

2段アクチュエータ HDD ベンチマーク問題における 外乱抑圧のための周波数応答データ駆動型共振フィルタ設計

前 匡鴻*, 大西 亘, 藤本 博志 (東京大学)

Frequency Response Data-based Resonant Filter Design for Disturbance Rejection
in Dual-Stage-Actuator HDD Benchmark Problem

Masahiro Mae*, Wataru Ohnishi, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)

Disturbance rejection of a Hard Disk Drive (HDD) enables a large amount of data storage in a recent information society. The aim of this paper is to design a feedback controller which rejects disturbances in several frequencies for HDD. The disturbance rejection is achieved using resonant filters which have a large peak in disturbance frequencies. The developed approach enables the convex optimization of resonant filters using frequency response data of a controlled system. The disturbance rejection performance of the optimized resonant filters is validated in a dual-stage-actuator HDD benchmark problem.

キーワード：外乱抑圧, 位置制御, データ駆動型設計, 凸最適化, 周波数応答データ, ハードディスクドライブ (disturbance rejection, positioning control, data-based design, convex optimization, frequency response, hard disk drive)

1. 序論

ビッグデータやクラウドコンピューティングの活用が進む現代において、それらのデータを蓄えるデータセンタで用いられているハードディスクドライブ (Hard Disk Drive: HDD) の重要性はこれまで以上に高まっている。HDD の内部で用いられる磁気ヘッドの制御性能の改善は、HDD に記憶されるデータ容量の増大に直結しており、そのための制御器設計手法は大量のデータが蓄積される現代の情報化社会を支える上で欠かすことのできない技術であると言える。

HDD の磁気ヘッドの制御系は、ディスクの回転に起因する振動、ストレージボックス内で発生するファン起因の振動、HDD の位置測定機構に起因するノイズなど、多くの外乱にさらされている。HDD の磁気ヘッドにおいてより高い位置決め制御性能を発揮するためには、複数の周波数の外乱を抑圧するためのフィードバック制御器を設計する必要がある。現代の日本の労働人口減少の背景からも、制御器が持つ複数の周波数の外乱に対応した多数のパラメータを自動調整する手法が望まれている。HDD のような大量生産される装置において制御対象のモデル変動は無視できない要素であり、また多数のモデル変動に対して伝達関数モデルを作成するのは非常に手間がかかることから、周波数応答データを直接用いた制御器設計手法が必要である。

HDD の外乱抑圧のためのフィードバック制御器として、共振フィルタ設計手法 [1] が提案されているが、2 段アクチュエータに対する同時設計手法は提案されていない。モデル変動のある制御対象に対して複数の周波数応答データを用いたロバスト制御器設計手法 [2] も提案されているが、HDD の制御器設計にはこれまで適用されていない。

本稿では、2 段アクチュエータ HDD ベンチマーク問題 [3]

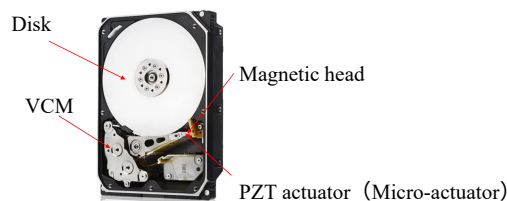


図 1 2 段アクチュエータのハードディスクドライブ [3]

Fig. 1. Hard disk drive with dual-stage-actuator [3].

において、外乱の影響を抑圧する共振フィルタのロバスト制御器設計問題を、モデル変動を含む制御対象に対するロバスト安定性を満たすような周波数応答データを直接用いた凸最適化問題として定式化し、最適化により設計された制御器の性能を 2 段アクチュエータ HDD ベンチマーク問題において検証する。本稿の貢献は次の通りである。

(1) 2 入力 1 出力系の制御対象における複数の共振フィルタの各アクチュエータに対する同時最適化

(2) HDD に対するモデル変動を含む周波数応答データを直接用いたロバスト制御器の凸最適化設計

本稿は、次の流れで構成される。第 2 節で、本稿で扱う 2 段アクチュエータ HDD ベンチマーク問題の問題設定を述べる。第 3 節で、外乱の影響を抑圧するための共振フィルタの凸最適化設計手法について述べる。第 4 節で、第 3 節の手法で設計された共振フィルタの性能を 2 段アクチュエータ HDD ベンチマーク問題において評価する。最後に、第 5 節で本稿の結論を述べる。

2. 問題設定

図 1 に、本稿で扱う 2 段アクチュエータ HDD ベンチマー

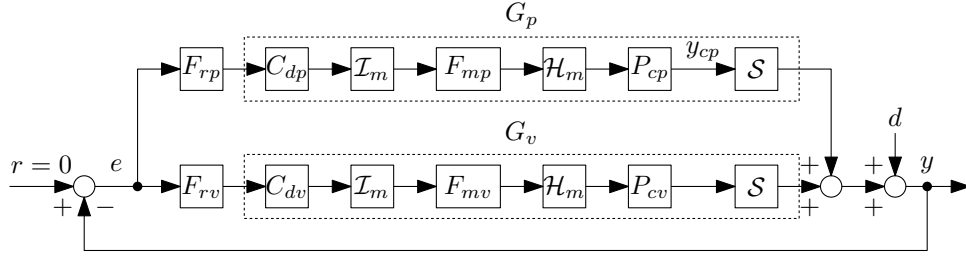


図2 2段アクチュエータのハードディスクドライブのブロック線図
Fig. 2. Block diagram of hard disk drive with dual-stage-actuator.

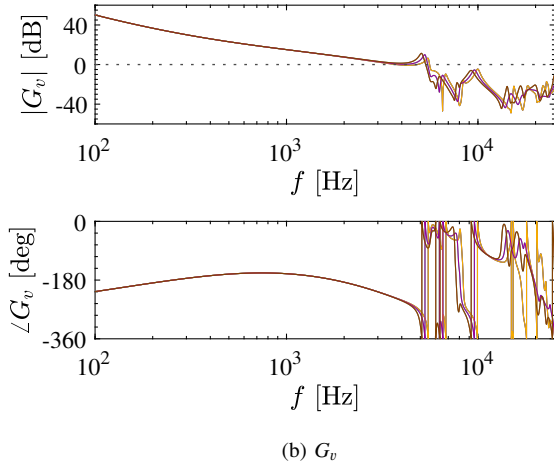
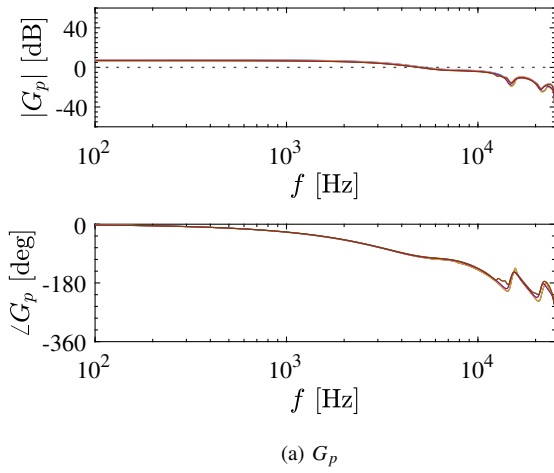


図3 既存の開ループ系の周波数応答
Fig. 3. Frequency responses of given open-loop systems.

ク問題における制御対象の概観を示す [3]。この HDD は、ボイスコイルモータ（Voice Coil Motor: VCM）と piezoelectric actuator（PieZoelecTric actuator: PZT actuator）の 2 つのアクチュエータを用いて、ディスク上における磁気ヘッドの位置制御を行う制御系となっている。このベンチマーク問題では、1 秒間の定常応答における連続時間の磁気ヘッドの位置 y_c の標準偏差の 3 倍値の最悪ケースを最小化する

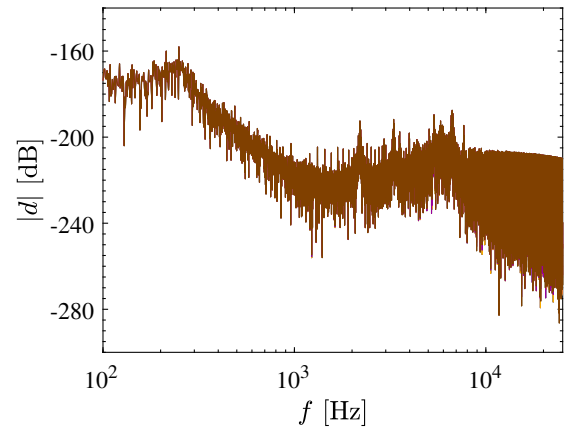


図4 出力端外乱の周波数スペクトル
Fig. 4. Frequency spectrum of output disturbances.

ことを目的とする。トラックピッチを $T_p = 52.7 \text{ nm}$ 、サンプリング時間を $T_s = 1/(7200/60)/420 \approx 1.9841 \times 10^{-6} \text{ s}$ とする。また、機械的な可動域の制約から連続時間の piezoelectric actuator の変位 y_{cp} は $\pm 50 \text{ nm}$ より小さい必要がある。

2 段アクチュエータ HDD の制御系のブロック線図を図 2 に示す。ここで、 P_c は連続時間の制御対象、 C_d は離散時間のシングルレートフィードバック制御器、 F_m は離散時間のマルチレートフィルタ、下付き添字の p と v は piezoelectric actuator とボイスコイルモータをそれぞれ表す。連続時間の制御対象は 9 つの場合のモデル変動を持ち、モデル変動に対応したデータ番号 $k_c = 1, \dots, 9$ を用いて下付き添字で表す。 $m \in \mathbb{N}$ をマルチレート数として、 I_m を m 倍にアップサンプルするインターポレータ、 $\mathcal{H}_m$ を m 倍のマルチレート系におけるマルチレートホールド、 $\mathcal{S}$ をサンプラとする。本稿では、指令値 $r = 0$ の条件において連続時間の磁気ヘッドの位置 y_c の最悪ケースを最小化するように、各アクチュエータにおける離散時間の既存の開ループ制御系 G_p , G_v に対して、出力端外乱 d の影響を抑圧する離散時間のシングルレートフィルタ F_{rp} と F_{rv} を各アクチュエータにそれぞれ設計することを目的とする。

既存の開ループ系における piezoelectric actuator の周波数応答 $G_{p,k_c}(j\omega_{k_f})$ とボイスコイルモータの周波数応答

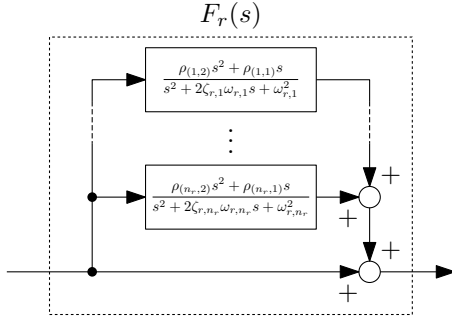


図5 共振フィルタのブロック線図
Fig. 5. Block diagram of resonant filters.

$G_{v,k_c}(j\omega_{k_f})$ を図3にそれぞれ示す。ただし、 n_f を周波数応答のデータ点数とし、 $k_f = 1, \dots, n_f$ は周波数応答のデータ番号とする。

このベンチマーク問題において本稿で扱う出力端外乱 d は、HDD 本体に加わる回転加速度外乱 d_f 、ストレージボックス内で発生するファン起因外乱 d_p 、位置信号に含まれる誤差成分 d_{RRO} の周波数応答から等価的に次のように求められる。

$$d_{k_c}(j\omega_{k_f}) = P_{cv,k_c}(j\omega_{k_f})d_f(j\omega_{k_f}) + d_p(j\omega_{k_f}) - d_{\text{RRO}}(j\omega_{k_f}) \cdots (1)$$

出力端外乱の周波数スペクトルを図4に示す。

以上の問題設定から、指令値 $r = 0$ 、出力 y 、誤差 $e = r - y$ の関係性において、連続時間の磁気ヘッドの位置 y_c の最悪ケースを最小化する問題は、離散時間の誤差 e の最悪ケースを最小化する問題として扱うことができる。本稿では、離散時間の誤差 e の最悪ケースを最小化するように、各アクチュエータにおける離散時間の既存の開ループ制御系 G_p 、 G_v に対して、出力端外乱 d の影響を抑圧する離散時間のシングルレートフィルタ F_{rp} と F_{rv} を各アクチュエータにそれぞれ設計することを目的とする。

3. 2 段アクチュエータ HDD の制約を考慮した複数共振フィルタの凸最適化設計

本節では、出力端外乱 d の影響を抑圧するための制御器として、外乱周波数に対応した共振フィルタを各アクチュエータに対して設計する。モデルベースの手法で設計した共振フィルタを初期値とし、共振フィルタ設計問題をモデル変動を含む周波数応答データを直接用いたデータ駆動型最適化問題として定式化し、逐次線形化を用いた凸最適化により計算する手法を示す。

〈3・1〉 設計する共振フィルタ 本稿では、出力端外乱 d の影響を抑圧するための制御器として、内部モデル原理に基づき外乱周波数に対応した共振フィルタを設計する [1]。設計する共振フィルタのブロック線図を図5に示す。各アクチュエータにおける共振フィルタは次のように定式化される。

$$F_{r,k_u}(j\omega_{k_f}, \rho_{k_u})$$

$$= 1 + \sum_{k_r=1}^{n_r} \frac{\rho_{k_u,(k_r,2)}(j\omega_{k_f})^2 + \rho_{k_u,(k_r,1)}(j\omega_{k_f})}{(j\omega_{k_f})^2 + 2\zeta_{r,k_r}\omega_{r,k_r}(j\omega_{k_f}) + \omega_{r,k_r}^2}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 \\ \rho_{k_u,(1,1)} \\ \rho_{k_u,(1,2)} \\ \vdots \\ \rho_{k_u,(n_r,1)} \\ \rho_{k_u,(n_r,2)} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \frac{1}{(j\omega_{k_f})^2 + 2\zeta_{r,1}\omega_{r,1}(j\omega_{k_f}) + \omega_{r,1}^2} \\ \frac{(j\omega_{k_f})}{(j\omega_{k_f})^2 + 2\zeta_{r,1}\omega_{r,1}(j\omega_{k_f}) + \omega_{r,1}^2} \\ \vdots \\ \frac{(j\omega_{k_f})}{(j\omega_{k_f})^2 + 2\zeta_{r,n_r}\omega_{r,n_r}(j\omega_{k_f}) + \omega_{r,n_r}^2} \\ \frac{(j\omega_{k_f})^2}{(j\omega_{k_f})^2 + 2\zeta_{r,n_r}\omega_{r,n_r}(j\omega_{k_f}) + \omega_{r,n_r}^2} \end{bmatrix}$$

$$= \rho_{k_u}^T \phi(j\omega_{k_f}) \cdots (2)$$

ただし、各アクチュエータに対応する下付き添字を $k_u \in \{p, v\}$ 、共振フィルタを設計する周波数の個数を $n_r \in \mathbb{N}$ 、共振フィルタを設計する周波数のデータ番号を $k_r = 1, \dots, n_r$ 、各アクチュエータの調整パラメータを $\rho_{k_u} \in \mathbb{R}^{2n_r+1}$ 、共振角周波数を $\omega_{r,k_r} \in \mathbb{R}_{>0}$ 、ダンピング係数を $\zeta_{r,k_r} \in \mathbb{R}_{>0}$ とする。本稿において、設計する共振フィルタの共振角周波数 ω_{r,k_r} とダンピング係数 ζ_{r,k_r} は外乱や誤差の周波数特性から予め与えられているものとし、分子多項式の係数である調整パラメータ ρ_{k_u} を調整することを目的とする。

〈3・2〉 最適化問題の立式 まず、周波数データを用いた制御器設計において、誤差 e の最悪ケースを最小化することを目的として、誤差の周波数スペクトルの最大値を最小化することを目的関数として最適化問題を定式化する。

次に、ロバスト安定性のための感度関数の制約条件を設計する。各周波数点における感度関数のゲインの最大値 $w_s(j\omega_{k_f})$ を重み関数として、全周波数点において

$$w_s(j\omega_{k_f})|S_{k_c}(j\omega_{k_f}, \rho)| \leq 1 \cdots (3)$$

を満たすことをロバスト安定条件とする。ただし、感度関数の周波数応答データを

$$S_{k_c}(j\omega_{k_f}, \rho) = \frac{1}{1 + L_{k_c}(j\omega_{k_f}, \rho)} \cdots (4)$$

とし、全体の開ループ周波数応答データを

$$L_{k_c}(j\omega_{k_f}, \rho) = G_{p,k_c}(j\omega_{k_f})F_{r,p}(j\omega_{k_f}, \rho_p) + G_{v,k_c}(j\omega_{k_f})F_{r,v}(j\omega_{k_f}, \rho_v) \cdots (5)$$

とする。

以上の考察から、誤差 e の最悪ケースを最小化するロバスト安定性を考慮した共振フィルタ設計は、次の最適化問題として定式化できる。

$$\underset{\rho}{\text{minimize}} \quad \max_{k_c, k_f} |e_{k_c}(j\omega_{k_f})| \cdots (6)$$

$$\text{subject to} \quad w_s(j\omega_{k_f}) - |1 + L_{k_c}(j\omega_{k_f}, \rho)| \leq 0 \cdots (7)$$

ここで、周波数領域において誤差の周波数応答データと外乱の周波数応答データは

$$e_{k_c}(j\omega_{k_f}) = S_{k_c}(j\omega_{k_f}, \rho) d_{k_c}(j\omega_{k_f}) \dots \dots \dots (8)$$

の関係性があることから、誤差の周波数スペクトルの最大値を最小化する最適化問題の目的関数は、次のように外乱と全体の開ループ周波数応答データで書き表すことができる。

$$\begin{aligned} & \underset{\rho}{\text{minimize}} \quad \max_{\forall k_c, \forall k_f} |e_{k_c}(j\omega_{k_f})| \Leftrightarrow \underset{\rho}{\text{maximize}} \quad \min_{\forall k_c, \forall k_f} \frac{1}{|e_{k_c}(j\omega_{k_f})|} \\ & \Leftrightarrow \underset{\rho}{\text{minimize}} \quad - \left(\min_{\forall k_c, \forall k_f} \left| \frac{1}{d_{k_c}(j\omega_{k_f})} (1 + L_{k_c}(j\omega_{k_f}, \rho)) \right| \right) \dots (9) \end{aligned}$$

以上より、誤差の周波数スペクトルの最大値を最小化する最適化問題は、外乱の周波数応答データ $d_{k_c}(j\omega_{k_f})$ 、全体の開ループ周波数応答データ $L_{k_c}(j\omega_{k_f}, \rho)$ 、各周波数点における感度関数のゲインの最大値 $w_s(j\omega_{k_f})$ を用いて次のように定式化できる。

$$\underset{\rho}{\text{minimize}} \quad -\gamma \dots \dots \dots (10)$$

$$\text{subject to} \quad \gamma - \left| \frac{1}{d_{k_c}(j\omega_{k_f})} (1 + L_{k_c}(j\omega_{k_f}, \rho)) \right| \leq 0 \dots (11)$$

$$w_s(j\omega_{k_f}) - |1 + L_{k_c}(j\omega_{k_f}, \rho)| \leq 0 \dots \dots \dots (12)$$

〈3・3〉 逐次線形化による凸最適化 定式化した最適化問題において、各制約条件の左辺は凸関数の差であり非凸関数となっている。これらの制約条件に対して、逐次線形化手法である ConCave-Convex Procedure (CCCP) [4] を用いることにより、非凸最適化問題を凸最適化問題の繰り返し演算で求解することができる。CCCP は局所最適解あるいは鞍点に単調に収束することが示されているが、大域最適解への収束は保証されておらず初期依存性があることに注意されたい。繰り返し演算のデータ番号を $k_i \in \mathbb{N}$ とし、 $k_i - 1$ 回目の最適化結果を動作点とした k_i 回目の繰り返し演算における凸最適化問題は次のように定式化される。

$$\underset{\rho_{k_i}}{\text{minimize}} \quad -\gamma \dots \dots \dots (13)$$

$$\text{subject to} \quad \gamma - \text{Re} \left(\frac{\left(\frac{1}{d_{k_c}(j\omega_{k_f})} (1 + L_{k_c}(j\omega_{k_f}, \rho_{k_i-1})) \right)^*}{\left| \frac{1}{d_{k_c}(j\omega_{k_f})} (1 + L_{k_c}(j\omega_{k_f}, \rho_{k_i-1})) \right|} \left(\frac{1}{d_{k_c}(j\omega_{k_f})} (1 + L_{k_c}(j\omega_{k_f}, \rho_{k_i})) \right) \right) \leq 0 \dots (14)$$

$$w_s(j\omega_{k_f}) - \text{Re} \left(\frac{(1 + L_{k_c}(j\omega_{k_f}, \rho_{k_i-1}))^*}{|1 + L_{k_c}(j\omega_{k_f}, \rho_{k_i-1})|} (1 + L_{k_c}(j\omega_{k_f}, \rho_{k_i})) \right) \leq 0 \dots \dots \dots (15)$$

〈3・4〉 初期値の共振フィルタ設計 CCCP を用いた繰り返し凸最適化による非凸最適化問題の求解は初期値依存性を持つため、より良い最適化結果を得るためには、できるだけ大域最適解に近い妥当な初期値を与える必要がある。本稿では、安定な共振モードに基づく共振フィルタの設計手法 [3] を用いて設計した共振フィルタを最適化の初期値として与える。ナイキスト線図における安定な共振モードに基づく初期値の共振フィルタのベクトル軌跡を図 6 に示す。この手法では、ナイキスト線図上における共振円を、位相条件が $(-1, j0)$ の点と点対称になるように描くことによ

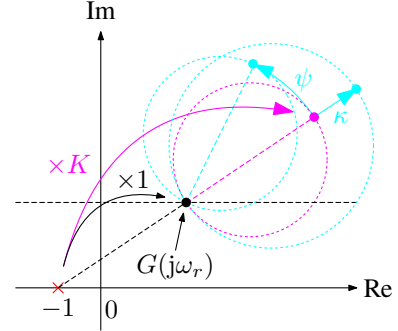


図 6 ナイキスト線図における安定な共振モードに基づく初期値の共振フィルタのベクトル軌跡
Fig. 6. Vector locus with initial resonant filter in Nyquist diagram.

り、安定な共振モードを持つ共振フィルタを設計することができる。

各共振モードの伝達関数が次のように表されるものとする。

$$F(s) = \frac{\kappa s^2 + \kappa \psi s}{s^2 + 2\zeta_r \omega_r s + \omega_r^2} \dots \dots \dots (16)$$

ここで、共振フィルタを設計する角周波数 ω_r における相補感度関数の周波数応答を $T(j\omega_r) = (1 + G(j\omega_r))^{-1}$ とすると、ナイキスト線図上で $(-1, j0)$ の点と点対称になるように共振円を描く位相条件から、共振フィルタの分子多項式の係数 ψ は次のように求まる。

$$\psi = -\omega_r \frac{\text{Im}\{T^{-1}(j\omega_r)\}}{\text{Re}\{T^{-1}(j\omega_r)\}} \dots \dots \dots (17)$$

共振フィルタを設計する角周波数 ω_r における外乱抑圧特性を K 倍改善するように設計する場合、共振フィルタの分子多項式の係数 κ は次のように求まる。

$$\kappa = \frac{\pm 2\zeta_r \omega_r}{\sqrt{\psi^2 + \omega_r^2}} (K - 1) |T^{-1}(j\omega_r)| \dots \dots \dots (18)$$

ただし、正負の符号は

$$\angle T^{-1}(j\omega_r) = \text{atan2} \left(\frac{\pm \omega_r}{\mp \psi} \right) \dots \dots \dots (19)$$

と対応するものとする。

本稿では、

$$G(j\omega_r) = G_p(j\omega_{k_f}) + G_v(j\omega_{k_f}) \dots \dots \dots (20)$$

として、与えられた共振角周波数 ω_{r,k_r} とダンピング係数 ζ_{r,k_r} を用いて、モデル変動のある 1 つの場合の周波数応答データから、各アクチュエータに対して同じ共振フィルタ $F_r = F_{rp} = F_{rv}$ を設計し、それらを最適化の初期値とする。ここで、初期値の共振フィルタはモデル変動を考慮できていないことから、設計に使用したモデル以外に対してロバスト安定性を保証できていない可能性があること、各アクチュエータに対して同じ共振フィルタを用いていることから、各アクチュエータの特性を活かしきれていないことに注意されたい。

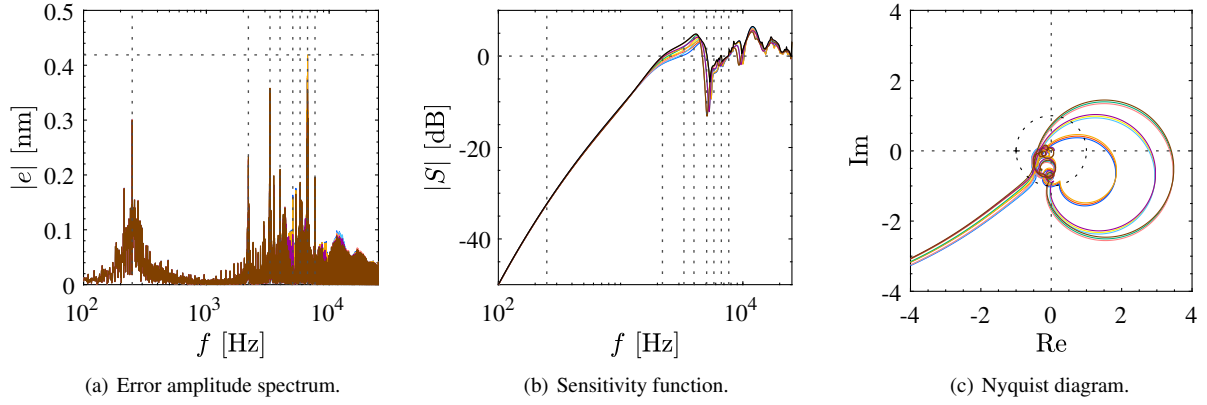


図7 共振フィルタを用いない場合の制御系
Fig. 7. Controlled systems without resonant filters.

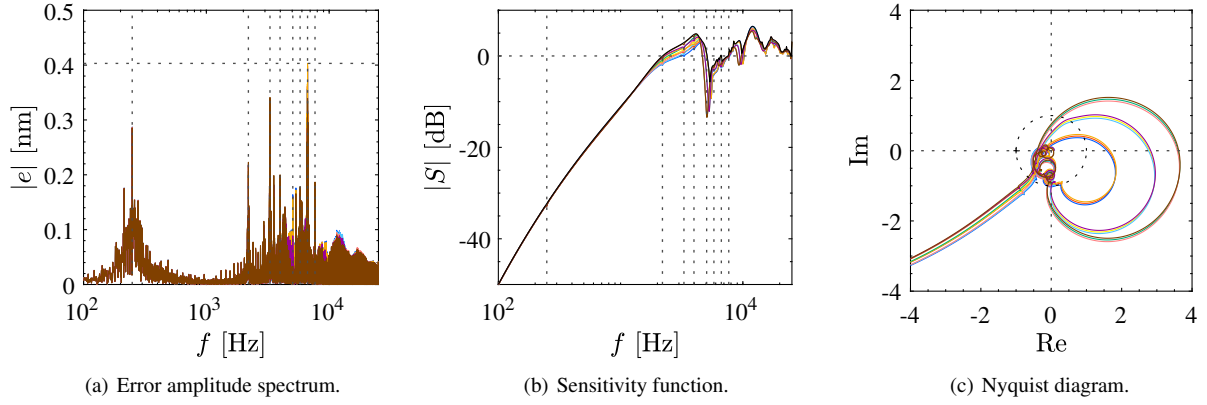


図8 初期値の共振フィルタを用いた場合の制御系
Fig. 8. Controlled systems with initial resonant filters.

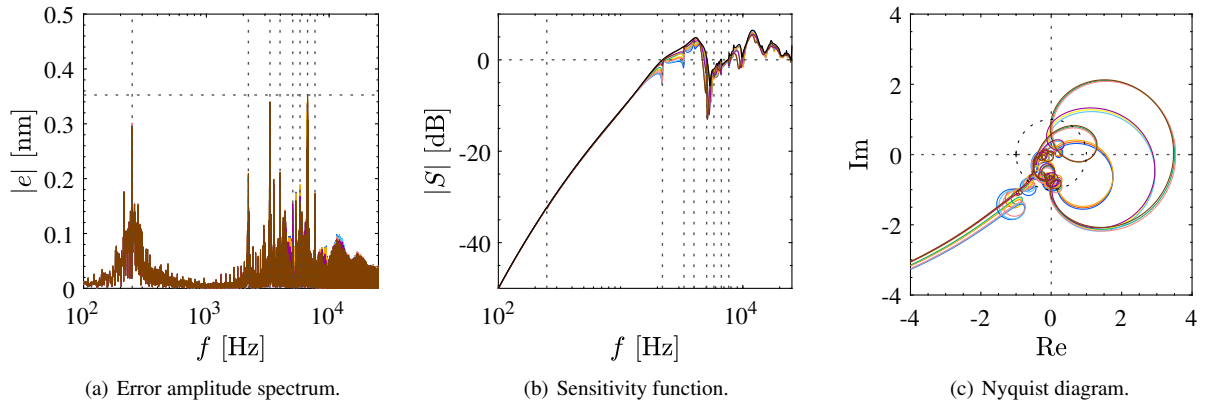


図9 最適化された共振フィルタを用いた場合の制御系
Fig. 9. Controlled systems with optimized resonant filters.

4. 2 段アクチュエータ HDD ベンチマーク問題における外乱抑圧性能の検証

本節では、2 段アクチュエータ HDD ベンチマーク問題において、本稿で提案する凸最適化により設計した共振フィルタによる外乱抑圧性能を検証する。共振フィルタ無し、

初期値、最適化後の共振フィルタを用いる 3 つの場合において、制御性能を 2 段アクチュエータ HDD ベンチマーク問題で評価し、それぞれ結果を比較する。

〈4・1〉 設計条件 制御対象と外乱の周波数応答のデータ点は、100 Hz からナイキスト周波数の $F_s/2 = 1/2T_s =$

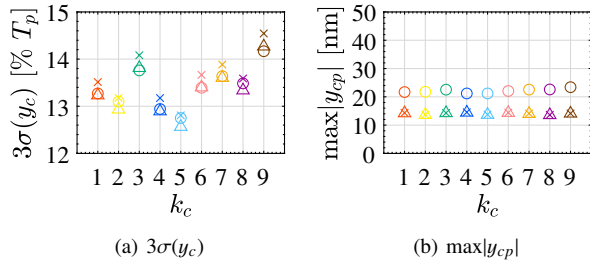


図 10 2 段アクチュエータ HDD ベンチマーク問題のシミュレーション結果。×, Δ, ○ はそれぞれ共振フィルタ無し, 初期値, 最適化後を示す。
Fig. 10. Simulation results of dual-stage-actuator HDD benchmark problem. ×, Δ, ○ denotes, without, with initial and with optimized resonant filters.

25.2 kHz まで線形に 1 Hz 刻みで取得し、データ点数を $n_f = 25101$ とする。

共振フィルタを用いない場合の制御系の誤差の周波数スペクトル, 感度関数, ナイキスト線図を図 7 にそれぞれ示す。図 7(b) の黒実線で示すように, 9 つの場合のモデル変動について各周波数のデータ点において最も大きい感度関数のゲインの値にスケーリング定数を $v_s = 1.01$ を掛けたものを感度関数のゲインの制約条件とし, 感度関数のゲインの最大値 w_s を次のように与える。

$$w_s(j\omega_{k_f}) = v_s \times \max_{k_c} |1 + G_{p,k_c}(j\omega_{k_f}) + G_{v,k_c}(j\omega_{k_f})| \cdots (21)$$

図 7(a) の縦黒点線に示す 8 つの周波数を共振角周波数 ω_r とする共振フィルタをそれぞれ設計し, $\zeta_r = 0.01$ とする。

〈4・2〉 共振フィルタの設計結果 初期値の共振フィルタは感度関数が初めて 0 dB になる周波数が最も小さい $k_c = 9$ の場合のモデルを用いて, 感度関数の制約条件を満たすように各共振フィルタの設計周波数で外乱抑圧特性を $K = 1.05$ 倍改善するように設計する。初期値の共振フィルタを用いた場合の制御系の誤差スペクトル, 感度関数, ナイキスト線図を図 8 にそれぞれ示す。

共振フィルタの最適化計算は YALMIP [5] と MOSEK [6] を用いて行い, 繰り返し最適化は前の繰り返しと比較して評価関数の改善が 1 % 未満になるまで行う。最適化された共振フィルタを用いた場合の制御系の誤差スペクトル, 感度関数, ナイキスト線図を図 9 にそれぞれ示す。最適化後の共振フィルタでは, 初期値の設計に使用したモデル以外に対しても性能とロバスト安定性を考慮した設計を行っており, 各アクチュエータに対して別々の共振フィルタを用いることで各アクチュエータの特性を活かしている。

〈4・3〉 2 段アクチュエータ HDD ベンチマーク問題における外乱抑圧性能の評価 各モデル変動の場合における, 連続時間の磁気ヘッドの位置 y_c の標準偏差の 3 倍値を図 10(a) にそれぞれ示す。図 10(a) より, 連続時間の磁気ヘッドの位置 y_c の最悪ケースである $k_c = 9$ において, $3\sigma(y_c)$ が共振フィルタなし, 初期値, 最適化後と性能が改善している

ことが確認された。また, 最適化後の共振フィルタを用いることで, 全てのモデル変動の場合において連続時間の磁気ヘッドの位置 y_c の最大値が最小化していることが確認できる。

各モデル変動の場合における連続時間のピエゾアクチュエータの変位 y_{cp} の最大値を図 10(b) に示す。いずれの場合も y_{cp} は ± 50 nm より小さくなっていることから, 初期値と最適化後の共振フィルタは実際の制御対象に適用可能であることも確認できる。

5. 結論

本稿では, HDD の複数周波数の外乱抑圧のためのフィードバック制御器として, 外乱周波数に大きなピークを持つ共振フィルタを設計する手法を示した。2 段アクチュエータを持つ HDD において, 複数の外乱周波数に対応した複数の共振フィルタは, 複数のモデル変動に対するロバスト安定性の制約条件を考慮し, 制御対象の周波数応答データを直接用いた凸最適化により設計された。最適化された共振フィルタによる外乱抑圧性能は 2 段アクチュエータ HDD ベンチマーク問題において検証された。時系列データも用いた最適化や制御対象の性能を最大限引き出す制約条件の設計, 共振フィルタ以外のフィードバック制御器やマルチレートフィルタも含めた制御器設計が今後の研究課題である。

文 献

- (1) T. Atsumi, A. Okuyama, and M. Kobayashi, "Track-Following Control Using Resonant Filter in Hard Disk Drives," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 12, no. 4, pp. 472–479, aug 2007. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4291569/>
- (2) S. Shinoda, K. Yubai, D. Yashiro, and J. Hirai, "Multivariable Controller Design Achieving Diagonal Dominance Using Frequency Response Data," *Electronics and Communications in Japan*, vol. 100, no. 10, pp. 12–23, oct 2017. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ecj.11970>
- (3) T. Atsumi, "Magnetic-head positioning control system in HDDs," 2022. [Online]. Available: <https://jp.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/111515-magnetic-head-positioning-control-system-in-hdds>
- (4) A. L. Yuille and A. Rangarajan, "The Concave-Convex Procedure," *Neural Computation*, vol. 15, no. 4, pp. 915–936, apr 2003. [Online]. Available: <http://www.mitpressjournals.org/doi/10.1162/08997660360581958>
- (5) J. Lofberg, "YALMIP : a toolbox for modeling and optimization in MATLAB," in *2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (IEEE Cat. No.04CH37508)*. IEEE, 2004, pp. 284–289. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1393890/>
- (6) Mosek, "MOSEK 9.3," 2021. [Online]. Available: <https://www.mosek.com>