

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：32678
研究種目：若手研究
研究期間：2020～2022
課題番号：20K14680
研究課題名（和文）データ駆動型社会を支える磁気ディスク装置のマルチアクチュエータ方式の制御系設計

研究課題名（英文）Control System Design of Multi-Actuator System in hard disk drives for Data-Driven Society

研究代表者
藪井 将太（Yabui, Shota）
東京都市大学・理工学部・准教授

研究者番号：90800756
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：近年の情報化社会の発展に伴い、世界中からインターネットを介したデータの保存先であるデータサーバの拡張が進められている。実際のデータの格納先はデータサーバ内の磁気ディスク装置であるため、その記録容量の増大がデータサーバの拡張に直結する。磁気ディスク装置の記録容量はディスク上のデータの読み書きを行う磁気ヘッドの位置決め精度に依存する。そこで、本研究では磁気ヘッド位置決め精度向上に貢献できる多段アクチュエータの制御系設計に関する研究を行った。その結果、従来の設計法と比較して位置決め精度を約30%改善することができた。これは、磁気ディスク装置の記録容量増加に資すると期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は学術的には、多入力単出力系の制御系における具体的な設計論の提案という点で有意義なものである。磁気ディスク装置を主眼とした内容であるが、多段アクチュエータを有するシステムの制御系設計にとっても応用できると考えられる。また、社会的には我が国の目指すべき社会像である「データ駆動型社会」の実現に資すると考えられる。本研究により、HDDの磁気ヘッド制御系の精度を向上し記録容量の増大できると期待される。これは、データ駆動型社会に必要な大量のリアルデータの格納場所の提供に繋がると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In the development of the information society in recent years, the expansion of data servers has been developed to record a large amount of digital data from all over the world. The digital data is recorded for the hard disk drives in the data server. The recording capacity of a magnetic disk drive depends on the positioning accuracy of the magnetic head that reads and writes data on the disk. This research studied the control system design of a multi-stage actuator that can contribute to the improvement of magnetic head positioning accuracy. As a result, the proposed design method is able to improve the positioning accuracy by about 30% compared to the conventional design method. This is expected to contribute to increasing the recording capacity of hard disk drives.

研究分野：制御工学

キーワード：磁気ディスク装置 マルチアクチュエータ 位置決め制御 外乱補償 振動制御

1. 研究開始当初の背景

● 「データ駆動型社会」における磁気ディスク装置への要求

大量のデジタルデータを格納できる磁気ディスク装置は、データ駆動型社会(Fig.1 参照)において欠かかせない産業製品である。そして、データ駆動型社会の発展のため、さらなる記録容量の増大が望まれている(Fig.2 参照)。記録容量増大のためにはディスク上のデータの記録密度を増大させる必要があり、ディスク上のデジタルデータの物理サイズを小さくしなければならない。そのため、デジタルデータの読み書きを実施する磁気ヘッドはナノスケールオーダーの超精密位置決めが求められる。超高精度位置決めの実現のため、現行の磁気ヘッドの位置決め機構には2段アクチュエータ方式が用いられている。本研究では、この方式をベースにした制御系、および2段以上のアクチュエータ方式を用いた場合の制御系の設計方法を研究し、さらなる位置決め精度向上に資することを目的とする。



Fig.1 Society 5.0 について（内閣府資料より）：これからの人類が目指すべき社会は現実のフィジカル空間と大量のデータとAIを駆使したサイバー空間を融合した社会である

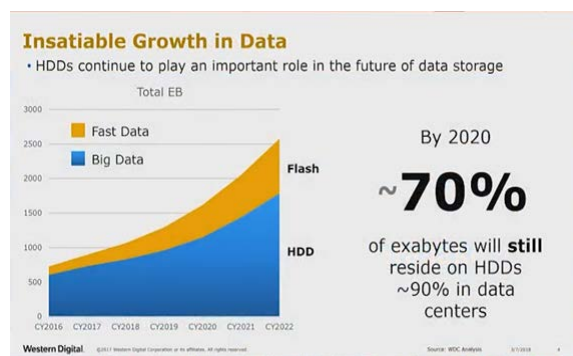


Fig.2 データサーバの成長について（Western digital 社公開資料より）：サイバー空間に upload されるデータ量は爆発的に増え、70%が磁気ディスク装置に格納される

● 磁気ディスク装置の磁気ヘッド位置決め制御系における課題

磁気ヘッドを動作させる2段アクチュエータ方式に用いられる制御系の課題として、制御系と機構系間に存在するトレードオフが挙げられる。現行の2段アクチュエータ方式の概要をFig.3に示す。粗動はボイスコイルモータ(VCM)が担当し、精密動作は先端に取り付けられたアクチュエータが担当する。位置決め精度はこれらアクチュエータの機構特性に依存しており、特に精度向上のためにはアクチュエータの主共振周波数を上げる必要がある。主共振周波数向上のためにはアクチュエータのサイズ：質量を小さくするのが効果的である(Fig.5 参照)。しかし、アクチュエータの小型化は動作量：ストロークの減少につながる。このストローク制約と制御性能のトレードオフが記録容量増大の壁であり、これを解消する制御技術の開発が望まれている。

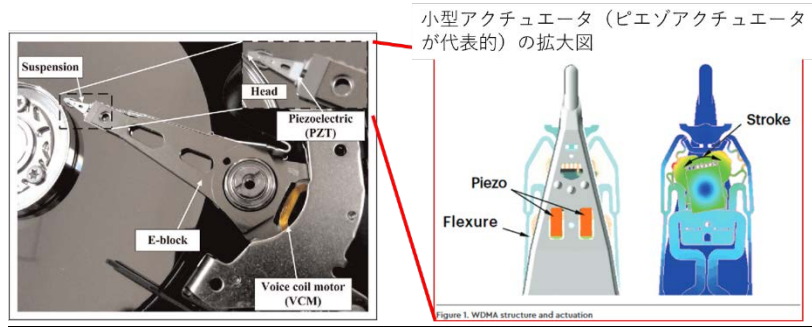


Fig.3 2 段アクチュエータ方式を用いたヘッド位置決め機構の概要：VCM が磁気ヘッドをディスクの中心から端まで動作させ、先端の小型アクチュエータが精密な動作に動作させる。

2. 研究の目的

● 現行の制御系におけるストロークと制御系設計のトレードオフ

現行の制御系における制御系設計とストローク制約のトレードオフを検証する。Western digital 社が公表しているように(Fig.4 参照)，現行の 2 段アクチュエータ方式は decoupling controller design と呼ばれる手法により設計されている。この制御系において，データサーバを模擬した実験装置を用いて制御性能とストローク量の関係を定量的に評価する。

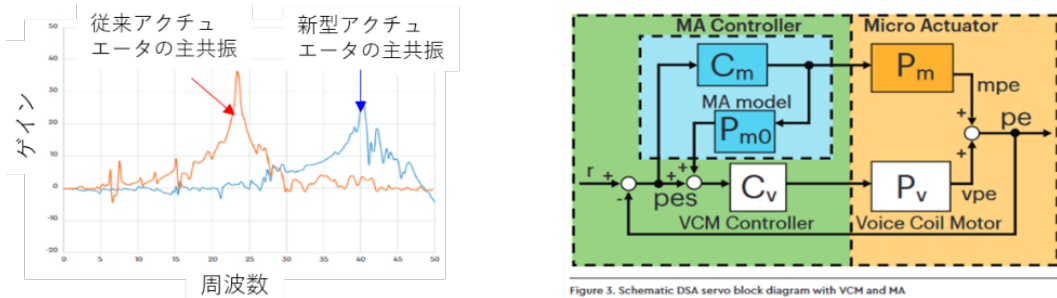


Fig 4 現行の先端アクチュエータの特性 (左図) と制御方式 (右図)：アクチュエータの主共振周波数が精度に依存すること，decoupling controller design の制御系設計法を明記している。

● アクチュエータのストローク量と制御系のトレードオフを解消する制御系設計法

本研究では，ストロークと制御性能のトレードオフを解消可能な新たな設計法を提案する。提案者は decoupling filter はアクチュエータ間の干渉を排除できる一方で，制御系設計における制約が生じることを明らかにしている。それぞれのアクチュエータに関する制御ループを安定化しなければならないという制約である。提案する制御系設計法はこの制約を排除して設計を実施できる。

● 次世代マルチアクチュエータ方式における磁気ヘッド位置決め制御系の設計

現行の磁気ディスク装置には 2 段アクチュエータ方式が用いられているが，将来的にはさらにアクチュエータを増やした位置決め制御機構の開発が予想される。位置決め制御機構に搭載可能なアクチュエータとしては，Fig.5 に示す VCM，ピエゾアクチュエータ，マイクロアクチュエータ，そして熱アクチュエータが挙げられ，近い将来 3 段アクチュエータ方式まで拡張可能性がある。そこで，3 段アクチュエータ方式に前述の制御系設計法を応用し，次世代の磁気ディスク装置における制御系設計指針を明らかにする。

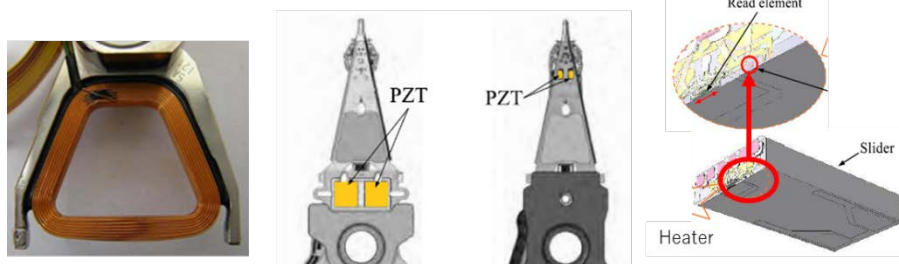


Fig.5 ヘッド位置決め機構に搭載可能なアクチュエータの種類について：左から VCM，Milli

actuator, Micro actuator (Milli より ピエゾサイズが小さい), Thermal actuator

3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、下記の手順で研究を実施した。

(1) ストローク量と制御性能のトレードオフの定量的評価

ストローク制約と制御性能のトレードオフを定量的に評価するため、実際のデータサーバに近い環境を立ち上げてデータを取得した。

(2) ストローク量と制御性能のトレードオフを解消する制御系設計

2段アクチュエータ方式の磁気ヘッド制御系において、トレードオフを解消した制御系設計法を確立した。VCMについて敢えて不安定な制御ループを許容することでパラメータ探索範囲を拡張し、トレードオフを解消する設計点を導出した。

(3) 次世代マルチアクチュエータ方式の磁気ディスク装置の制御系設計

現行のヘッド位置決め制御系は2段アクチュエータ方式を用いているが、将来的に実装可能なアクチュエータを用いて、3段アクチュエータ方式での制御系を提案した。

4. 研究成果

○ ストローク量と制御性能の定量的評価とトレードオフを解消する制御系設計

ストローク制約と制御性能のトレードオフを定量的に評価するため、実際のデータサーバに近い環境で制御性能とストローク量の評価を行えるベンチマークモデルを開発した。そして、2段アクチュエータ方式の磁気ヘッド制御系において、トレードオフを解消した制御系設計法を確立した。VCMについて敢えて不安定な制御ループを許容することでパラメータ探索範囲を拡張し、トレードオフを解消する設計点を導出した。

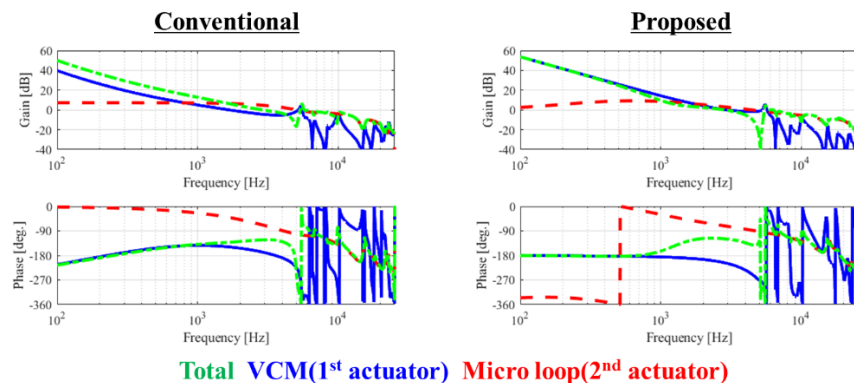


Fig.6 制御系の開ループ系の周波数応答 (左 従来法, 右 提案法): 従来法では VCM と Micro actuator の両方のゲインを向上していたが, 提案法では不安定な VCM の開ループ系を敢えて導入することで, (外乱が支配的な) 低周波数域における Micro actuator ループのゲインを低減することに成功した. また, Micro actuator のゲインを高周波数域で増大することで制御帯域の向上につながった.

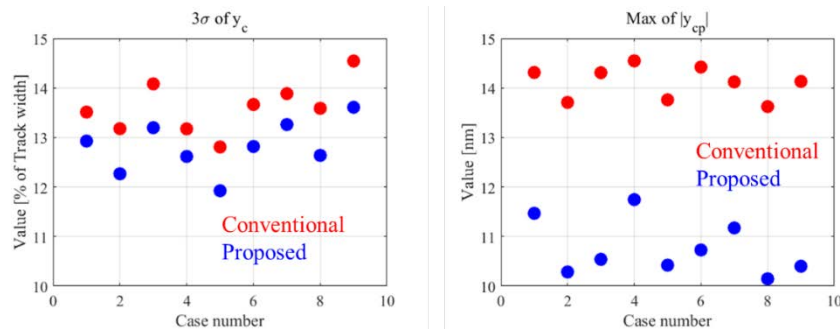


Fig.7 ヘッド位置の変位量の 3σ 値 (左) とストローク量の 3σ 値 (右): 高周波数域

における Micro actuator のゲインを向上することで、制御性能が向上し、ヘッド位置の変位量を低減できた。一方で、低周波数域における Micro actuator のゲインを低減することで、Micro actuator のストローク量を低減できた。以上の結果から、トレードオフを考慮した制御系を実現できたといえる。

○ 次世代マルチアクチュエータ方式の磁気ディスク装置の制御系設計

現行のヘッド位置決め制御系は 2 段アクチュエータ方式を用いているが、将来的に実装可能なアクチュエータを用いて、3 段アクチュエータ方式での制御系を提案した。3 段アクチュエータ方式においても、不安定な制御ループを許容することでパラメータ探索範囲を拡張し、従来法と比較してヘッド位置決め性能を約 30%向上することに成功した。

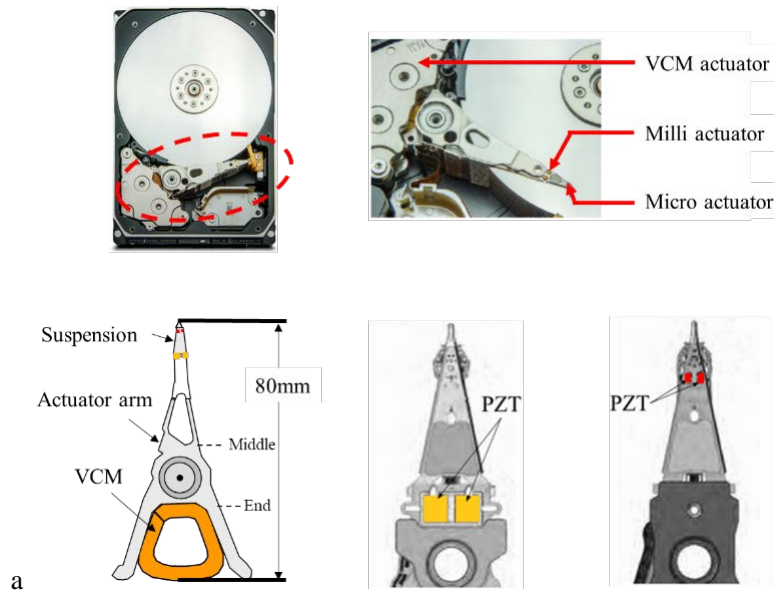


Fig. 8 HDD の 3 段アクチュエータ方式のヘッド位置決め機構について：VCM に加え、Milli actuator, Micro actuator 呼ばれる 2 種類の Piezo actuator を導入することで 3 段のアクチュエータによりヘッドを位置決めできる機構が提案されている。

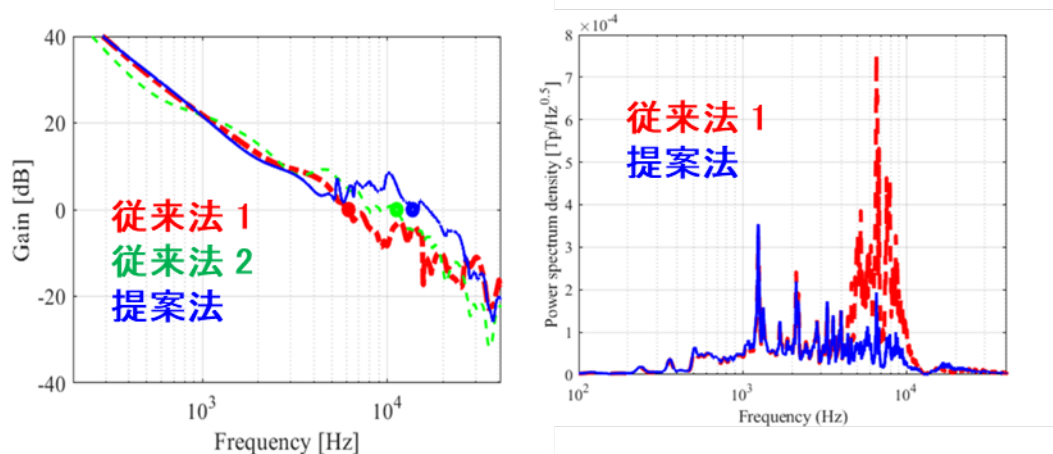


Fig. 9 開ループ系のゲイン線図 (左) とヘッド位置の変位の振幅スペクトル (右)：従来法と比較して開ループ系の制御帯域を拡大し、より高周波数まで制御可能な設計法を提案した。そして、データサーバ環境においてヘッド位置の変位について振幅スペクトルを計算したところ、従来法と比較して約 30%改善できることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yabui Shota, Atsumi Takenori, Inoue Tsuyoshi	4. 巻 58
2. 論文標題 Servo Controller Design for Triple-Stage Actuator in HDD to Compensate for High-Frequency Fan Vibration	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2021.3129540	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yabui Shota, Atsumi Takenori	4. 巻 -
2. 論文標題 Design Strategy of Head Positioning Control System of HDD based on Amplitude Spectrum	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)	6. 最初と最後の頁 88~93
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/AMC51637.2022.9729285	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 藪井 将太, 熱海 武憲	4. 巻 -
2. 論文標題 磁気ディスクにおける2段アクチュエータ方式の制御系設計方法の比較検証	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 【D】産業応用部門 メカトロニクス制御研究会	6. 最初と最後の頁 37~42
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yabui Shota, Atsumi Takenori	4. 巻 -
2. 論文標題 High-bandwidth controller design for dual-stage actuator system in hard disk drives	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Vibration and Control	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/10775463211062337	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yabui Shota, Atsumi Takenori
2. 発表標題 Design Strategy of Head Positioning Control System of HDD based on Amplitude Spectrum
3. 学会等名 2022 IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control (AMC) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藪井 将太, 熱海 武憲
2. 発表標題 磁気ディスクにおける2段アクチュエータ方式の制御系設計方法の比較検証
3. 学会等名 メカトロニクス制御研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yabui Shota, Atsumi Takenori
2. 発表標題 Controller Design Method for Stroke Reduction of Micro-actuator in HDD
3. 学会等名 IFAC World Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

データセンター用HDDを30%大容量化する技術を開発 https://www.tcu.ac.jp/news/all/20220221-40437/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------