

学術論文

ハードディスク用マイクロアクチュエータのセルフセンシング制御

A Self-Sensing Control of Micro-Actuator for Hard Disk Drives

山田 博行^{*1}(学生員), 佐々木 実^{*2}(正員), 南 潤水^{*3}

Hiroyuki YAMADA (Stu. Mem.), Minoru SASAKI (Mem.), Yoonsu NAM

In this paper, self-sensing control of micro-actuators for hard disk drives is presented. The micro-actuators used in this paper are a suspension drive type and a slider drive type. The micro-actuator of the slider drive type is PZT (Lead Zirconate Titanate) - based piezoelectric ceramics, installed on the magnetic head assembly. The micro-actuator of the suspension drive type is using PZT actuator pair, installed on the assembly of the suspension. The self-sensing performance of the installing position is compared and evaluated. Feedback control results of direct velocity feedback and positive position feedback are presented. The objective of the experiments is to verify the feasibility of these self-sensing approaches as a vibration suppression control on micro-actuator.

Keywords: Micro-actuator, hard disk drives, self-sensing, direct velocity feedback, positive position feedback.

1 緒言

マイクロアクチュエータは次世代ハードディスクドライブ (HDD) において高速・高精度ヘッド位置決めを達成させるための重要な技術である。現在の HDD はボイスコイルモータ (VCM) のみによって駆動され、目標データトラック上まで位置決めを行っている。トラッキング機構系の高共振化はハードディスクドライブの高精度ヘッド位置決めへの要求される代表的な性能の1つであり、その性能改善は VCM のみでは限界に来ている。この問題を解決するアプローチとして、従来の VCM 先端に広帯域なマイクロアクチュエータを配置し、粗動動作は従来の VCM が担当し、微動動作はマイクロアクチュエータが担当し、協調制御を行うことで高速・高精度ヘッド位置決めを実現する2ステージ機構系が提案されている。この2ステージ機構系はサーボ帯域拡大とトラック追従精度向上を図る手段として有効であり、面記録密度の増加に貢献するものと考えられている。このマイクロアクチュエータは搭載位置により、サスペンション駆動型、スライダ駆動型、ヘッド駆動型に分類され、実用化に向けて現在研究が進んでいる。

次世代 HDD 用マイクロアクチュエータとして注目されている圧電材料は、外部から力を加えられ歪むことによりその電極間に電圧を発生する圧電効果という

特性を持ち、加速度計、圧力計などのセンサとして応用されている外、逆に電圧を加えることによって歪みを生ずる逆圧電効果という特性も併せ持ち、アクチュエータとしても利用されている。圧電材料はこれらの可逆な特性に加え、他の材料と比較して広帯域、機械的にシンプルであるなどの多くの魅力的な特性を持つことによりセンサ・アクチュエータ材料として広範囲で使用されている。また近年、圧電材料の圧電・逆圧電特性のアクチュエーションとセンシングメカニズムを同時に行うセルフセンシングアクチュエーション法が提案され様々な研究がなされてきている[1]。セルフセンシングを用いた共配置制御は構造の閉ループ系の安定に対して多くの有利な点を持っており、同時にセルフセンシングアクチュエータは単一のセンサと比べ多くの優れた特性を持ち、外部センサが不要なため、システムの簡素化・コスト削減などが実現できるものと期待されている。

PZT 駆動サスペンション2ステージサーボシステムによる HDD 性能改善に関する研究は、Y. Li ら[2]により1対のPZT素子マイクロアクチュエータの一方をアクチュエータとして使い、もう一方を振動センサとして用いアクティブ振動制御する方法が提案されているが、従来の1対のアクチュエータの半分をセンサとして使用するため出力が半分になり効率的な方法とはいえない。これに対して本論文では、同一のマイクロアクチュエータをセンサとして使用するセルフセンシング法をアクティブ振動制御に適用する。マイクロアクチュエータはスライダ駆動型とサスペンション駆動型

連絡先: 佐々木 実, 〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1,

岐阜大学工学部人間情報システム工学科,

e-mail: sasaki@cc.gifu-u.ac.jp

^{*1}岐阜大学大学院 ^{*2}岐阜大学 ^{*3}江原大学校

を用いる。スライダやサスペンションを含めたマイクロアクチュエータアセンブリ全体を制御対象として、マイクロアクチュエータの搭載位置の違いによるセルフセンシング特性を実験より評価する。具体的には、ブリッジ回路を用いたセルフセンシングアクチュエータを構成し、マイクロアクチュエータのひずみ速度もしくはひずみを取得する。次にセルフセンシングフィードバック制御系を構築し、直接速度フィードバック DVF(Direct Velocity Feedback)および正帰還位置フィードバック PPF(Positive Position Feedback)を行い[3,4],セルフセンシングアクチュエーションを用いた HDD 用マイクロアクチュエータのアクティブ振動制御への実現可能性について検討する。

2 マイクロアクチュエータデザイン

マイクロアクチュエータは搭載位置によりいくつかの種類があり、その特徴およびセルフセンシング適用への技術課題も異なる。ここでは本論文で取り扱う2種類のマイクロアクチュエータの特徴について述べる。

2.1 スライダ駆動型

Fig. 1 に示すように、スライダ駆動型マイクロアクチュエータは積層型 PZT 素子で構成され、スライダとサスペンション間に搭載されている[5]。ヘッドアセンブリは、マイクロアクチュエータの他に磁気変換素子を持ったヘッド/スライダ、これを保持するジンバル、サスペンションなどから構成されている。このタイプはマイクロアクチュエータの共振特性が比較的高周波に存在し、サーボ帯域拡大に有利である。しかしながらこのタイプを用いたセルフセンシングではマイクロアクチュエータとサスペンションの剛性の違いによりアクチュエータより根元側のサスペンション動特性がセルフセンシングによって測定できない可能性がある。

2.2 サスペンション駆動型

Fig. 2 に示すように、サスペンション駆動型マイクロアクチュエータは2枚の PZT 素子から構成され、サスペンション根元付近に搭載されている[6]。サスペンションアセンブリは、マイクロアクチュエータの他にベースプレート、サスペンション、スライダなどから構成されている。生産性、信頼性および大変位発生に優れており、製品化に最も近いタイプである。このタイプをセルフセンシングアクチュエータとして用い

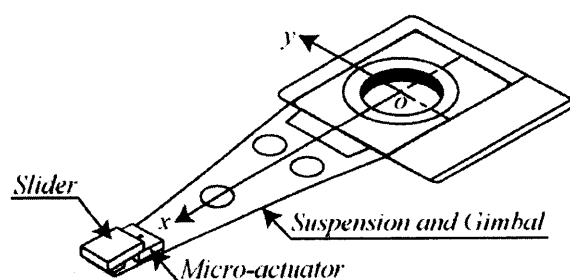


Fig. 1 Head gimbal assembly.

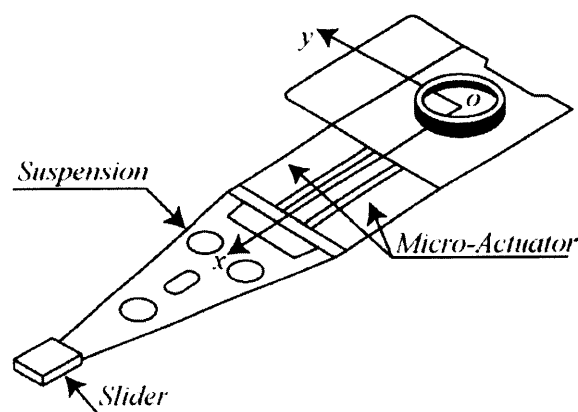


Fig. 2 Suspension assembly.

た場合、マイクロアクチュエータより先端にあるサスペンションおよびスライダ動特性がセルフセンシングによって測定可能であるものと考えられている。

3 セルフセンシングアクチュエーション

マイクロアクチュエータをひずみによる電圧源 $v_p(t)$ とコンデンサ C_p の等価回路とし、これを一要素とするブリッジ回路を構成することにより印加電圧と圧電電圧 $v_p(t)$ が混在する信号を分離し、セルフセンシングアクチュエータを実現する。ブリッジ回路要素に抵抗もしくはコンデンサを挿入することにより RC もしくは CC ブリッジ回路が構成でき、それぞれひずみ速度とひずみに比例した電圧が取得できる。

3.1 RC ブリッジ回路

Fig. 3 にマイクロアクチュエータを一要素とする RC ブリッジ回路を示す。参照キャパシタを C_r とし、ブリッジ回路右側要素に抵抗 R_1, R_2 を挿入する。ブリッジ回路からの出力電圧 $v_s(t)$ は、回路平衡条件 $C_p R_1 = C_r R_2$ より

$$v_s = C_p R_1 \dot{v}_p \quad (\omega \ll 1/C_p R_1) \quad (1)$$

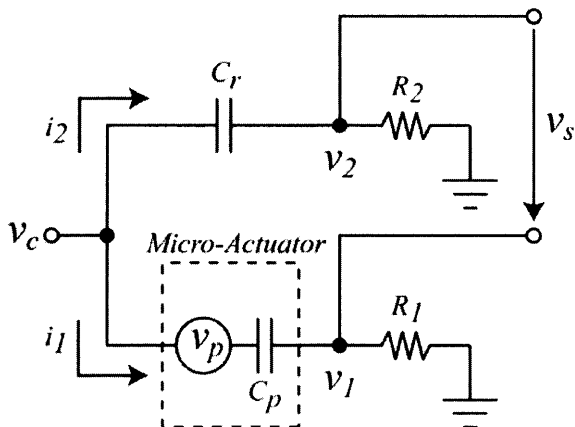


Fig. 3 Self-sensing actuator using RC bridge circuit.

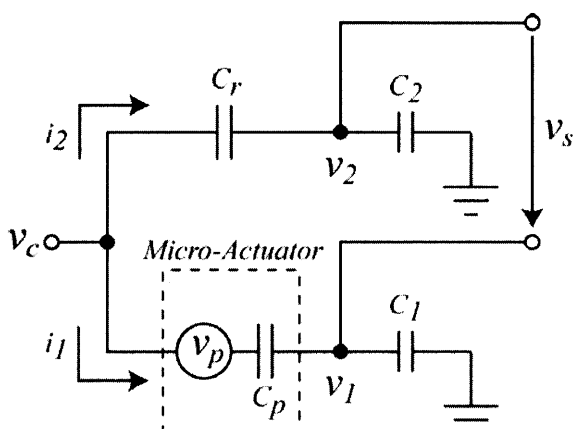


Fig. 4 Self-sensing actuator using CC bridge circuit.

となり、ひずみ速度に比例した電圧が取得できる。以下式(1)をRCブリッジ回路のセンサ出力と呼ぶ。使用する帯域を考慮してブリッジ回路のカットオフ周波数 ($\omega_c = 1/C_p R_1$) を設定する必要がある。

3.2 CCブリッジ回路

Fig. 4にマイクロアクチュエータを一要素とするCCブリッジ回路を示す。参照キャパシタを C_r とし、ブリッジ回路右側要素にコンデンサ C_1, C_2 を挿入する。CCブリッジ回路からの出力電圧 $v_s(t)$ は、回路平衡条件 $C_p C_2 = C_r C_1$ より

$$v_s = \frac{C_p}{C_p + C_1} v_p \quad (2)$$

となり、ひずみに比例した電圧が取得できる。以下式(2)をCCブリッジ回路のセンサ出力と呼ぶ。CCブリッジ回路を実際に構成する場合、DCドリフトを防ぐ目的でFig. 4中のコンデンサ C_1, C_2 に並列に抵抗を挿入する場合があるが、この場合、ブリッジ回路のカッ

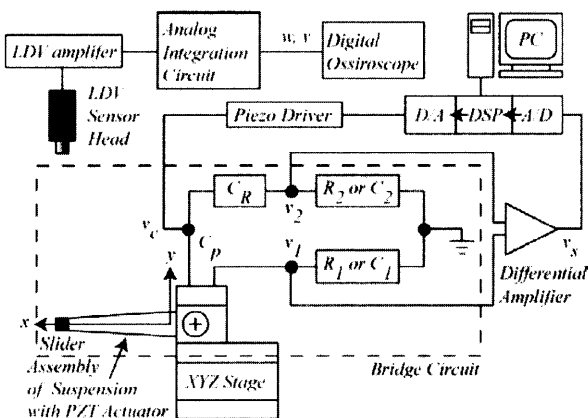


Fig. 5 Experimental system.

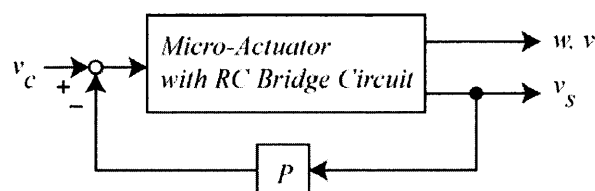


Fig. 6 Block diagram of the DVF control system.

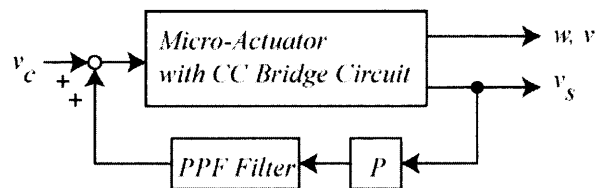


Fig. 7 Block diagram of the PPF control system.

トオフ周波数を考慮して抵抗値を選定する必要がある。

4 フィードバック制御実験

4.1 実験装置

本論文では、マイクロアクチュエータに電圧を入力し駆動させ、スライダ先端y方向変位の振動制御を行う。またマイクロアクチュエータを含むアセンブリ単体で実験を行っており、回転する磁気ディスク上またはスピンドル上では実験を行っていない。したがって、ディスク回転によって発生するヘッド先端の空気バネ特性による剛性増加は考慮していないことになる。

Fig. 5に実験装置概略図を示す。ブリッジ回路への制御入力電圧 v_c は、DSPによって計算され、サンプリングタイム 0.01msecでD/A変換器を通してピエゾドライバで増幅されブリッジ回路へ入力される。セン

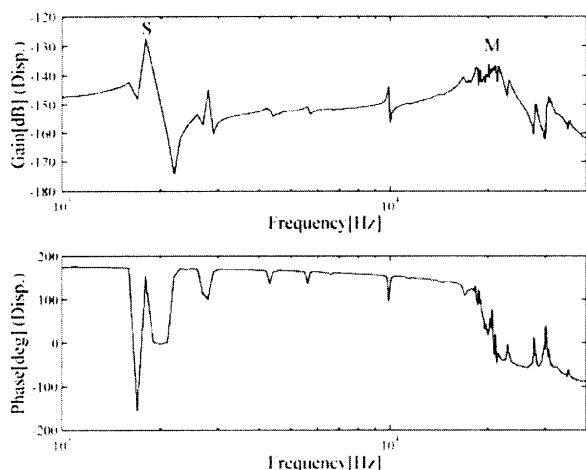


Fig. 8 Frequency response of the displacement.

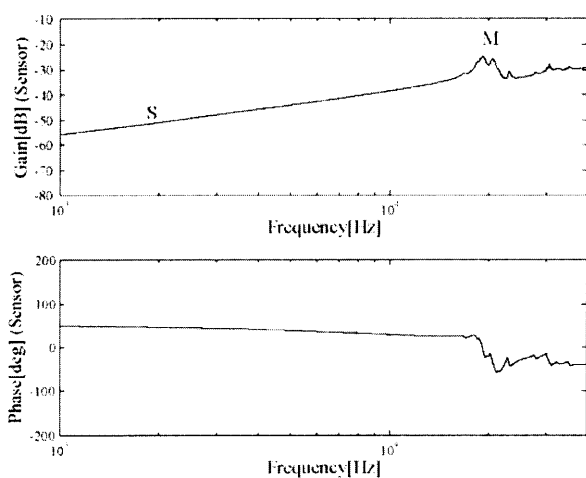


Fig. 9 Frequency response of the strain rate sensor.

サ出力 v_s は A/D 変換器を通して DSP 内で処理され、制御信号を出力する。スライダ先端の y 方向変位・速度はレーザドップラ振動計 (LDV) を用いて測定しモニタリングする。この LDV の復調する信号は基本的に速度量となり、速度量として復調された電気信号をアナログ微積分回路に通す事によって、変位量・加速度量に変換している。したがって以下に示す変位測定結果は正確ではない可能性があることに注意する必要がある。

4.2 フィードバック制御システム

Fig. 6 に DVF 制御システムのブロック線図を示す。このシステムは、セルフセンシングアクチュエーションによって式(1)で与えられる RC ブリッジ回路のセンサ出力を用いる事によって実現する。この制御手法は Low Authority Control なため、アクチュエータダイナミ

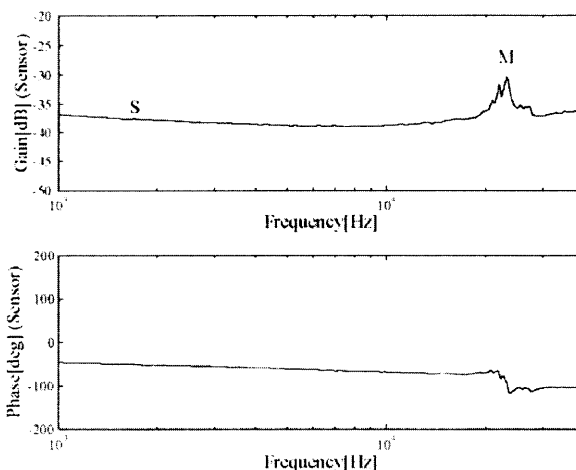


Fig. 10 Frequency response of the strain sensor.

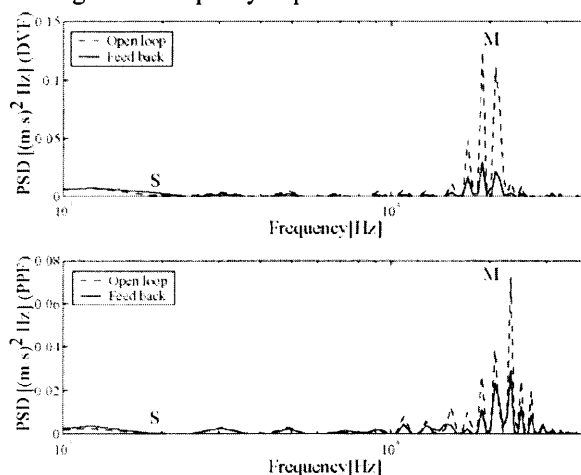


Fig. 11 Power spectral density of the DVF and PPF.

ックスが不要なため無条件で安定性が保証される。

Fig. 7 は PPF 制御システムのブロック線図である。このシステムは、セルフセンシングアクチュエーションによって式(2)によって与えられる CC ブリッジ回路のセンサ出力を用いる事によって実現する。PPF フィルタとして以下に示すような 2 次フィルタを用いる。

$$PPF \text{ filter} = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} \quad (3)$$

5 スライダ駆動型の実験結果

5.1 周波数応答特性

Fig. 8-10 にそれぞれマイクロアクチュエータ入力電圧からスライダ先端 y 方向変位, RC ブリッジ回路のセンサ出力, CC ブリッジ回路のセンサ出力の周波数応答を示す。Fig. 8 より主要なモードとして、サスペ

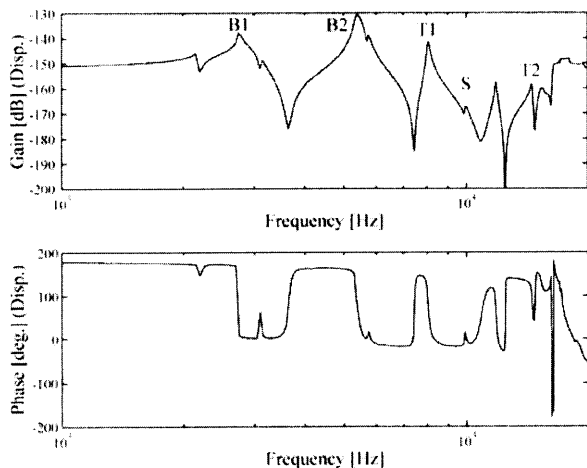


Fig. 12 Frequency response of the displacement.

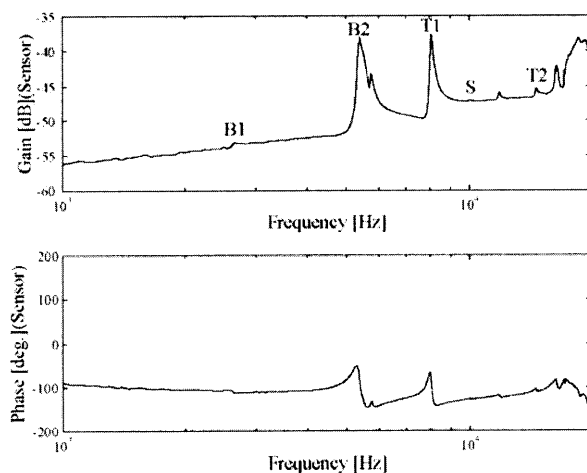


Fig. 13 Frequency response of the strain rate sensor.

ンションモード S(1.8 kHz), マイクロアクチュエータ 1 次モード M(20.1kHz)が確認できる。しかしながら Fig. 9, 10 のセンサ出力にはサスペンションモードが観測されない。マイクロアクチュエータとサスペンションの剛性の違いにより、サスペンションの振動によるアクチュエータのひずみが生じないためサスペンションの動特性が観測できないものと考えられる。

5.2 セルフセンシングアクチュエーション

Fig. 6, 7 に示すようなフィードバック制御系を構成し、2 種類のセンサ出力を用いてアクティブ振動制御を行う。PPF はセンサ出力で測定できるマイクロアクチュエータモードのみを制御するため、PPF フィルタとしてカットオフ周波数 $f_M = 30 \text{ kHz}$, 減衰比 $\zeta_M = 1$ とする 2 次フィルタを構成する。Fig. 11 にそれぞれ DVF と PPF を行った場合の LDV 出力 (スライダ先端 y 方

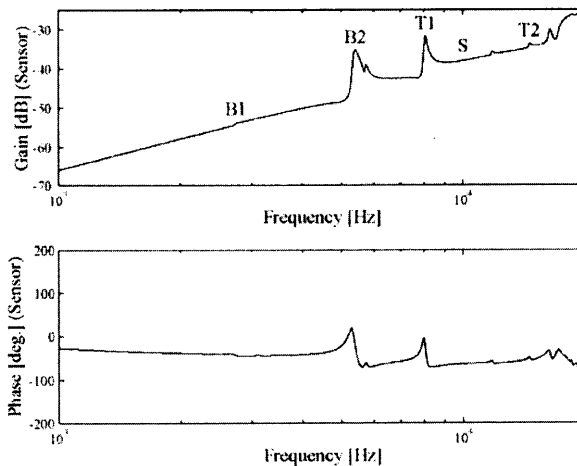


Fig. 14 Frequency response of the strain sensor.

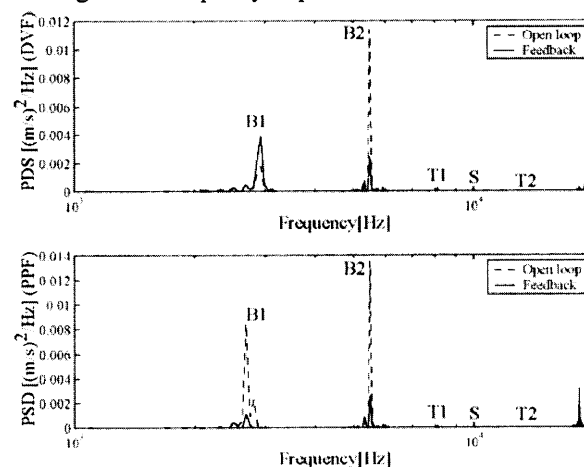


Fig. 15 Power spectral density of the DVF and PPF.

向速度) のパワースペクトル密度 (PSD) を示す。破線が制御前のオープンループ結果, 実線がフィードバック制御後の結果を示す。DVF, PPF 共にセルフセンシングによってマイクロアクチュエータモードを減衰させることが出来ることが分かる。しかしながら, センサ出力として観測できないサスペンションモードに関しては制御できないことが確認できる。この場合, サスペンション振動モード抑制のための対策が必要であるが, 山田ら[7]は逆動力学によりアクチュエータへの入力信号からサスペンション励振成分を除去する方法によりサスペンション振動問題を回避する方法を提案している。

6 サスペンション駆動型の実験結果

6.1 周波数応答特性

サスペンション駆動型マイクロアクチュエータを駆動した場合のマイクロアクチュエータ入力電圧から

スライダ変位, RCブリッジ回路のセンサ出力, CCブリッジ回路のセンサ出力の周波数応答結果を Fig. 12-14 に示す。Fig. 12 よりこのタイプの主要なモードとして, サスペンションの曲げ 1 次モード B1 (2.7 kHz), 曲げ 2 次モード B2 (5.4 kHz), ねじり 1 次モード T1 (8.1 kHz), ねじり 2 次モード T2 (14.6 kHz), マイクロアクチュエータの Sway モード S (10.0 kHz) が確認できる。ここで Sway モード以外の振動モードは, マイクロアクチュエータの駆動によって励起されたサスペンションの振動モードであり, サスペンションは回転する磁気ディスク上での負圧による空気バネ特性を考慮に入れて設計してあるため, 回転する磁気ディスク (スピンドル) 上でこの実験を行えば, これらのモードは現れずに Sway モードのみ観測されるものと考えられる [6]。Fig. 13, 14 のセンサ出力では B2, T1 モード以外のモードの感度が低い。このような現象は Y. Li ら [2] の論文でも報告されている。この理由として, サスペンションに搭載されているマイクロアクチュエータはサスペンションアセンブリに搭載された状態で設計されており, この搭載位置ではマイクロアクチュエータ根元および先端のたわみ角の状態によりサスペンション振動のセンシング, 特に曲げモード観測には適当な位置ではないものと考えられる。しかしながら, 本研究結果では文献 [2] ではあまり観測されていないスライダがトラックを外れる方向に動くねじれモードに関しての感度が比較的良く, トラックから外れる方向に動きにくい曲げモードに関しての実際の振動制御への影響は少ないものと考えられる。文献 [2] でも指摘されているが, セルフセンシングを実用化する場合にアクチュエーション・センシング両面より最適な搭載位置を再設計する必要があるものと考えられる。

6.2 セルフセンシングアクチュエーション

実験の目的は, Fig. 6, 7 に示すようなフィードバック制御系を構成し, 2 種類のセンサ出力を用いて振動をアクティブ制御する事である。PPF はセンサ出力で測定できる B2 モード, T1 モードを制御するため, PPF フィルタとしてそれぞれカットオフ周波数 $f_{B2} = 7.0$ kHz, $f_{T1} = 10.5$ kHz, 減衰比 $\zeta_{B2} = 0.2$, $\zeta_{T1} = 0.2$ とする 2 次フィルタで構成した。Fig. 15 に DVF と PPF を行った場合の LDV 出力 (スライダ先端 y 方向速度) のパワースペクトル密度 (PSD) を示す。破線が制御前のオープンループ結果, 実線がフィードバック制御後のアクティブダンピング結果を示す。DVF の結果は,

B2, T1 モードに対して効果を与えることができる事を示している。PPF の結果においては, B2, T1 モード以外にセンサ出力にわずかに観測できたサスペンション曲げ 1 次モードも減衰させる事を示している。PPF フィルタの効果があるものと考えられる。

7 結言

本論文では, 2 ステージ HDD 用マイクロアクチュエータのアクティブ振動制御問題に対してセルフセンシングアクチュエーション法の適用可能性について基礎検討を行った。セルフセンシングアクチュエータによるひずみ速度, ひずみの 2 種類のセンサ出力としてサスペンション振動モードのいくつかを観測する事ができた。これらのセンサ出力を用いて DVF, PPF 制御を行い, 特定の振動モードをアクティブ振動制御できることが確認できた。これらの結果から今後様々な制御手法への応用の可能性が考えられる。セルフセンシングアクチュエーションは次世代 2 ステージ HDD の実現に必要不可欠な方法として提案できるものと考えられる。今後, 実用化に向けての課題として, より正確なセンサ出力の獲得法, マイクロアクチュエータ最適搭載位置を含めた設計法の再検討などが必要である。

(2004 年 3 月 27 日受付, 2005 年 1 月 27 日再受付,
2005 年 3 月 28 日再々受付)

参考文献

- [1] 佐々木, 山田, 堀, セルフセンシング圧電アクチュエータの位置・力制御, 第 11 回 MAGDA コンファレンス論文集, pp.33-40, 2002.
- [2] Y. Li, R. Horowitz and R. Evans, Vibration control of a PZT actuated suspension dual-stage servo system using PZT sensor, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.39, No.2, 2003.
- [3] 佐々木, 山田, 堀, セルフセンシング圧電素子アクチュエータの力制御, 日本 AEM 学会誌, Vol.9, No.3, pp.358-363, 2001.
- [4] J. L. Fanson and T. K. Caughey, Positive position feedback control for large space structures, 28th AIAA/ASME/ASCE/AHS structures structural dynamics and materials conf., AIAA-87-0902, pp.588-598, 1987.
- [5] Y. Soeno, S. Ichikawa, T. Tsuna, T. Sato, and I. Sato, Piezoelectric piggy-back microactuator for hard disk drive, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.35, No.2, pp.983-987, 1999.
- [6] M. Tokuyama, T. Shimizu, H. Masuda, S. Nakamura, M. Hanya, and O. Iriuchijima, Development of a Φ -shaped actuated suspension for 100-kTPI hard disk drives, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.37, No.4, pp.1884-1886, 2001.
- [7] H. Yamada, M. Sasaki, Y. Nam, Control of a micro-actuator for hard disk drives using self-sensing, *Proc. ICMIT*, pp. 496-501, 2003.