

令和元年6月16日現在

機関番号：12201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14282

研究課題名(和文) エネルギー回生機構を持つハードディスクドライブの制御系開発

研究課題名(英文) Control system development of hard disk drives with an energy storage mechanism

研究代表者

平田 光男 (Mitsuo, Hirata)

宇都宮大学・工学部・教授

研究者番号：50282447

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：世界で消費されるハードディスクドライブ(HDD)の消費電力はクラウドの普及と相まって、著しく増大すると言われている。これを少しでも削減できれば、社会に与えるインパクトは大きなものとなる。そこで、本研究ではHDDの制御系にエネルギー回生機構を導入し、そのための軌道設計を行った。HDDの位置決め軌道は、エネルギーの削減だけでなく、機械振動の影響も考慮して設計しなければならない。そこで、それらを考慮した軌道を終端状態制御により求め、HDDの位置決め系を模擬した2慣性系を用いて、提案法の有効性を検証した。その結果、制振性能を高めた軌道ほど、エネルギー回生の効果が高くなることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

HDDの消費電力は近い将来原発数百基分に膨れ上がるとの試算もある。そのため、消費電力を数%低減できただけでも、相当大きな削減となる。さらに、本研究で得られた成果は、工場などで24時間操業される工作機械など、各種産業機器の消費電力削減にも有効である。このように、本研究の成果は低炭素社会の実現に大きく貢献できる。

研究成果の概要(英文)：The number of hard disk drives (HDDs) in the world is rapidly increasing combined with the spread use of cloud systems, and the energy consumption by HDDs cannot be ignored. Therefore, the reduction of the energy consumption of HDDs will have a big impact on society. Thus, this research focused on the control problem of HDDs with an energy storage mechanism. The positioning system of HDD has mechanical vibration modes at high frequency, and the positioning trajectory must be designed to reduce not only energy consumption but also residual vibration. This research used a final-state control method to design the trajectory considering the tradeoff between the energy consumption and damping performance. The effectiveness of the proposed method was evaluated by conducting experiments using a two-mass spring system, which is a simple model of HDDs, and we showed that the effect of the energy reduction was increased when we used the vibration minimized trajectory.

研究分野：制御工学

キーワード：ハードディスク装置 エネルギー回生 制振軌道設計 終端状態制御 PWM型入力系

### 1. 研究開始当初の背景

情報記憶装置として使われるハードディスクドライブ（HDD）は、単位記憶容量あたりの単価が SSD（Solid State Disk）などの半導体記憶デバイスに比べて一桁以上安いことから、今でも、多く使われている。家庭やオフィスにおいて、テレビ番組を録画するハードディスクレコーダや、NAS（Network Attached Storage）と呼ばれるネットワーク上のファイルサーバのほとんどはハードディスクドライブが使われている。また、ここ最近一般にも浸透したクラウドサービスにおいても、大量の HDD が使用されている。

このように、HDD の使用台数が増え続けていくと、そこで消費される電力も無視できないものとなる。今後、クラウドのさらなる普及と相まって HDD の消費電力が原発 420 基分にふくれあがるとの試算もある（現在、全世界の原発は 430 基ほど）。これを少しでも削減できれば、社会に与えるインパクトは計り知れないほど大きなものとなる。

### 2. 研究の目的

本研究では、記録ヘッドの高速な位置決め制御時に熱となって失われるエネルギーを回生し、次の位置決め制御に使うことで、消費電力を極限まで低減することを目的とする。そのためには、エネルギー回生機構を有する位置決め制御系において、そのための軌道設計が重要となる。HDD は高周波域に機械共振モードを多く持つため、単にエネルギーの削減を考えただけでは、HDD で要求される位置決め精度が満たされない。制振性能と省エネ性能のバランスが重要となる。そこで、このような要求を満たす制振軌道設計について検討する。

また、エネルギー回生を行う上で、アクチュエータの PWM（Pulse Width Modulation）駆動が必要となる。そこで、PWM 型入力によるハードディスクの制御について、理論面からの検討も行う。

### 3. 研究の方法

HDD の位置決め制御系は、共振モードを有する位置決め制御系であり、その最もシンプルなものは 2 慣性共振系としてモデル化できる。そこで、この 2 慣性共振系を制御対象として、軌道設計を行っていく。軌道設計法については、HDD やガルバノスキャナの制振軌道設計法として実績のある、終端状態制御を用いる。そして、以下の点を明らかにする。

1. 終端状態制御により、消費エネルギーの削減と制振性能の両方を考慮した軌道設計を行う。
2. 制振性能と消費エネルギーとの間のトレードオフ関係をシミュレーション及び実機実験で明らかにする。

また、PWM 型入力によるハードディスクの制御に関する理論面からのアプローチについては、完全追従制御系の実用的な設計方法の検討と、PWM 型入力の周波数成分を厳密に評価した周波数整形型終端状態制御の有用性検討を行う。

### 4. 研究成果

(1) エネルギー回生機構を有する位置決め制御系の終端状態制御

図 1 に示す回生エネルギー蓄積用コンデンサーを持つフルブリッジ回路から成るエネルギー回生機構を有する位置決め制御系において、位置決め精度の低下につながる機械共振を励起しない軌道設計を行う。

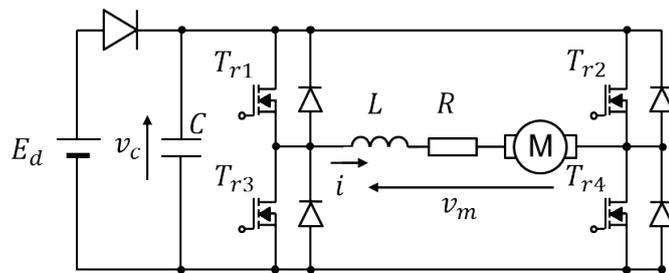


図 1：エネルギー回生回路

従来法ではエネルギー回生機構を用いる目的が消費エネルギーの削減であることから、位置決めにおける消費エネルギーを最小化する軌道を求めていた。しかし、そのような軌道は、制御入力急峻に変化するため、機械共振を励起しやすいことがわかった。そこで、機械共振を励起しにくい滑らかな制御入力が求められる終端状態制御を用いて、消費エネルギーと制振性能のトレードオフを考慮した軌道設計を行う。

終端状態制御では、制御入力の滑らかさを評価するために図 2 に示すような制御対象の入力端に和分器を接続した拡大系を考え、評価関数を

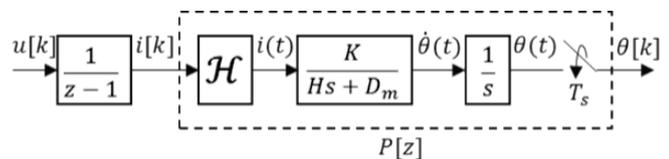


図 2：拡大系

$$J = q_1 \sum_{k=0}^{N-1} u^2[k] + q_2 R \sum_{k=0}^{N-1} i^2[k] \quad (1)$$

と設定する。ただし、 $q_1$ 、 $q_2$  はそれぞれ入力の滑らかさと消費エネルギーに関する重みであり、

$R$  はモータの電機子抵抗である。(1)式右辺第1項が制御入力のスラカさを評価し、第2項が電機子抵抗における消費エネルギーを評価する。(1)式の重み  $q_1, q_2$  の選択により、制御入力のスラカさと消費エネルギーのトレードオフを考慮した軌道設計が可能となる。

## (2) 実機実験による有効性の検証

エネルギー回生機構を持つ位置決め制御系における終端状態制御の有効性を検証するために、図3に示すような2慣性系を制御対象とし、実機実験を行った。実際に構築した制御対象を図4に示す。なお、制御対象のゲイン線図は図5に示すように共振周波数 18.3 Hz の機械共振を持っている。

安定性の確保と外乱抑圧を目的として、図6に示すような角度フィードバック制御と電流フィードバック制御を加えた2自由度制御系を構築した。なお、角度フィードバック制御器  $C_1$  には  $H_\infty$  制御器、電流フィードバック制御器  $C_2$  には PI 制御器を用いた。

従来法に相当する消費エネルギーのみを考慮した場合 ( $q_1=0, q_2=1$ ) と、入力のスラカさも考慮した場合 ( $q_1=100, q_2=0.011$ ) において終端状態制御によって求めた制御入力を図7に示す。なお、サンプリング周期は 1ms, 280 ステップで 0 rad から 18 rad への位置決め(角度制御)である。

消費エネルギーのみを考慮した場合は位置決め開始直後と終了直前で制御入力に急峻な変化しており、機械共振を励起しやすいと考えられる。一方、入力のスラカさも考慮した場合は、制御入力の变化は滑らかになっていることが確認できる。

求めた制御入力を、エネルギー回生機構を持つ位置決め制御系に適用して位置決め制御を行った。ただし、求めた制御入力の符号を反転したものを3往復させた。図8に、モータ角度と参照軌道との追従誤差を示し、図9に追従誤差をフーリエ変換したものを示す。図8の下図からわかるように、消費エネルギーのみを考慮した場合は、角度誤差に振動が見られる。一方、入力のスラカさも考慮した場合は、その振動が低減していることが確認できる。図9からも共振周波数 (18.3Hz) 付近における周波数成分が低減していることが確認できる。

図10に回生エネルギー蓄積用コンデンサの蓄積エネルギーの時間推移を示すが、位置決め

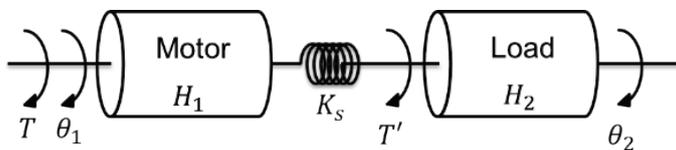


図3：2慣性系



図4：実際に構築した制御対象

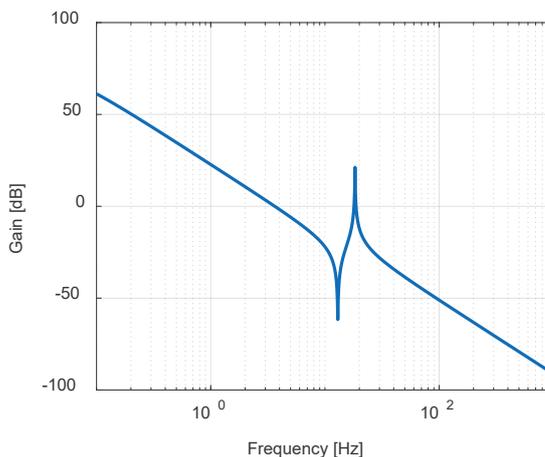


図5：制御対象のゲイン線図

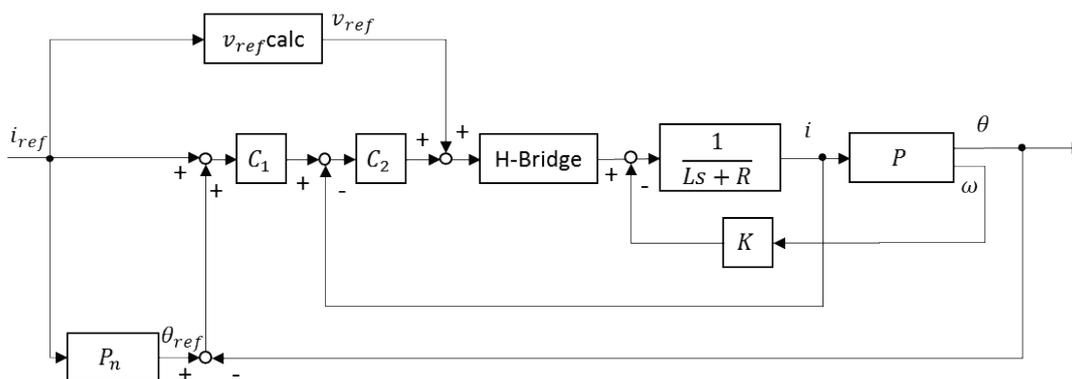


図6：2自由度制御系

応答に同期して蓄積エネルギーが上下していることから、エネルギーの回生と再利用が適切に行われていることが確認できる。実際、消費エネルギーのみを考慮した設計の場合について、電源からの供給エネルギーを調べると、図11に示すように、回生有りの方が供給エネルギーは低減している。その値を調べると、表1に示すように13.1Jから11.1Jへ、約13%の低減効果が確認できる。一方、入力の滑らかさを考慮した場合は、図12に示すように、回生有りとなしとの差が大きく、その値を調べると13.6Jから17.3Jへ、約21%の低減効果が見られた。つまり、制振効果を高めた軌道ほど、エネルギー回生の効果が高いことが明らかとなった。

以上の成果は、現在、論文にまとめており、投稿する準備を進めている。

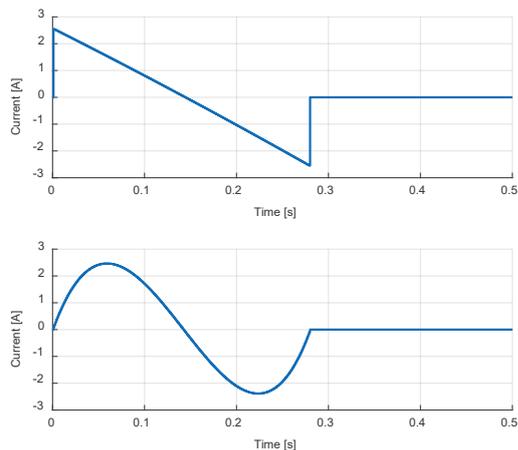


図7：設計した制御入力  
(上図：消費エネルギーのみを考慮，下図：入力の滑らかさも考慮)

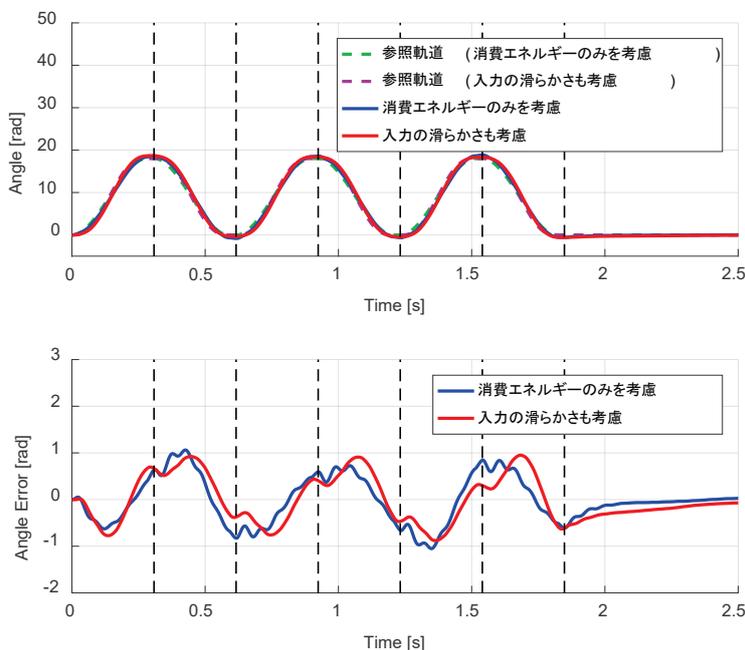


図8：モータ角度と参照軌道との誤差

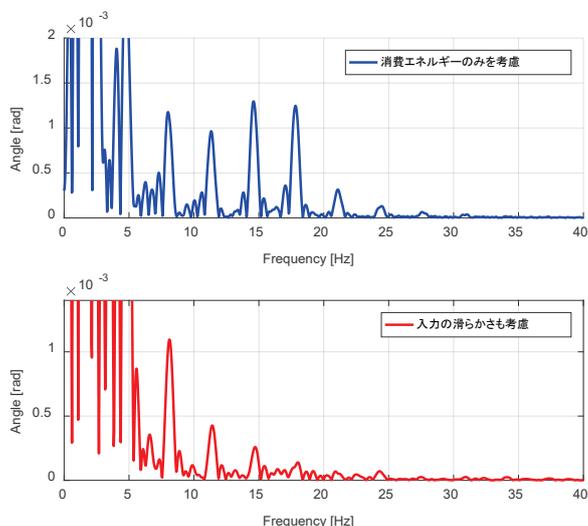


図9：角度誤差のフーリエ変換

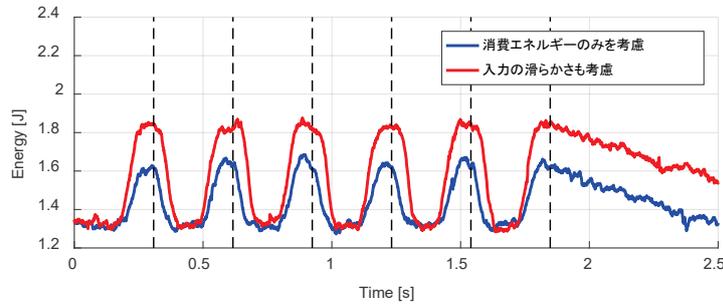


図 10 : コンデンサ蓄積エネルギー

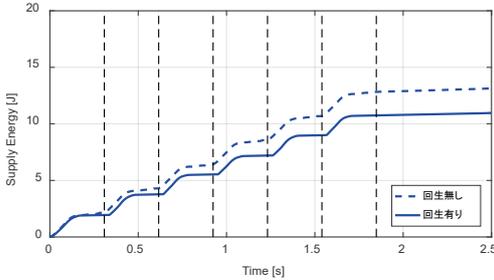


図 11 : 消費エネルギーのみを考慮した場合の供給エネルギー

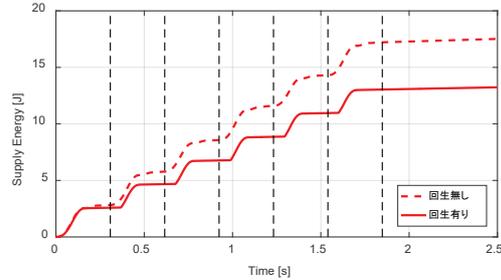


図 12 : 入力の滑らかさも考慮した場合の供給エネルギー

表 1 : 電源からの供給エネルギー

設計指針	回生無	回生有
消費エネルギーのみ考慮	13.1 J	11.4 J
入力の滑らかさも考慮	17.3 J	13.6 J

### (3) PWM 型入力系における軌道設計の理論検討

本研究で用いたエネルギー回生機構は、PWM 入力を前提としている。これにより、回生モードにおいて、アクチュエータからの回生エネルギーを、昇圧チョッパにより効率よくコンデンサに回収できる。PWM 型入力系では非線形特性を有するため、線形近似に基づく通常の制御系設計では、近似誤差の影響で高精度な位置決め制御は難しいとされてきた。しかしながら、我々の過去の研究で、PWM パルスを工夫 (duty 比だけでなくパルスの位置も可変とする) することで、線形時不変システムに厳密線形化できることを明らかにした。このことは、近似誤差のない厳密な制御系設計が行えることを意味する。そこで、PWM 型入力をを用いて回生機構を有する HDD を高速・高精度に制御するための理論面からの検討を行い、以下の結果を得た。

1. PWM 型入力による完全追従制御を HDD へ適用するための基礎検討として、X ステージに適用し、その有効性を評価した。
2. PWM 型入力に基づき安定な逆系を構成する完全追従制御法において、実用的な制御入力を得るためのフィルタ設計について検討し、零位相差フィルタが有効であることを示した。
3. PWM 型入力の周波数成分を厳密に考慮した周波数整形型終端状態制御を HDD の簡易モデルへ適用し、その有効性を評価したところ、ナイキスト周波数より高い帯域に存在する機械共振に対して特に有効であることがわかった。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

- [1] 鈴木 雅康, 平田 光男: 「多自由度パルス幅変調方式による制御」, システム/制御/情報, 査読有, Vol. 63, No. 3, pp. 118-123, 2019

〔学会発表〕 (計 8 件)

- [1] 瀧澤 侑也, 鈴木 雅康, 平田 光男: 「PWM 型入力系の周波数整形型終端状態制御に関する一考察」, 日本機械学会 情報・知能・精密機器部門 講演会, 2D09, 2019
- [2] 鈴木 雅康, 爲國 康太, 平田 光男: 「多自由度 PWM 型入力をを用いた厳密線形化の零配置に関する一考察」, 第 61 回自動制御連合講演会, pp. 1450-1454, 2018

- [3] 爲國 康太, 平田 光男, 鈴木 雅康: 「PWM 型入力による不安定零点の安定化に関する一考察」, 電気学会 メカトロニクス制御研究会, MEC-18-12, pp. 59-63, 2018
- [4] Masayasu Suzuki, Mitsuo Hirata: "Partial state perfect tracking control of PWM-type input systems", International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, 査読有, pp. 124-127, 2018
- [5] Mitsuo Hirata, Masahiro Fukuda, Masayasu Suzuki: "Final-state control of a motion control system with energy storage mechanism", The 14th International Conference on Motion and Vibration Control, 査読有, pp. 456-457, 2018
- [6] 薄井 竣介, 鈴木 雅康, 平田 光男: 「PWM 型入力による X ステージの完全追従制御」, 電気学会 メカトロニクス制御研究会, MEC-17-10, pp. 13-18, 2017
- [7] 鈴木 雅康, 平田 光男: 「高次 PWM 型入力系の厳密線形化: 入力値集合の特性」, 第 59 回自動制御連合講演会, pp. 1096-1099, 2016
- [8] 鈴木 雅康, 平田 光男: 「低サンプリングレート PWM 型入力系の厳密線形化: 正パルスのみを用いた制御系設計」, 電気学会 メカトロニクス制御研究会, MEC-16-021, pp. 19-25, 2016

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

該当無し

[その他]

研究室ホームページ

<http://hinf.ee.utsunomiya-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名: 鈴木 雅康

ローマ字氏名: (SUZUKI, Masayasu)

所属研究機関名: 宇都宮大学

部局名: 工学部

職名: 助教

研究者番号 (8 桁): 10456692

### (2)研究協力者

研究協力者氏名: 薄井 竣介

ローマ字氏名: (USUI, Syunsuke)

研究協力者氏名: 福田 将大

ローマ字氏名: (FUKUDA, Masahiro)

研究協力者氏名: 爲國 康太

ローマ字氏名: (TAMEKUNI, Kohta)

研究協力者氏名: 瀧澤 侑也

ローマ字氏名: (TAKIZAWA, Yuya)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。