

加速度センサによる伝達特性の同定に基づいた 外乱抑圧制御器の性能評価

中村 則仁*, 呉 世訓, 堀 洋一 (東京大学), 坂東 信尚 (宇宙航空研究開発機構)

Evaluation of External Disturbance Rejection Control based on Identification of Transfer Characteristics from the Acceleration Sensor for Access Control of Hard Disk Drive System

Norihiro Nakamura, Sehoon Oh, Yoichi Hori (The University of Tokyo)
and Nobutaka Bando (Japan Aerospace Exploration Agency)

Abstract

In this paper, we evaluate the performance of the external disturbance rejection control which is based on the identification of transfer characteristics from the acceleration sensor by using a benchmark soft which is programmed by Benchmark Working Group.

In order to evaluate the controller, Benchmark Working Group made the benchmark soft in following mode. Its main purpose is to enable us to evaluate each controller objectively. It is important to improve performance of controller. However, it does not include "external disturbance". Therefore, we add it as sine wave. At last, we show the simulation results.

キーワード: 磁気ディスク装置、加速度センサ、外部外乱抑圧抑圧、フィードフォワードコントロール、ベンチマーク問題 (Hard Disk Drive, Accelerometer, External Disturbance Rejection, Feedforward Control, Benchmark Problem)

1 はじめに

磁気ディスク装置はコンピュータの外部記録装置として広く使われ、また最近ではHDDレコーダ、HDDプレーヤなどのコンシューマエレクトロニクスでも広く用いられるようになってきている。[1]このような社会の要求から、振動的な環境下であっても従来の通りの制御性能が達成できるような磁気ディスク装置制御器の開発は大変意味のあることである。しかし、このような状況の中で制御に要求される精度はますます増してきており、新しい制御器の開発には共通な評価基準を用い各制御器の性能を客観的に評価することが必要だと考えられる。

そこでマストレージシステムのための次世代サーボ技術調査専門委員会において、ベンチマーク問題に対するワーキンググループが構成され、フォロイングモードにおけるベンチマーク問題が作成された。本論文では、過去に提案された手法 [2][3] をこのベンチマークソフトを用いその効果を検証することを目的とする。

検証する制御器は、加速度センサを用いたフィードフォワード制御器である。これは、磁気ディスク装置において存在するシークモード、フォロイングモードのうちフォロイングモードに適用されるものである。具体的には、加速度センサからでは通常では直接観測することができないシステム外乱までの伝達特性を直接同定することによって、フィードフォワード制御器を設計している。このとき、システムに加わる外乱を推定するために、外乱オブザーバを利用する。この制御器を実現することで、外部外乱に対するフォロイングの性能を改善することができる。

ベンチマークソフトに適用する際、外部外乱というものは定義されていないので、ここでは外乱を正弦波として加え周波数を変化させてシミュレーションを行った。

次節で使用した制御器について説明する。

2 外乱抑圧制御器の設計の概略

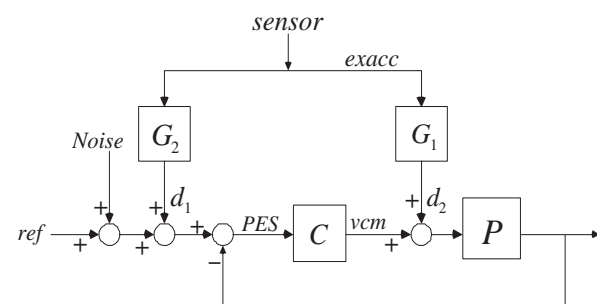


図 1: 加振時の磁気ディスク装置ヘッド位置決め制御系のブロック線図

Fig. 1 Block Diagram of Hard Disk Drive System for Access Control Under Vibration

2.1 システムの構造

加振時の磁気ディスク装置のヘッド位置決め制御系のブロック線図を図 1 に示す。ここで P はプラント、 C はフィードバック制御器である。また $Noise$ は RRO (Repetitive RunOut)、NRRO (Non-Repetitive RunOut) と呼ばれる磁気ディスク装置特有の内部発生外乱を表し、 PES 、 vcm 、 ref は位置誤差信号、ボイスコ

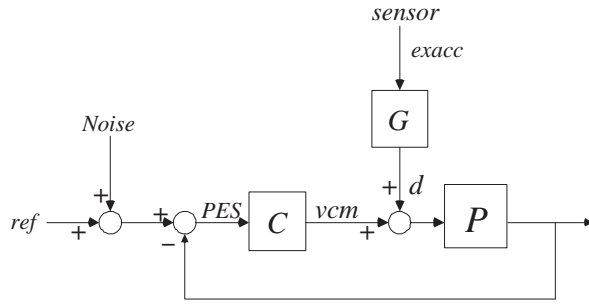


図 2: 加速度センサからシステム外乱までの伝達特性
Fig. 2 Transfer Characteristics from the Acceleration Sensor to Disturbance of the System

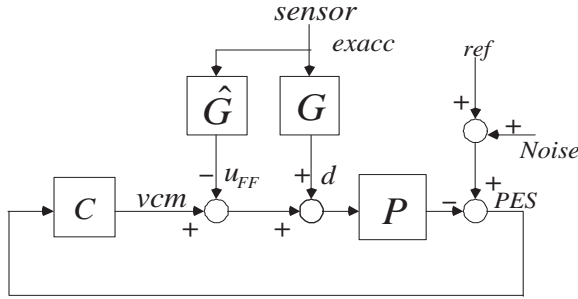


図 3: フィードフォワード入力による外乱抑制御のブロック線図
Fig. 3 Block Diagram of Disturbance Rejection Control using Feedforward Input

イルモータへの制御入力、指令値を表す。外部外乱 $exacc$ から各外乱までの伝達関数を G_1 、 G_2 として表現する。各パラメータは以下のように表すことができる。

$$S = \frac{1}{1+CP} \quad (1)$$

$$PES = (G_1 + P \cdot G_2) \cdot S \cdot exacc \quad (2)$$

ここで図 2 のように再定義する。すると伝達関数を以下の G のように表すことができる。また、同定するこの伝達特性を離散伝達関数として表すこととする。

$$G = \frac{G_1 + P \cdot G_2}{P} \quad (3)$$

$$d = G \cdot exacc = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot exacc \quad (4)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{N_a} z^{-N_a} \quad (5)$$

$$B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{N_b} z^{-N_b} \quad (6)$$

伝達特性を同定することによって、フィードフォワード入力 u_{FF} を外乱 d を打ち消すように入力して外乱を抑圧することができる。そのときの外乱抑制御器のブロック線図は図 3 となる。

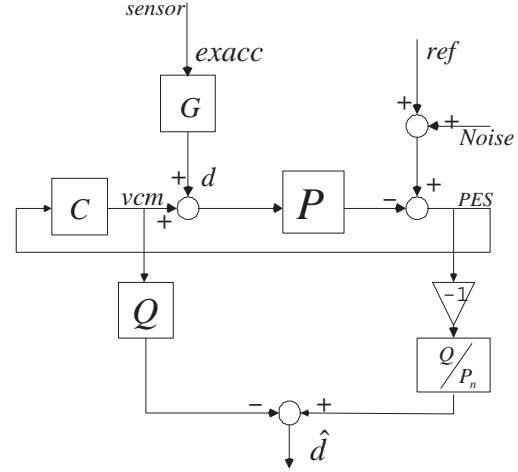


図 4: 外乱オブザーバのブロック線図
Fig. 4 Block Diagram of Disturbance Observer

2.2 外乱オブザーバを用いた伝達特性の同定

本節では伝達関数の同定方法について述べる。本論文では、最小二乗法 (RLS:Recursive Least Squares) および固定トレース法 (FT:Fixed Trace) を用い伝達特性を同定する方法を用いる。

$$\hat{\theta}(k) = [\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_{N_a}, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_{N_b}]^T \quad (7)$$

$$\varphi(k) = [-d(k-1), \dots, -d(k-N_a), exacc(k-1), \dots, exacc(k-N_b)]^T \quad (8)$$

ここで $\hat{\theta}(k)$ が同定したい伝達関数の係数を表している。また式 (8) のように $\varphi(k)$ を定めると、同定パラメータ $\hat{\theta}(k)$ は以下の式を満たすものとして表される。

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{\Gamma(k-1)\phi(k)}{1 + \phi^T(k)\Gamma(k-1)\phi(k)} \epsilon(k) \quad (9)$$

$$\epsilon(k) = \hat{d}(k) - \phi^T(k)\hat{\theta}(k-1) \quad (10)$$

$$\Gamma(k) = \frac{1}{\lambda(k)} \left\{ \Gamma(k-1) - \frac{\Gamma(k-1)\varphi(k)\varphi^T(k)\Gamma(k-1)}{1 + \varphi^T(k)\Gamma(k-1)\varphi(k)} \frac{1}{tr\Gamma(0)} \right\} \quad (11)$$

$$\lambda(k) = 1 - \frac{\|\Gamma(k-1)\varphi(k)\|^2}{1 + \varphi^T(k)\Gamma(k-1)\varphi(k)} \frac{1}{tr\Gamma(0)} \quad (12)$$

しかし (8) にある外乱 d は観測することのできない値である。よって図 4 に表した外乱オブザーバによって推定値 \hat{d} を求め、これを利用する。

$$\hat{d} = \frac{\frac{P}{P_n} + CP}{1 + CP} \cdot Q \cdot d + \xi \quad (13)$$

$$\approx Q \cdot d + \xi \quad (14)$$

よって式 (14) より

$$\varphi'(k) = [-\hat{d}(k-1), \dots, -\hat{d}(k-N_a), Q \cdot exacc(k-1), \dots, Q \cdot exacc(k-N_b)]^T \quad (15)$$

この φ' を式 (9) ~ 式 (12) に用いて伝達関数を同定すればよい。

2.3 フィードフォワード入力的设计方法

最後に図 3 のフィードフォワード入力 u_{FF} の設計を行う。前節で同定した伝達関数と加速度センサで得られた $exacc$ を用いることで、 u_{FF} は以下のように表される。

$$\begin{aligned} u_{FF} &= \hat{G} \cdot exacc(k) \\ &= \hat{B}(z^{-1})exacc(k) + \{1 - \hat{A}(z^{-1})\}u_{FF}(k) \\ &= \hat{b}_1 exacc(k-1) + \dots + \hat{b}_{N_b} exacc(k-N_b) \\ &\quad - \hat{a}_1 u_{FF}(k-1) - \dots - \hat{a}_{N_a} u_{FF}(k-N_a) \end{aligned} \quad (16)$$

これを用い外乱を抑圧する。

3 ベンチマークソフトによる性能評価

3.1 シミュレーションの方法

コントローラはすべてのシミュレーションで同一の PID 制御器を用いた。以下にその他、それぞれの設定について述べる。

3.1.1 伝達特性について

同定する伝達関数はあらかじめあておき、それを同定手法により同定した。その同定パラメータ $\hat{\theta}(k)$ の次元は $N_a = N_b = 4$ とし、 $a_1 \sim a_4$ 、 $b_1 \sim b_4$ の各値を以下のように定めた。なおこの値は、文献 [4] で、90[Hz] の単一周波数を加えた場合に同定された伝達関数のデータを参考に求めた。

$$\begin{aligned} a_1 &= 1.3 & a_2 &= 0.25 & a_3 &= -0.12 & a_4 &= -0.45 \\ b_1 &= -9.0 \times 10^{-4} & b_2 &= 3.0 \times 10^{-4} \\ b_3 &= -4.5 \times 10^{-4} & b_4 &= 2.8 \times 10^{-4} \end{aligned} \quad (17)$$

また同定する周期は、 3.79×10^{-5} [s] とし、外乱オブザーバ内の 2 次のローパスフィルタ Q のカットオフ周波数を 500[Hz] とする。

以上の条件でシミュレーションを行う。

3.2 シミュレーションの結果

まずは、比較の対象として外部外乱を加えず PID コントローラのみを用いた場合のデータを示す。なお、このシミュレーションモデルの 1Track 幅は 254[nm] である。

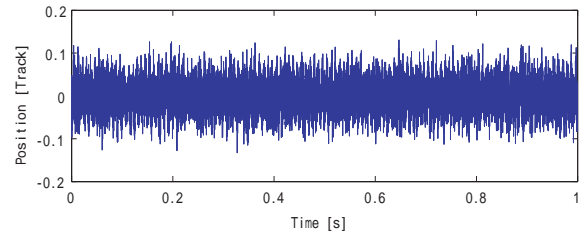


図 5: 外部外乱を加えない時のヘッドの位置
Fig. 5 Head Position without External Disturbance

3.2.1 低周波数外乱 (60[Hz] ~ 80[Hz])

入力する周波数を 60、70、80[Hz] と変え、それぞれについてシミュレーションを行った。ただしここで低周波数とは、フィードバック制御器により抑圧できる外乱、という意味で用いている。

以下に 60[Hz] の低周波数外乱を加えた場合の PES の様子について示す。図からはあまり改善されているようには見えないが、これは低周波数域では既存のフィードバック制御器が上手く働いているため (図 6) であると考えられる。しかし 3σ の値は、フィードフォワード入力を入れない場合は 0.169 だったのに対し、入力後は 0.124 となりおよそ 30% 改善されていることから既存のフィードバック制御器の性能を損なうことなく外乱を抑圧できていることがわかる。またそのほかの低周波外乱でも、その 3σ の値は 70[Hz] では 28%、80[Hz] では 25% と抑圧することができていた。

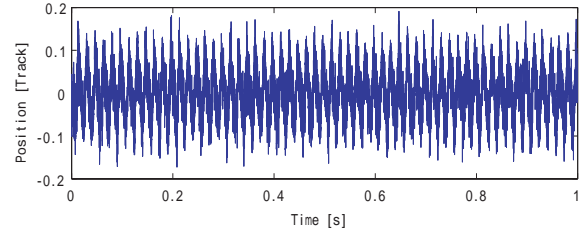


図 6: 外部外乱 60[Hz] を加えた時のヘッドの位置:FF 入力なし
Fig. 6 Head Position under 60[Hz] Vibration without FF Input

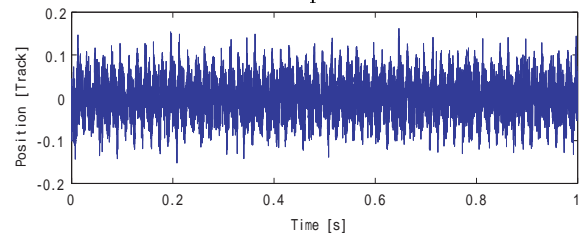


図 7: 外部外乱 60[Hz] を加えた時のヘッドの位置:FF 入力あり
Fig. 7 Head Position under 60[Hz] Vibration with FF Input

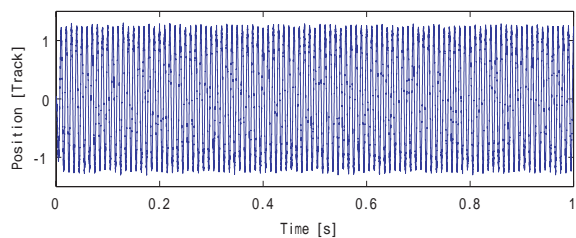


図 8: 外部外乱 100[Hz] を加えた時のヘッドの位置:FF 入力なし

Fig. 8 Head Position under 100[Hz] Vibration without FF Input

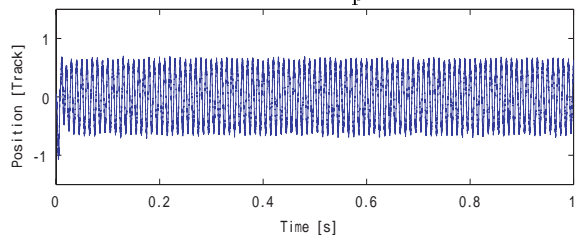


図 9: 外部外乱 100[Hz] を加えた時のヘッドの位置:FF 入力あり

Fig. 9 Head Position under 100[Hz] Vibration with FF Input

3.2.2 中周波数外乱

図 8、図 9 に 100[Hz] の中周波数外乱を加えた場合の PES の様子について示す。中周波外乱を加えると既存のフィードバックでは外乱を抑えきれず悪化している (図 8) が、フィードフォワード入力を加えることで、明らかに改善されている (図 9)。 3σ の値も、フィードフォワード入力を入れない場合は 2.56 だったのに対し、入力後は 1.28 となりおよそ 50% 改善されていることがわかる。またそのほかの中周波外乱でも、200[Hz] では 49% 抑圧することができ、同様な結果を見る事が確認できた。よって、中周波数外乱では効果的に抑圧されていることがわかる。

3.2.3 高周波数外乱 (300[Hz]~)

図 10、図 11 に 300[Hz] の高周波外乱を加えた場合の PES の様子について示す。高周波数外乱ではそれほど外乱の影響が強く表れないが (図 10)、フィードフォワード入力をする事で振動外乱を減少させることができている。その時の 3σ の値は、フィードフォワード入力を入れない場合は 0.380 だったのに対し、入力後は 0.211 となりおよそ 40% 改善されていることがわかる。またそのほかの高周波外乱でも、フィードバック制御器の性能を損ねることなく外乱を抑圧することができていることが確認できた。

4 結論

本論文では、ベンチマークソフトを用いて加速度センサからの伝達特性に基づいた外部外乱制御器の性能について評価した。以上の結果から、ベンチマークソフトに

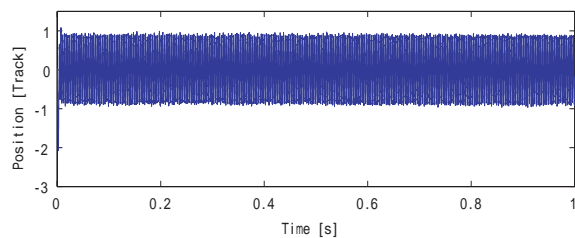


図 10: 外部外乱 300[Hz] を加えた時のヘッドの位置:FF 入力なし

Fig. 10 Head Position under 300[Hz] Vibration without FF Input

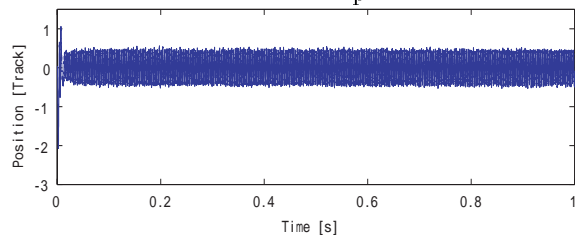


図 11: 外部外乱 300[Hz] を加えた時のヘッドの位置:FF 入力あり

Fig. 11 Head Position under 300[Hz] Vibration with FF Input

よっても提案された外部外乱抑圧制御器が特に中周波数外乱に対して有効であることを確認することができた。また、その他の周波数外乱に対しても既存の制御器に悪影響を与えずに性能を改善できていることも確認した。

5 謝辞

本論文においてベンチマークソフトで検証に使わせていただいた「加速度センサからの伝達特性に基づいた外部外乱制御器」は坂東 信尚氏、呉 世訓氏によって研究されたものであり [2][3]、それを快く使わせて頂いたことにここで感謝申し上げます。また、本論文を書くにあたって助言いただいた両氏に重ねて感謝申し上げます。

References

- [1] 原 武生: "ハードディスク概説", IEEJ Journal, Vol.123, No.9, 2003
- [2] 坂東 信尚, 呉 世訓, 堀 洋一: "加速度センサからの伝達特性に基づいた外部外乱抑圧制御器の磁気ディスク装置への応用", 産業計測制御研究会, 2002
- [3] Nobutaka Bando, Sehoon Oh and Yoichi Hori: "Disturbance Rejection Control based on Adaptive Identification of Transfer Characteristics from Acceleration Sensor for Hard Disk Drives System", 電気学会論文誌 D 部門, Vol. 123, No. 12, 2003
- [4] Nobutaka Bando, Yoichi Hori: "Design of High Precision Servo Control System Based on Time Series of Data" 坂東 信尚, 堀 洋一: "時系列データを用いた高精度サーボ制御系設計法に関する研究", 東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻学位論文 (2004)