

2023 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻
職位または役職	助教
氏名	前 匡鴻

1. 研究題目

精密位置決め装置における複数アクチュエータを協調したマルチレート制御法の開発

2. 研究目的

私たちの豊かな生活は、モータやアクチュエータなどにより駆動するメカトロニクス装置により支えられている。現代のメカトロニクス装置の多くは、より精密な動作を実現するために、複数のアクチュエータとセンサにより駆動する多入力多出力系となっている。それらの装置の性能を最大限発揮するために、特に同じ自由度に対して複数のアクチュエータが冗長に搭載されている制御対象において、それらを協調して動作させるマルチレート制御法を開発することを研究の目的とする。複数のアクチュエータにおいて各サンプリング周期を考慮した設計を行うことで、ナイキスト周波数における制御性能の限界を押し上げ、位置決め制御性能を向上させる。また、各アクチュエータの効率的な動作により、全体としてのエネルギー消費が低減され、地球環境の永続的保全にも寄与することが期待される。

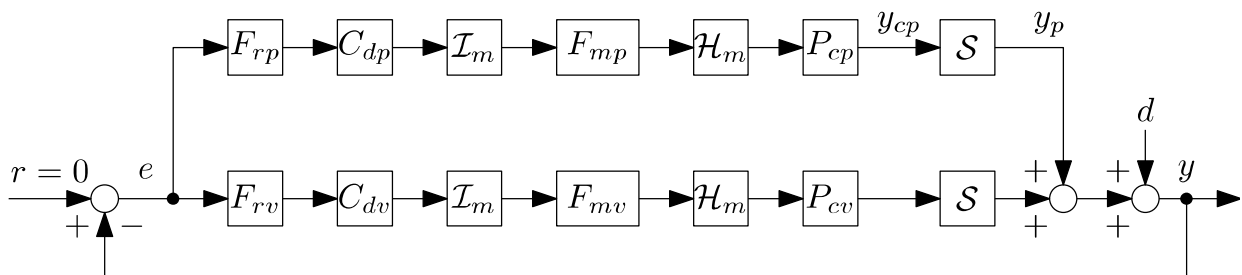


図 1 マルチレート制御を考慮した 2 段アクチュエータ HDD のフィルタ設計のブロック線図

3. 研究内容及び成果

本研究は、図 1 に示す 2 段アクチュエータ構造のハードディスクドライブ (Hard Disk Drive: HDD) を制御対象として、まず、マルチレートフィルタの設計に取り組んだ。ナイキスト周波数以上の共振を安定化するために設計されているマルチレートノッチフィルタについて、制御性能と安定性のトレードオフを考慮して最適化を行った。図 1 のブロック線図を等価変換することで得られる図 2 のマルチレート系において、周波数応答データを用いた反復凸最適化問題として解くことで、図 3 のマルチレートフィルタを設計し、2 段アクチュエータ HDD ベンチマーク問題を用いて制御性能の改善を確認した。この内容について、研究成果 [6][7] を受賞した。

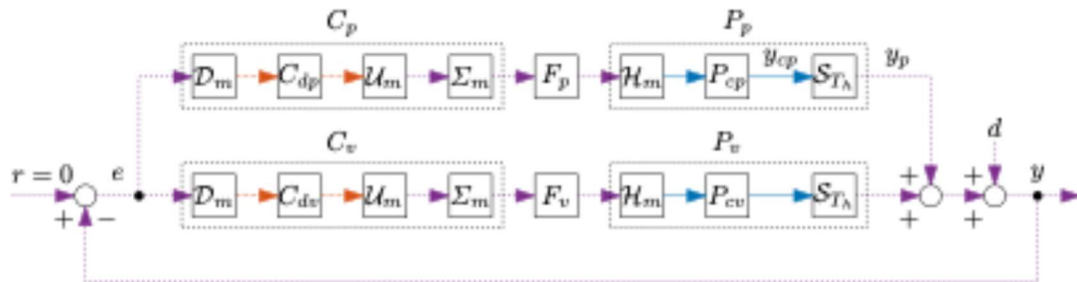


図 2 HDD の 2 段アクチュエータにおけるマルチレート FB 制御系への等価変形

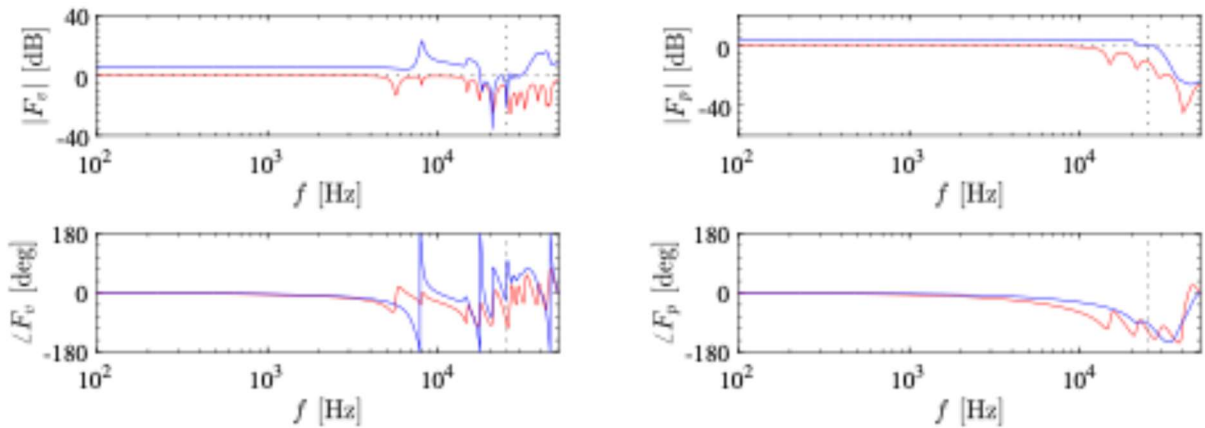


図 3 最適化前 (赤線) と最適化後 (青線) のマルチレートフィルタの設計結果

複数アクチュエータを協調した周波数応答データ駆動制御器設計の応用先として、HDD だけでなく、図 4 に示す液晶露光装置の 6 軸精密位置決めステージへの応用も進めている。研究成果 [1] で IEEE の英文国際論文誌に掲載された。同内容について研究成果 [3] で口頭発表を行った。

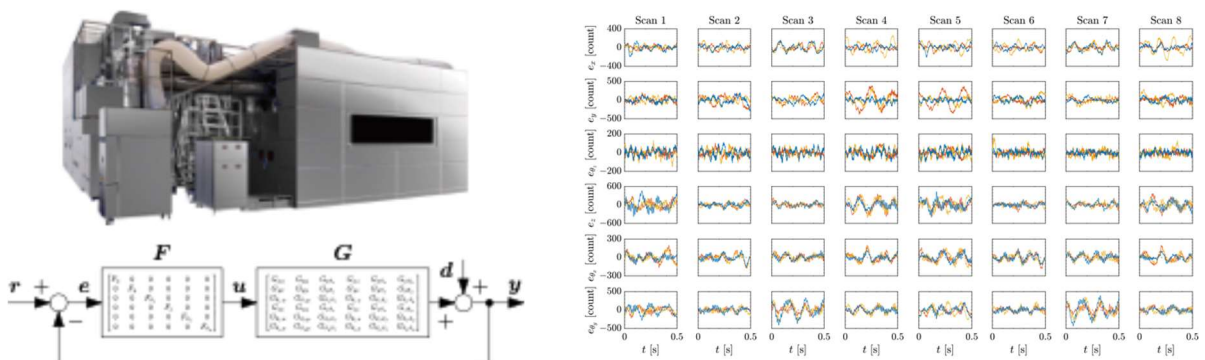


図 4 複数アクチュエータを協調した制御器自動設計の 6 軸精密位置決めステージへの応用 (左上) 液晶露光装置 (左下) 6 軸のブロック線図 (右) 実験におけるスキャン誤差の比較 [1]

4. 今後の研究の見通し

周波数応答データ駆動のフィードバック制御器設計の基本的な部分に関しては、研究成果[5]に技術報告としてまとめており、今後は研究成果[2][4]のような、より先進的なフィードバック制御器の設計に取り組む予定である。従来のシングルレート制御系の性能限界を打破するために、図 5 に示すような不安定極を用いたフィードバック制御器設計を取り入れるなど、これまでの常識にとらわれないフィードバック制御器設計手法を模索する。また、マルチレートフィルタによるナイキスト周波数以上の共振モードの安定化と、シングルレート制御系で行ってきた先進的なフィードバック制御器設計による制御性能の向上を統合し、アクチュエータの性能を最大限引き出す制御器設計を行う。

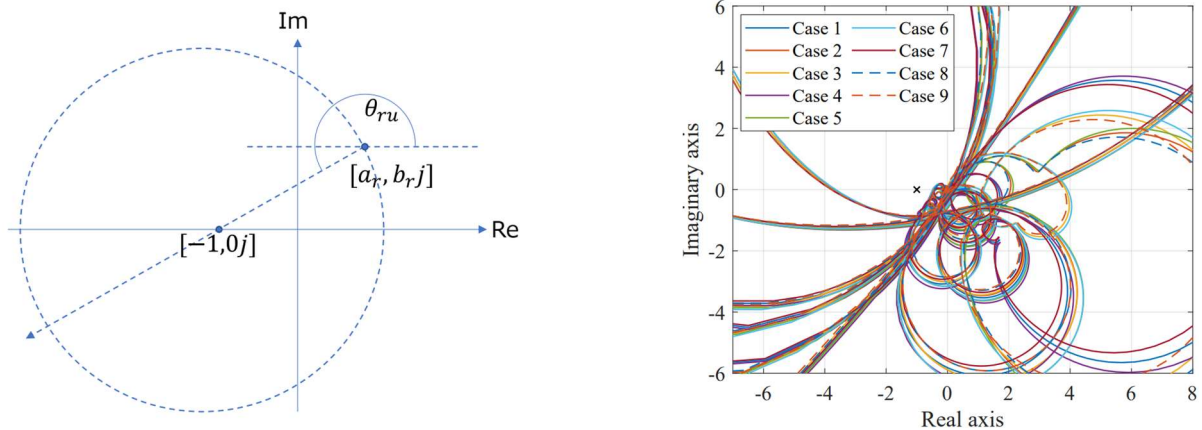


図 5 不安定極を用いた先進的なループ整形(左図)ナイキスト安定条件(右図)設計例 [2]

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] Masahiro Mae, Wataru Ohnishi, Hiroshi Fujimoto, Koichi Sakata: Multi-Axis Resonant Filter Design using Frequency Response Data applied to Industrial Scan Stage, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 29(4), 2867-2876, August 2024

【国際会議(査読付)】

[2] Takenori Atsumi, Shota Yabui, Atsushi Okuyama, Masahiro Mae: Loop-Shaping Method with Unstable Poles for Magnetic-Head Positioning Control in Hard Disk Drive, 2024 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), WeM01(2), 818-823, July 2024

【国際会議(口頭発表・査読無)】

[3] Masahiro Mae, Wataru Ohnishi, Hiroshi Fujimoto, Koichi Sakata: Multi-Axis Resonant Filter Design using Frequency Response Data applied to Industrial Scan Stage, 2024 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, WeM07(4), 1-1, July 2024

【国内会議(査読無)】

[4] 前匡鴻: 2段アクチュエータ HDD ベンチマーク問題における不安定極と安定極を統合した共振フィルタによるデータ駆動ループ整形, 電気学会メカトロニクス制御研究会「精密サーボシステムと制御技術」, MEC-24(6), 31-36, 2024年9月

【技術報告】

[5] 前匡鴻: 周波数応答データ駆動の共振フィルタ設計, 電気学会技術報告「精密サーボシステムにおける共通基盤技術」, (1552), 78-84, 2023年10月

【受賞】

[6] 2023年産業応用部門研究会優秀論文発表賞部門表彰: 一般社団法人電気学会産業応用部門, 2024年3月

[7] メカトロニクス制御技術委員会優秀論文発表賞: 一般社団法人電気学会産業応用部門メカトロニクス制御技術委員会, 2024年1月