不確実性に対してもロバスト性を示し、制御精度の向上に寄与することが示された。

この成果は、高次元かつ非線形なモータシステムへのデータ駆動型制御手法の適用可能性を示すものであり、特に複雑なシステムに対する最適制御の分野に新たな道を開くものである。今後、リアルタイムでの実装や実機への適用を通じて、より広範な応用への展開が期待される。

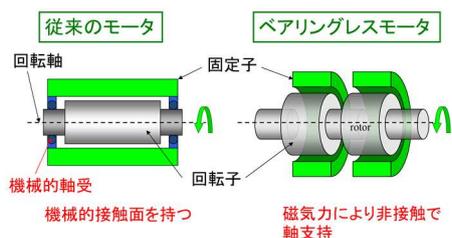


図 1. セルフベアリングモータの特徴

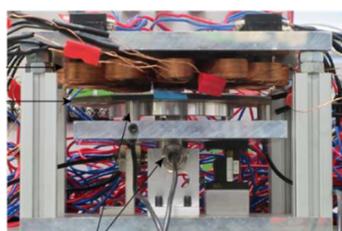


図 2. 実験装置

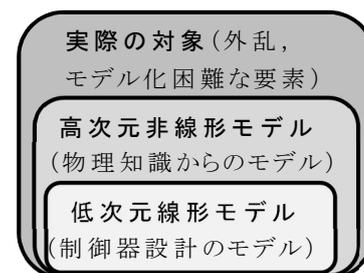


図 3. パラメータ不確実性の影響

#### 4. 今後の研究の見通し

---

##### 問題点: データ品質とリアルタイム性の確保

データ駆動型制御の性能は、収集されるデータの品質に大きく依存する。センサノイズや計測誤差が制御精度に影響を及ぼすため、高品質なデータ取得とノイズ低減技術の導入が必要である。また、大規模なデータ処理に伴う計算負荷の増大がリアルタイム制御の実現を妨げる可能性があり、アルゴリズムの高速化と効率化が求められる。

##### 展望 1: 強化学習を用いた制御アルゴリズムへの展開

現在のデータ駆動型研究成果を基盤として、制御器の知能化向上に注力する。具体的には、強化学習の理論と手法を適用し、磁気軸受モータの制御アルゴリズムを設計する計画である。強化学習を導入することで、環境との相互作用を通じて最適な制御ポリシーを自律的に学習し、非線形性や不確実性の高いシステムに対しても高い適応性とロバスト性を持つ制御を実現することを目指す。

##### 展望 2: 実機実験による提案手法の実用化

データ駆動型 LQG 制御および強化学習に基づく制御アルゴリズムの有効性を物理装置で検証し、実用化への道筋を確立する。これには以下のステップが含まれる。

- ・ハードウェア実装: 開発した制御アルゴリズムを実装可能な制御器および駆動回路の開発。
- ・実験的評価: 実機における制御性能、安定性、ロバスト性を詳細に評価し、理論的成果との整合性を確認する。

これらの取り組みにより、セルフベアリングモータの高精度かつ高効率な制御を実現し、産業応用への貢献を目指す。

#### 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

---

学術論文(査読付)

1. 藤本 恵五, 上野 哲, 趙 成岩, 「磁気浮上体の接触・非接触状態の切り替えによる構造物の振動制御- 定常波およびホワイトノイズ加振下での制振効果の検証」, 日本 AEM 学会誌, 「**AEM 学会論文賞**」, vol.30, no.2, pp.127-133, 2023.
2. 大坪 太陽, 趙 成岩, 上野 哲, 「 $\pm 2$  極磁界を用いた 5 軸能動支持型アキシヤ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の発生原理と測定」, 『日本 AEM 学会誌』, vol.32, no.1, pp.127-133, 2024.

国際会議(査読付)

3. Chengyan Zhao and Satoshi Ueno, “Axial Displacement Control of Bearingless Motor via State Feedback Linearization”, *International Conference on Advanced Mechatronic Systems*, Japan, 2024.
4. Chengyan Zhao and Satoshi Ueno, “Input-output Behavioral Data-driven LQG Control of Axial-gap 5-DOF Self-bearing Motor”, *International Conference on Advanced Mechatronic Systems*, Japan, 2024.