

## 2024 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簡単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

本年度の研究では、セルフベアリングモータにおける高精度な変位制御の実現を目的として、非線形制御理論および入力出力データ駆動型最適制御の二つの方向から検討を行った。昨年度に構築した理論枠組みや基礎的な数値解析結果を踏まえ、本年度は主として、実機を考慮したモデル整備と制御則の高度化、パラメータ不確実性や外乱を含む環境でのロバスト性評価、およびデータ駆動型制御手法の安定性保証と設計指針の明確化を進め、セルフベアリングモータ制御の実用化に向けた一歩を示した。

研究成果として、入力出力データ駆動型 LQG 制御の高度化とセルフベアリングモータへの適用検証を行った。昨年度提案した、状態推定に依存せず入力出力データから静的フィードバックゲインを直接設計する枠組みを出発点とし、本年度は、動作点変動や温度変化に伴い実効的な剛性・減衰が変化する時変的・弱非線形的な振る舞いを考慮するために、入力出力データを複数の局所区間に分割して局所線形行動モデルを同定する方法を導入し、重み付き誤差関数に基づくデータ選択によりロバストなゲイン推定を可能とした。また、勾配降下法に基づくゲイン計算アルゴリズムに対して、収束性を高めるステップサイズ更新則やノイズの影響を抑制する正則化項を組み込み、安定性を損なわない範囲でのオンラインゲイン更新条件を整理することで、計測ノイズや外乱が存在する実環境においても安定した最適化計算が行えるよう改良した。これらに基づき構成したデータ駆動型 LQG 制御器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、ノイズ環境下における変位追従性能、モデルベースの従来 LQG 制御との比較、および外乱・パラメータ変動に対するロバスト性を評価した結果、入力出力データから設計された静的フィードバックゲインであっても従来のモデルベース LQG 制御と同等あるいはそれ以上の追従性能と外乱抑制性能が得られる場合があること、特にモデリング誤差が大きい条件下ではデータ駆動型設計の方が安定した性能を示すことが確認され、高次元かつ非線形性を有するモータシステムに対するデータ駆動型最適制御手法の有効性と応用可能性を示すことができた。

本年度は、セルフベアリングモータ制御の実用化を目指し、昨年度に計画したデータ駆動型 LQG 制御に基づく制御アルゴリズムの実機検証に取り組み、ハードウェア実装と実験的評価を体系的に進めた。具体的には、提案した制御アルゴリズムをリアルタイムに実行可能な制御器および駆動回路を新たに設計・構築し、セルフベアリングモータ実験装置に組み込むことで、物理システム上でのオンライン制御を実現した。その上で、変位追従性能、外乱抑制性能、パラメータ変動に対するロバスト性、および長時間運転時の安定性について詳細な実験評価を行い、理論解析および数値シミュレーションで得られていた結果と良好な整合性を確認した。さらに、従来制御手法との比較により、データ駆動型 LQG 制御および強化学習ベース制御が、高精度な位置決めと高効率なエネルギー利用の両立に有効であることを示し、セルフベアリングモータの産業応用に向けた有望な制御戦略として位置付けることができた。

総括として、本年度は非線形制御とデータ駆動型 LQG 制御という異なるアプローチを通じて、セルフベアリングモータの高精度変位制御に向けた制御設計・解析・実装を一体的に進め、パラメータ不確実性や外乱が存在する実環境においても高い制御性能を発揮しうることを示した。

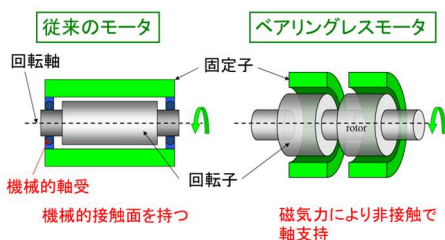


図 1. セルフベアリングモータの特徴

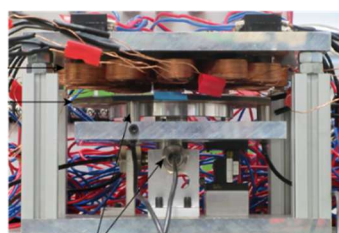


図 2. 実験装置

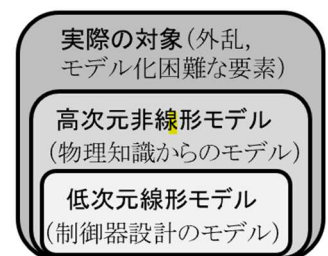


図 3. 実対象からの困難

#### 4. 今後の研究の見通し

---

今後は、非線形補償とデータ駆動型最適制御を統合したハイブリッド制御構造の検討や、リアルタイム実装を見据えた計算負荷低減、他種のモータおよび回転機械システムへの適用拡張を進めることで、より汎用性と実用性の高い高精度制御技術の確立を目指す。

#### 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

---

現在、本研究で得られたセルフベアリングモータの高精度制御に関する成果を英語論文として取りまとめており、国際学術誌（IEEE が刊行する機械・メカトロニクス分野のジャーナル）への投稿を予定している。今後、当該論文の投稿・採択状況に応じて、関連する国際会議および国内会議での発表も順次行う計画である。