

2024 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を支える、ハードディスクドライブ、半導体製造装置、工作機械、産業用ロボットに代表される産業装置の多くは、複数のアクチュエータにより駆動されるメカトロニクス装置により構成される。現代のメカトロニクス装置の多くは、高速・高精度化のために複数入出力を持つ多入力多出力系であり、各アクチュエータの性能を最大限発揮するために複数のサンプリング周期を持つマルチレート系として構成される。このような制御対象において、複数のアクチュエータの冗長性を協調させる制御手法を開発し、高速・高精度化を達成することを研究の目的とする。複数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効率が改善され、地球環境の永続的保全にも寄与することも期待される。

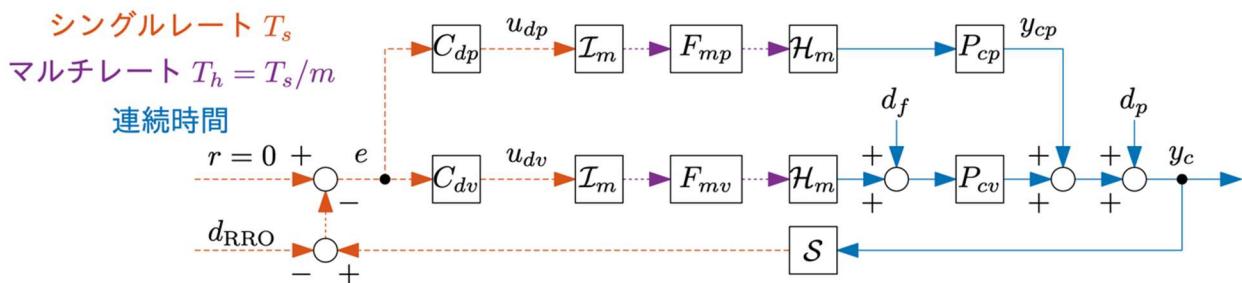


図 1 マルチレート制御を考慮した 2 段アクチュエータ HDD のフィルタ設計のブロック線図

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、制御器設計に必要な周波数応答データの取得方法の開発に取り組んだ。オランダのアントホーフェン工科大学の Tom Oomen 教授の研究グループと連携し、図 2 のように、マルチレート系の周波数応答データをシステム同定する手法を開発し、ナイキスト周波数以上においても詳細な周波数応答データの取得を実現した。この内容について、研究成果[1]で IFAC の英文論文誌に掲載され、同内容について研究成果[4]で口頭発表を行った。

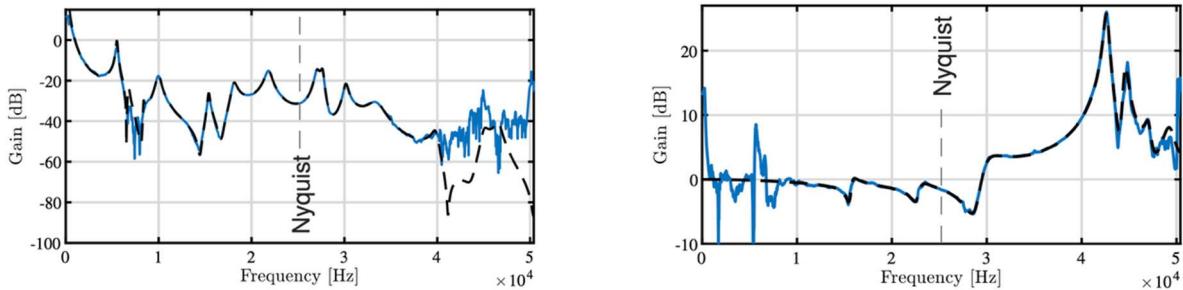


図 2 マルチレート系を考慮した閉ループシステム同定による周波数応答データの取得
(左図) VCM の同定結果 (右図) PZT の同定結果 (黒線: モデル・青線: データ) [1]

ノッチフィルタによる共振モードの安定化とピークフィルタによる外乱抑圧性能にはトレードオフの関係がある。図 3 のようにノッチフィルタとピークフィルタを統合した共振フィルタにおける周波数応答データ駆動自動設計手法を開発し、ノッチフィルタによるゲイン安定化とピークフィルタによる性能向上を両立した。この内容について、研究成果[3]で IEEE の国際会議論文として発表を行った。

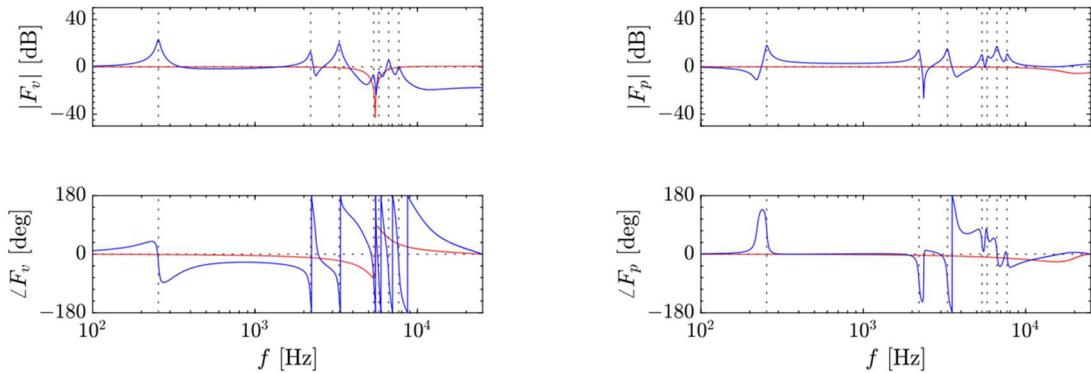


図 3 共振フィルタ構造を用いたノッチフィルタとピークフィルタの同時設計
(左図) VCM のフィルタ (右図) PZT のフィルタ (赤線: 初期値・青線: 最適化) [3]

データ駆動最適化によるロバストなループ整形手法を応用し、安定化の難しい不安定極を持つ共振フィルタを用いたフィードバック制御器設計による外乱抑圧性能の改善に取り組んだ。図 4 のように不安定極と安定極を統合した共振フィルタを周波数応答データから自動設計し、ナイキスト線図上で、従来の安定極の共振フィルタのみを用いた場合では実現不可能な橙円軌跡を描くループ整形を可能とした。この内容について、研究成果[2]で IFAC の国際会議論文として発表を行った。

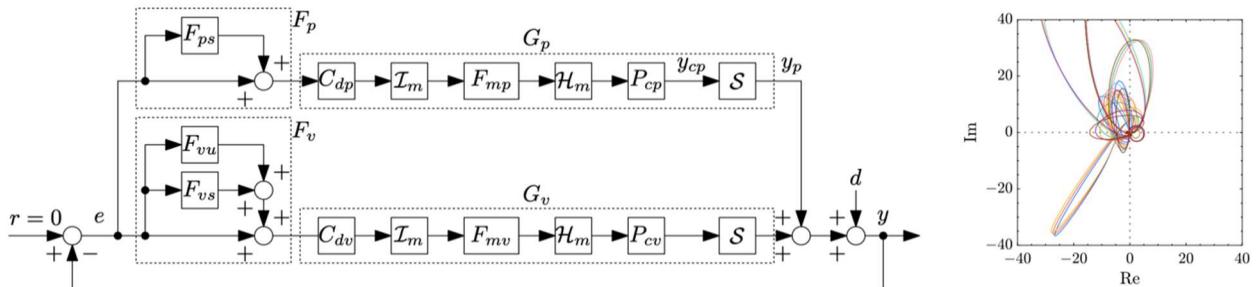


図 4 不安定極と安定極を統合した共振フィルタの周波数応答データ駆動最適設計 [2]
(左図) ブロック線図 (右図) ナイキスト線図における不安定極と安定極の統合による橙円軌跡

4. 今後の研究の見通し

精密位置決め装置の高性能化には、フィードバック制御による外乱抑圧性能に加え、フィードフォワード制御による軌道追従性能の向上が必要である。HDDにおいては、データ読み書きする際に同じトラックの上で静止するためのトラックフォロイングにおけるフィードバック制御に加えて、違うトラックに移動するためのトラックシーク制御も重要である。HDDのトラックシークのためのマルチレートフィードフォワード制御器設計の基礎検討として、研究成果[5]で口頭発表を行った。今後の研究としては、トラックシーク性能を向上するフィードフォワード制御器の開発を進めると共に、これまで開発してきた外乱抑圧のためのフィードバック制御器と組み合わせることで、HDDのシステム全体での制御性能を最大化することを目指す。

また、これまでHDDを対象に開発を進めてきた共振フィルタを用いた外乱抑圧制御と同様の手法において、液晶露光装置の6軸精密位置決めステージへ応用した研究についても研究成果[6]を受賞するなど、開発した制御手法においてHDD以外の幅広い精密位置決め装置への応用も期待される。

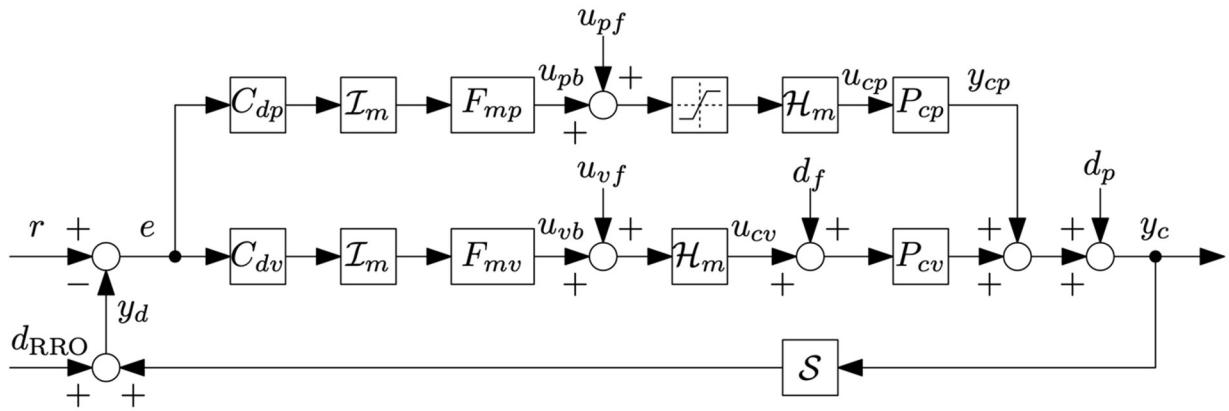


図5 トラックシーク制御における2段アクチュエータHDDのブロック線図

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] Max van Haren, Masahiro Mae, Lennart Blanken, Tom Oomen: Lifted frequency-domain identification of closed-loop multirate systems: Applied to dual-stage actuator hard disk drives, Mechatronics, 108(103311), 1-6, June 2025.

【国際会議(査読付)】

- [2] Masahiro Mae: Data-driven loop-shaping with resonant filters integrating unstable and stable poles in dual-stage actuator hard disk drives, The 10th IFAC Symposium on Mechatronic Systems, ThAT1(2), 1-6, July 2025.

- [3] Masahiro Mae: Data-Driven Multiple Resonant Filter Design Integrating Notch Filters and Peak Filters in Dual-Stage Actuator Hard Disk Drives, 2025 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM25(131), 1-6, February 2025.

【国際会議(口頭発表・査読無)】

- [4] Max van Haren, Masahiro Mae, Lennart Blanken, Tom Oomen: Lifted Frequency-Domain Identification of Closed-Loop Multirate Systems: Applied to Dual-Stage Actuator Hard Disk Drives, 10th IFAC Symposium on Mechatronic Systems, FrAT1(6), 1-2, July 2025.

【国内会議(査読無)】

- [5] 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トラックシークのロバスト性能のためのモダルマルチレートフィードフォワード制御, 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-25(10), 55-60, September 2025.

【受賞】

- [6] 前匡鴻: 丹羽保次郎記念論文賞, 学校法人東京電機大学学術振興基金, 2025年2月