

# 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

坂東 信尚\*, 呉 世訓, 堀 洋一 (東京大学)

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

Nobutaka Bando, Sehoon Oh and Yoichi Hori (The University of Tokyo)

### Abstract

In this paper, a new method for the external disturbance rejection control which is based on the identification of transfer characteristics from the acceleration sensor is proposed. For hard disk drives, the external disturbance which should be reduced is growing with widespread use of movable computers and other independent machines. In order to reject the effect of the external disturbance we apply the feedforward controller which is designed by Recursive Least Squares (RLS) algorithm and Fixed Trace (FT) algorithm utilizing the acceleration signal and the estimated disturbance signal. Some experimental results in which a disk drive is shaken in the vertical direction are shown to verify the effectiveness of the proposed method.

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、フィードフォワードコントロール、最小二乗法 (Hard Disk Drive, Accelerometer, External Disturbance Rejection, Feedforward Control, Recursive Least Squares Algorithm)

## 1 はじめに

現在、磁気ディスク装置のヘッド位置決め制御系は高密度に記憶されたデータを素早く読み書きするために高速高精度な位置決め性能が実現されている。しかし、昨今のモバイルコンピュータの普及や磁気ディスク装置の様々な使用条件を考えると、振動的な環境下であっても従来通りの制御性能が達成される磁気ディスク装置の開発は大変重要な課題である。

磁気ディスク装置のヘッド位置決め制御系にはヘッドが目標トラックに移動するシークモードとヘッドが目標トラックに追従するフォロイングモードが存在する。特にフォロイングモードでは、ヘッドがデータを正確に読み書きするために外部からの外乱やモデル化誤差に対してロバストな制御系が求められる。したがって、振動下での使用が増えてきた現在では、ヘッドを正確に位置決めするフォロイングモードは大変厳しい環境下で制御性能を出さなくてはならない。

このような背景からフォロイングモードの制御性能を改善する研究が数多くなされてきたが [1]、特に最近では安価で高性能な加速度センサが手に入るようになってきたことから、加速度センサを用いた制御系設計の方法が数多く研究されている [2][3]。White, Tomizuka らは加速度センサから PES (Position Error Signal) までの伝達特性を正確に同定することによって、回転振動を抑圧するフィードフォワード制御器を提案している [4]。ま

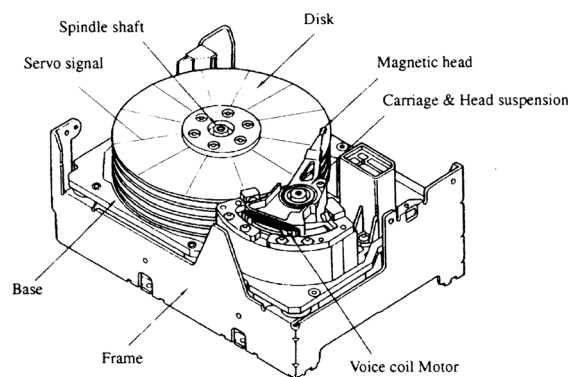


図 1: 磁気ディスク装置の概観図

た、Pannu, Horowitz とも加速度センサから PES までの伝達特性を ARX モデルとして同定することによって、ディスクモータと平行方向の振動を抑圧するフィードフォワード制御器を提案している [5]。また、Beak, Lee らは加速度センサの位相遅れを補償する方法を提案している [6]。

本論文においても加速度センサを用いたフィードフォ

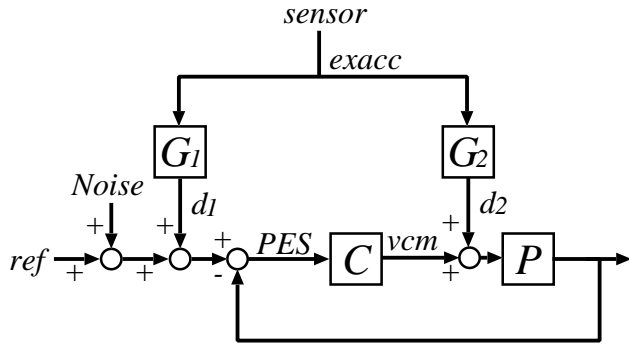


図 2: 加振時における磁気ディスク装置ヘッド位置決め制御系のブロック線図

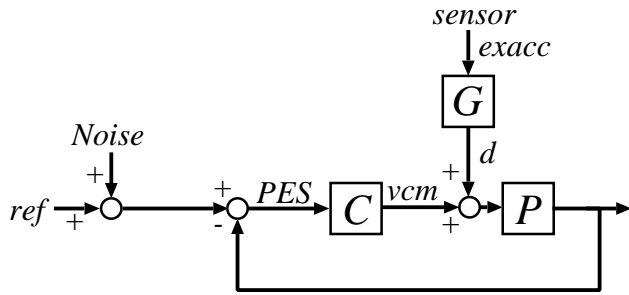


図 3: 加速度センサからシステム外乱までの伝達特性

ワード制御器の設計法を提案する。しかし、本論文では加速度センサから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する。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 [7]。本手法により、従来手法では幾つかの伝達特性を同定しなくてはならなかったフィードフォワード制御器の設計を簡略化することができる。さらに、本論文では実際に磁気ディスク装置を振動させる実験を行い、本手法により外部振動が効果的に抑圧できることを実証する。

## 2 外乱抑圧制御器の設計

### 2.1 加速度センサからの伝達特性の同定

#### 2.1.1 システムの構造について

振動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 2 に示す。図 2 中、 $P$ 、 $C$  はそれぞれプラント、フィードバック制御器のブロック線図を表す。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、ボイスコイルモータへの制御入力、指令値を表す。外部外乱  $exacc$  は円板ディスク、ヘッドに外乱  $d_1$ 、 $d_2$  を与えるが、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。外部外乱  $exacc$

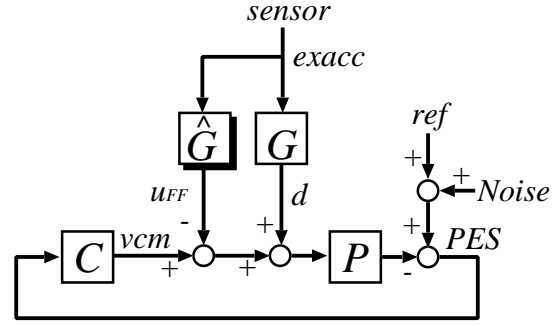


図 4: フィードフォワード入力を用いた外乱抑圧制御のブロック線図

から位置誤差信号  $PES$  までの伝達特性は感度関数  $S$  (式 (1)) を用いて、式 (2) のように表される。

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

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

ここで、加速度センサからシステム外乱  $d$  までの伝達特性を図 3 のように再定義し、式 (3) として表す。さらに本論文ではこの伝達特性を有限次数の離散伝達関数として式 (4) のように表現する。

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

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

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

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

本論文では、このように表現された伝達特性を同定することによって、外乱  $d$  と同じフィードフォワード入力  $u_{FF}$  を外乱に対して減じるように入力する。これにより、図 4 のような外乱抑圧制御のブロック線図が構成される。

#### 2.1.2 外乱オブザーバを用いた同定

システム同定には様々な手法が提案されているが、本論文では最小二乗法 (RLS: Recursive Least Squares) と固定トレース法 (FT: Fixed Trace) により、伝達特性を同定する (式 (5) ~ (8))。

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{\Gamma(k-1)\varphi(k)}{1 + \varphi^T(k)\Gamma(k-1)\varphi(k)} \varepsilon(k) \quad (5)$$

$$\varepsilon(k) = \hat{d}(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1) \quad (6)$$

$$\Gamma(k) = \frac{1}{\lambda(k)} \{\Gamma(k-1)$$

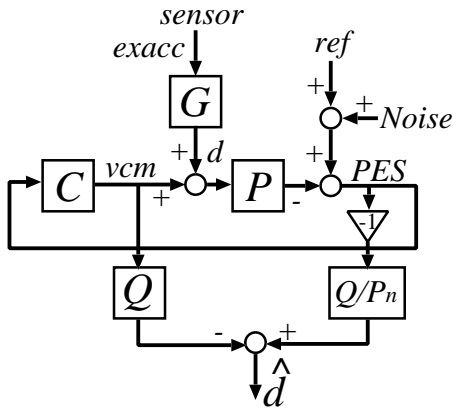


図 5: 外乱推定値を得る外乱オブザーバのブロック線図

$$- \frac{\Gamma(k-1)\varphi(k)\varphi^T(k)\Gamma(k-1)}{1 + \varphi^T(k)\Gamma(k-1)\varphi(k)} \} \quad (7)$$

$$\lambda(k) = 1 - \frac{\|\Gamma(k-1)\varphi(k)\|^2}{1 + \varphi^T(k)\Gamma(k-1)\varphi(k)} \frac{1}{\text{tr}\Gamma(0)} \quad (8)$$

ここで、 $\Gamma(k)$  は共分散行列を示し、 $\hat{\theta}(k)$ 、 $\varphi(k)$  は式 (9) の同定パラメータ、式 (10) の同定伝達特性の入出力信号を表す。最小二乗法では式 (6) の式誤差が最小化されるように同定パラメータ  $\hat{\theta}(k)$  が決定される。さらに固定トレース法を適用することによって、伝達関数のパラメータは入出力信号  $\varphi(k)$  の大きさにより、忘却係数が適切に選択され (式 (8))、適切なパラメータ更新が実行される。

$$\hat{\theta}(k) = [\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_{N_a}, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_{N_b}]^T \quad (9)$$

$$\varphi(k) = [-d(k-1), \dots, -d(k-N_a), \text{exacc}(k-1), \dots, \text{exacc}(k-N_b)]^T \quad (10)$$

しかし実際には、外部外乱  $d$  は直接観測することができないので、図 5 で示される外乱オブザーバを利用し、直接観測できない外乱  $d$  の代わりに外乱推定値  $\hat{d}$  を用いる。ここで、 $Q$ 、 $P_n$  はローパスフィルタ、ノミナルプラントのブロック線図を表す。

$$\hat{d} = \left\{ -\frac{-CP}{1+CP} \cdot Q + \frac{Q}{P_n} \frac{P}{1+CP} \right\} \cdot d - \frac{Q}{P_n} \frac{1}{1+CP} \{ \text{ref} + \text{Noise} \} \quad (11)$$

$$= \frac{P}{P_n} + CP \cdot Q \cdot d + \xi \quad (12)$$

$$\approx Q \cdot d + \xi \quad (13)$$

式 (12) を  $P \approx P_n$  と近似することにより、外乱推定値  $\hat{d}$  は式 (13) のように表される。また、 $\xi$  は  $\text{Noise}$ 、 $P$  と  $P_n$  間の誤差を表す。外乱推定値  $\hat{d}$  を用いることによって、式 (10) の入出力信号は式 (14) によって代用される。

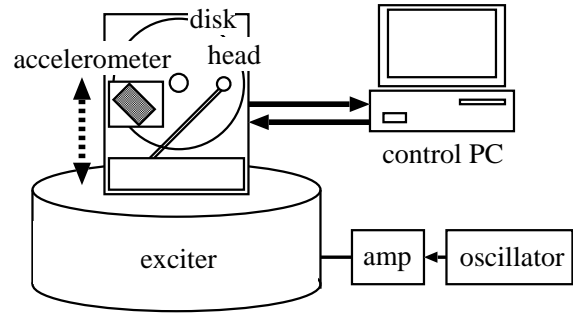


図 6: 磁気ディスク装置を用いた実験構成

式 (14) では  $\text{exacc}$  にローパスフィルタ  $Q$  を付加することによって  $\hat{d}$  内に存在する  $Q$  と一致させている。

$$\varphi'(k) = [-\hat{d}(k-1), \dots, -\hat{d}(k-N_a), Q \cdot \text{exacc}(k-1), \dots, Q \cdot \text{exacc}(k-N_b)]^T \quad (14)$$

## 2.2 フィードフォワード入力的设计方法

前節では伝達特性の同定について外乱オブザーバを利用する手法を提案したが、本節ではこの伝達特性を用いることによって、図 4 のフィードフォワード入力  $u_{FF}$  の設計を行う。本手法の利点として、フィードバック制御器を含めたシステムの再構成を行わずにフィードフォワード入力  $u_{FF}$  を適用できることが挙げられる。

$$u_{FF}(k) = \hat{G} \cdot \text{exacc}(k) \quad (15)$$

$$= \hat{B}(z^{-1})\text{exacc}(k) + \{1 - \hat{A}(z^{-1})\}u_{FF}(k) \quad (16)$$

$$= \hat{b}_1 \text{exacc}(k-1) + \dots + \hat{b}_{N_b} \text{exacc}(k-N_b) + \hat{a}_1 u_{FF}(k-1) + \dots + \hat{a}_{N_a} u_{FF}(k-N_a) \quad (17)$$

## 3 磁気ディスク装置による実験

### 3.1 実験環境

前節では加速度センサからの伝達特性の同定方法とフィードフォワード入力の設計方法について述べた。本章ではこれら手法をリアルタイムで稼働させるアルゴリズムを用い、実際に磁気ディスク装置ヘッド位置決め制御系のフォロイングモードに適用する。

図 6 に本実験で用いた実験構成図を示す。加速度センサは外部外乱を観測するために磁気ディスク装置のベース部に取り付け、加振器を用いて磁気ディスク装置全体をスピンドルモータに対して垂直方向に振動させる。このとき、加速度センサはヘッドを支持するキャリッジの動きに対して感度が最大になるような方向に設置する。

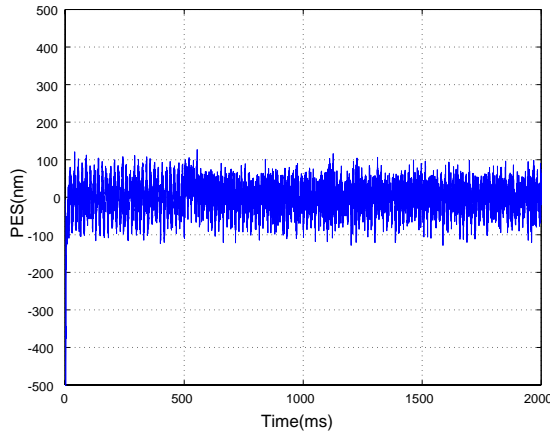
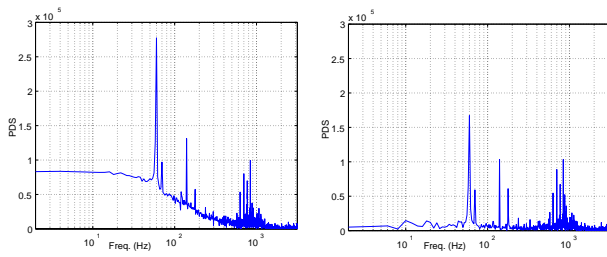


図 7: 60[Hz] 外乱加振時の PES 信号時系列



(a)0[ms] ~ 500[ms] 提案 FF 入力  $u_{FF}$  なし  
(b)1500[ms] ~ 2000[ms] 提案 FF 入力  $u_{FF}$  あり

図 8: 60[Hz] 加振時の PES 信号フーリエ変換特性

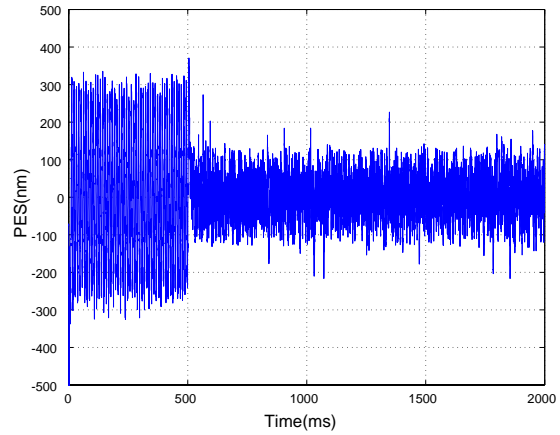
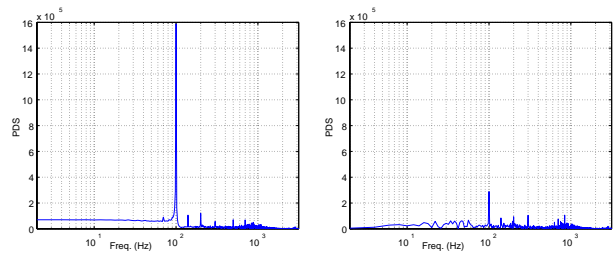


図 9: 100[Hz] 外乱加振時の PES 信号時系列



(a)0[ms] ~ 500[ms] 提案 FF 入力  $u_{FF}$  なし  
(b)1500[ms] ~ 2000[ms] 提案 FF 入力  $u_{FF}$  あり

図 10: 100[Hz] 加振時の PES 信号フーリエ変換特性

実験中は、サンプリングタイム毎に  $PES$  信号と加速度信号、既存のフィードバック入力  $v_{cm}$  と本論文で提案するフィードフォワード入力  $u_{FF}$  が磁気ディスク装置、制御用 PC 間でやり取りされる。またフィードバック制御器として、PID 制御器を用いた。これら全ての演算はサンプリングタイム 158[ $\mu$ s] 内に実行される。

また、外乱オブザーバ内で用いるローパスフィルタのカットオフ周波数は 500[Hz] とし、同定パラメータ  $\hat{\theta}(k)$  の次元は  $N_a = N_b = 4$  とした。

### 3.2 実験結果

図 7 ~ 12 に単一周波数外乱に対する外乱抑圧実験の結果を示す。図 7、9、11 に 60[Hz]、100[Hz]、300[Hz] の周波数成分の外乱 (2.0[G]) を加えたときの  $PES$  信号時系列を示す。実験では 0[ms] ~ 500[ms] 間は既存のフィードバック制御器のみによって制御を行い、500[ms] ~ 2000[ms] 間は本論文で提案するフィードフォワード入力を含む制御器により制御している。さらに、 $PES$  信号のフーリエ変換の周波数特性を各周波数外乱に対して、図 8、10、12 に示す。以下に各周波数毎の外乱抑圧性能について考察を行う。

#### 1. 低周波数外乱に対する抑圧性能 (~ 80[Hz])

図 7、8 に 60[Hz] の振動外乱に対する実験結果を示す。低周波数外乱に対しては、既存のフィード

バック制御器は十分に振動外乱を抑圧している。ただし、提案手法を適用することによって、フィードフォワード入力ありの場合はフィードフォワード入力なしの場合と比較して、既存のフィードバック制御器の性能を害することなく、さらに振動外乱が抑圧されている (図 8)。

2. 中周波数外乱に対する抑圧性能 (90[Hz] ~ 200[Hz])  
図 9、10 に 100[Hz] の振動外乱に対する実験結果を示す。中周波数外乱に対しては、既存のフィードバック制御器は十分に振動外乱を抑圧できていない。これは外乱の周波数が既存のフィードバック制御器の外乱抑圧帯域を越えてしまっているためである。それに対して、提案手法を適用した後では、中周波数帯域の振動外乱は顕著に抑圧されている (図 10)。

#### 3. 高周波数外乱に対する抑圧性能 (300[Hz] ~ )

図 11、12 に 300[Hz] の振動外乱に対する実験結果を示す。高周波数外乱に対しては、外乱の周波数が既存のフィードバック制御器の制御帯域を越えているのに関わらず、外乱の影響は強く表れない。これは外乱と  $PES$  間の伝達関数が高周波帯域で比較的低ゲインになっているために、高周波な外部外乱が大きな悪影響を及ぼさないためだと考えられる。しかし、提案手法を適用することによって、高周波帯域の振動外乱はさらに減少している (図 12)。

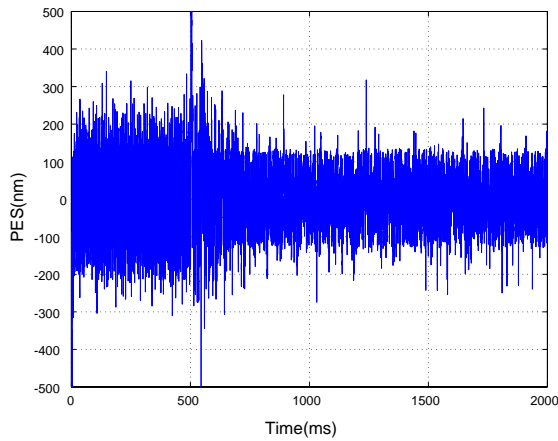


図 11: 300[Hz] 外乱加振時の PES 信号時系列

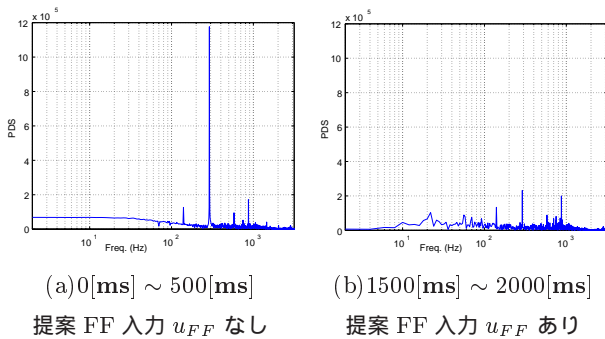


図 12: 300[Hz] 加振時の PES 信号フーリエ変換特性

図 13 に各周波数外乱を与えた際の PES の  $3\sigma$  を表す。  $3\sigma$  は統計的に起こりうる最大の誤差を表している。図 13 中、2.0[G] 等は外部外乱の加速度の振幅を意味する。提案手法を用いる場合と提案手法を用いない場合を比較すると、提案するフィードフォワードコントローラを用いた方が既存のフィードバックコントローラでは抑圧できない外乱を顕著に抑圧できていることが理解される。また、全周波数帯に渡り、外部振動が抑圧されていることが理解できる。

#### 4 結論

本論文では、外部外乱を抑圧するフィードフォワード制御器の設計方法を提案した。これは、磁気ディスク装置のヘッド位置決め制御において加速度センサからの伝達特性を同定することを基本としている。この方法では、外乱オブザーバを用いることによって、加速度センサからシステムに加わる外乱までの伝達特性を同定し、フィードフォワード入力を設計している。本手法を適用した実験では、PES 信号は加振時であってもフィードフォワード入力によって抑圧され、特に既存のフィードバック制御器では十分に抑圧することができない 90[Hz] ~ 200[Hz] の中周波数外乱に対して顕著に抑圧することに成功した。最近では、磁気ディスク装置はコンピュータだけでなく、様々な機器に搭載されることも検討され、今後も多くの場面で使用されることが考えられる。した

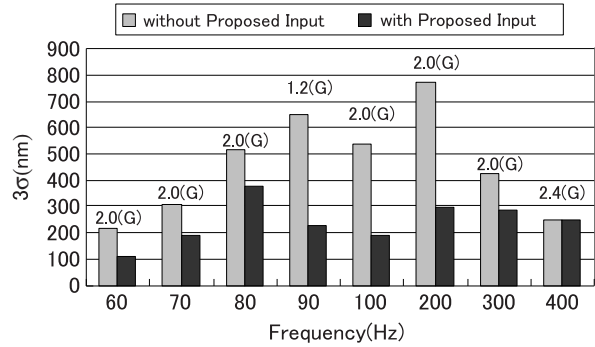


図 13: 提案手法と従来手法の PES 信号  $3\sigma$  による比較

がって、今後も磁気ディスク装置ヘッド位置決め制御系の研究は重要な研究課題として挙げられる。

#### 5 謝辞

本研究を進めるにあたり、実験機器の貸し出しをはじめ、多くの有益な御助言を頂いた (株) 東芝の鈴木 博氏、柳原 茂樹氏、谷津 正英氏、岩代 雅文氏、佐渡 秀夫氏に対し、ここに記して感謝申し上げます。

#### 参考文献

- [1] Ho Seong Lee: "Controller Optimization for Minimum Position Error Signals of Hard Disk drives", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 48, No. 5, 2001.
- [2] Jun Ishikawa, Masayoshi Tomizuka: "Pivot Friction Compensation Using an Accelerometer and Disturbance Observer for Hard Disk Drives", *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 3, No. 3, 1998.
- [3] Akihide Jinzenji, Tatsuro Sasamoto, Koichi Aikawa, Susumu Yoshida, Kenji Aruga: "Acceleration Feedforward Control Against Rotational Disturbance in Hard Disk Drives", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 37, No. 2, 2001.
- [4] Matthew T. White, Masayoshi Tomizuka: "Increased Disturbance Rejection in Magnetic Disk Drives by Acceleration Feedforward Control", *Proceedings of the 13th IFAC*, San Francisco, USA, 1996.
- [5] Satinderpall Pannu, Roberto Horowitz: "Accelerometer Feedforward Servo for Disk Drives", *Proceedings AIM'97*, Tokyo, Japan, 1997.
- [6] Sang-Eun Beak, Seung-Hi Lee: "Vibration Rejection Control for Disk Drives by Acceleration Feedforward Control", *Proceedings of the 38th Conference on Decision and Control*, Phenix, Arizona USA, 1999.
- [7] Takaji Umeno, Tomoaki Kaneko, Yoichi Hori: "Robust Servosystem Design with Two Degrees of Freedom and its Application to Novel Motion Control of Robust Manipulators", *IEEE Trans. on IE*, Vol. 40, No. 5, pp. 473-485, 1993.