

2024年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関	東京都市大学 理工学部 機械システム工学科
職 位 または 役 職	教授
氏 名	藪井 将太

1. 研究題目

宇宙開発用ロケットスレッドに向けた永久磁石を必要としない磁気浮上スリッパーの開発

2. 研究目的

本研究では**宇宙開発用ロケットスレッドに向けたレール上に永久磁石を必要としない磁気浮上スリッパーの開発**を行う。宇宙開発の市場規模は急拡大しており、2040年には**100兆円超の規模**になるといわれている。その中で、経済産業省によると我が国の宇宙開発は欧米と比較して大きく水をあけられている。この状況を開拓すべく**実利用につながる衛星情報システムを開発することが不可欠**であり、特に需要が高まっている**小型衛星の開発を推進することを我が国の戦略**として据えている。小型衛星の開発において国際競争力を高めるためには実証・実績が必要である。そして、実用化・商業化に求められる**実証機会・実績づくりを確保するための様々な実証ツールの充実**が図られている。その**実証ツールの一つとして地上試験用のロケットスレッド**が挙げられる。ロケットスレッドはレールの上をソリ状の乗り物（スリッパー）をロケット推進で走らせる装置である。地上にて高速度・高加速度の試験環境を作り出すことができ、実証機会、実績づくり、そして開発促進につながる。この**ロケットスレッドの開発にあたり、加速性能向上、効率化、起動時の破壊防止の実現**が望まれている。現状はレールと試験装置を載せるスリッパーが接触しており、摺動面に生じる摩擦で加速性能の悪化、摩擦熱による機材の破壊が課題となっている。

この課題を解決するため、**精密サーボ技術を用いたレール上に永久磁石を必要としない磁気浮上スリッパーを開発する**。コストや構造面からレール上に永久磁石を敷設することは難しいが、本装置により低コストで摩擦フリーの状況を実現できる。学術的には一切の復元力が存在せず、かつ**磁気力という不安定な力を6自由度全ての方向で安定化する制御アルゴリズムを開発**する点が新規性である。既存の磁気浮上システムは1自由度以上で復元力や、拘束条件が存在するが、本研究ではスリッパーの制御力のみで6自由度全てを安定化し、完全な磁気浮上を目指す。また、**スリッパー単体で磁気浮上可能であるため、モジュラーのイメージで既存の設備に取り付け**、例えば工場内の搬送装置への応用することも考えられる。摩擦フリー、オイルフリー、メンテナンスフリーの次世代型搬送システムの構築を視野に入れ、本装置の実現に挑む。

3. 研究内容及び成果

- ① ガイド側に永久磁石が存在しない鋼鉄レール（新幹線レール）を使用し、脚部に電磁石を設置した磁気浮上型スリッパーの製作を行った。試作機での検証ではあるものの、「進行方向以外の5自由度全てを安定化した上で安定浮上し、鋼鉄レール上を非接触で滑走可能なシステム」を世界に先駆けて達成した。成果をまとめた論文を IEEE Access（オープンアクセス、Q1 journal）へ投稿し、採択された。また、その制御系設計に関し、電気学会 産業応用部門の研究会にて成果発表を行った。
- ② 現行の試作機を大型化するにあたり、システムの特性が変わることを見据え、状況に応じて制御パラメータを更新する適応制御アルゴリズムの開発に着手した。装置の重量（磁気軸受に要求される磁気力）に応じて、制御パラメータが自動的に変更され、装置の重量変更に対応できるアルゴリズムになっていることを確認した。本技術に関し電子情報通信学会へ論文投稿を行い、採択に至った。
- ③ 本装置の制御系開発において不安定な磁気力を制御するアルゴリズム開発が必要となった。その過程で安定な制御力を敢えて不安定化させるような操作を行う（敢えて不安定極をもったフィルタを使用する）ことで性能向上を実現できる可能性を発見した。これは、本装置に限らず様々なメカトロニクス機器へ応用できる可能性がある。実際に、シミュレーション、および検証実験を行ったところ、従来と同じ制御構造にも関わらず、性能改善できることを発見した。成果をまとめた論文を 2025 年 5 月に IEEE Access（オープンアクセス、Q1 journal）へ投稿した。

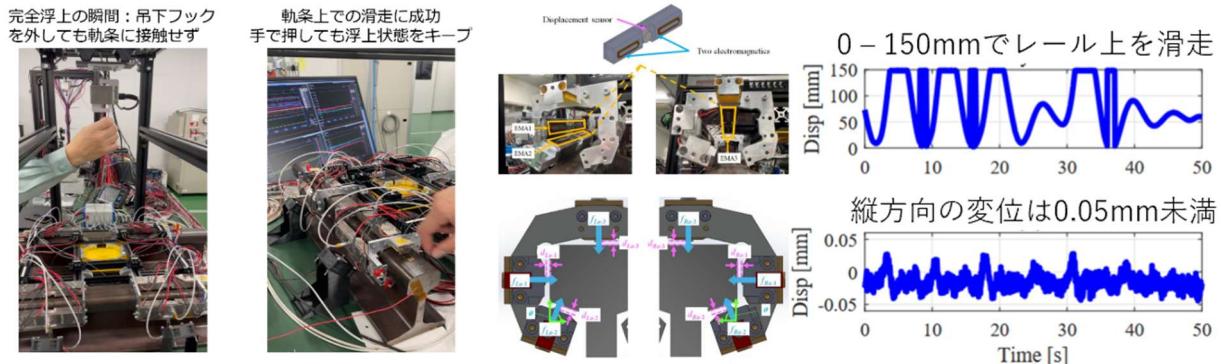
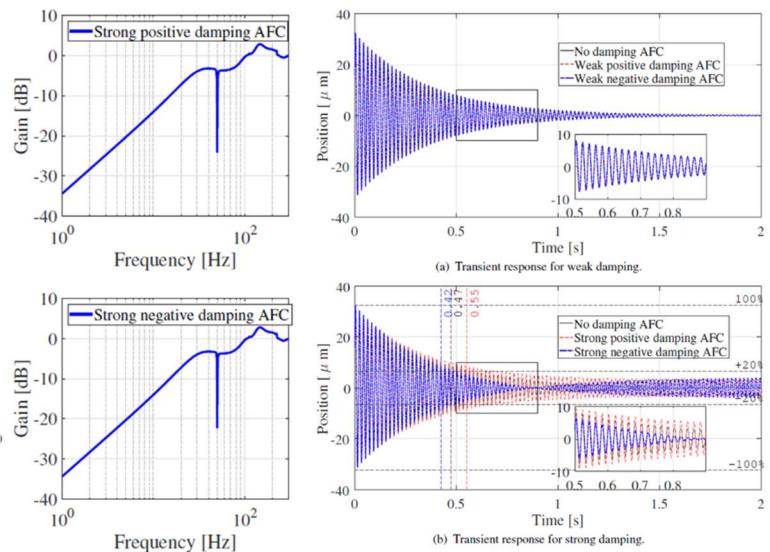
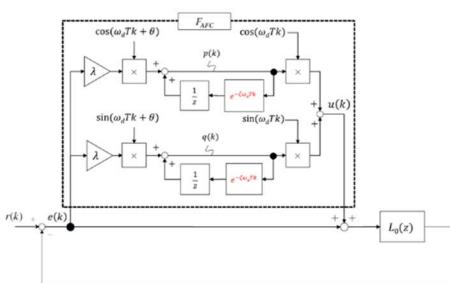


Fig.1 試作機で非接触で完全な磁気浮上を達成できることを確認。滑走中の縦方向の変位を 0.05mm 以内に抑えており、レールと脚部の間の距離をほぼ一定に保ちながら移動できることを確認した。

$$\begin{aligned} u(k) &= p(k) \cos(\omega_d T k) + q(k) \sin(\omega_d T k) \\ p(k) &= e^{-\zeta \omega_d T} p(k-1) + \lambda e(k) \cos(\omega_d T k + \theta) \\ q(k) &= e^{-\zeta \omega_d T} q(k-1) + \lambda e(k) \sin(\omega_d T k + \theta) \end{aligned}$$



AFC Type	80% Settling Time [s]	Peak Error [μm]	Steady-State Error [μm]	% error relative to stroke
Without AFC	-	33.0	33.0	22.0 %
Original AFC (No Damping)	~0.47	33.0	0.07	0.10 %
Strong positive damping AFC	~0.55	33.0	1.82	1.42 %
Strong negative damping AFC	~0.42	33.0	2.04	1.58 %

Fig.2 不安定極を持つフィルタの動特性を解析し、敢えて不安定極を用いて、従来手法と同じ構成で制御性能を改善できた。特に、従来手法より高速に振動を収束することが可能となった。

4. 今後の研究の見通し

2024年度中に、実機開発および制御系設計の基本的な見通しを得ることができ、さらに当初想定していなかった「不安定極を利用する制御手法」に関する新たな知見を獲得したことは大きな成果である。一方で、当初計画していた制御装置の大型化については、電流アンプなどハードウェア面での制約により進捗が遅れた。しかし、研究期間末期に必要なハードウェアを準備できたことから、次年度以降は以下の方針で研究を進める。

① 装置の大型化と安定浮上の実現

現行の試作機で得られた制御アルゴリズムを基盤に、装置の大型化に対応するための制御系改良を行う。大型化に伴い、磁気力の要求値が増加し、システムの動特性が変化するため、制御パラメータの最適化や適応制御の導入が不可欠である。特に、重量増加による浮上安定性の低下を防ぐため、リアルタイムでパラメータを更新する仕組みを強化する。

② 不安定極を利用した制御手法の深化

2024年度に発見した「敢えて不安定極を導入することで性能改善を図る」手法は、従来の設計思想を覆す新規性を持つ。この手法を理論的に体系化し、安定性解析や周波数特性の評価を進める。また、実験検証を通じて、ロケットスレッド用磁気浮上システムにおける有効性を確認し、他のメカトロニクス機器への応用可能性を探る。これにより、学術的なインパクトを高める。

③ ハードウェアの信頼性向上とシステム統合

大型化に伴う電流アンプの容量不足やセンサ精度の課題を解決するため、ハードウェアの性能向上を図る。特に、電磁石駆動用アンプの高出力化、センサの高分解能化、耐熱性・耐振動性の強化を進める。さらに、制御系とハードウェアを統合し、長時間運転や高加速度試験に耐えうる信頼性の高いシステムを構築する。

④ 学術的発信と国際競争力の強化

研究成果は隨時、IEEE 関連などの国際ジャーナルや国内外の学会に投稿し、本研究の新規性と有用性を広くアピールする。特に、不安定極を利用した制御手法や大型化対応アルゴリズムは、メカトロニクス分野における新しい設計指針として注目される可能性が高い。また、国際会議での発表を通じて、宇宙開発分野における日本の技術力向上に貢献する。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

学術論文(査読付)

(採択) S. Yabui and H. Inoue, Development of Noncontact Active Magnetic Levitation System Without Magnetic Guidance on Guideway, in IEEE Access, vol. 12, pp. 114242-114262, 2024.

(採択) 藪井将太・井上秀行, 磁気浮上型ロケットスレッド実現に向けた閉ループシステム同定と制御系設計, 信学技報, vol. 124, no. 407, SANE2024-58, pp. 19-23, 2025.

(掲載予定) S. Yabui, R. Oswald, T. Atsumi, Analysis of Transient Response of Enhanced Adaptive Feedforward Cancellation based on Concept of Unstable Pole in Periodic Disturbance Compensation, IEEE Access.

国際会議(査読なし)・国内会議

(投稿中) S. Yabui, R. Oswald, T. Atsumi, High-Speed Harmonic Estimation for Asynchronous RRO Compensation Using AFC in HDD Production, IFAC World Congress 2026.

(投稿中) S. Yabui, Adaptive Feed-Forward Cancellation Practical Deployment for Periodic Disturbance Compensation in Precision Mechatronics, SAMCON 2026.

(発表済) 小林 巧実, 藪井 将太, 周期外乱補償における時間応答に基づく AFC の位相パラメータの最適化, メカトロニクス制御委員会, MEC-25-012, 2025 年 9 月 26 日.

(発表済) 藪井 将太, ロケットスレッドへの応用に向けた完全磁気浮上スリッパーの開発, マグネティックス研究会, 2024, MAG-24-107-138/MD-24-124-155/LD-24-061-092 マグネティックス研究会/モータドライブ研究会/リニアドライブ研究会, pp. 143-148, 2024 年 12 月 6 日