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

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 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 を発生す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 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ッ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]。ヘッドアッセ 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 ションアッセンブリは、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





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*, 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*₂ より

$$v_s = C_p R_l v_p \ (\ \omega << l / C_p R_l \) \tag{1}$$



日本AEM学会誌 Vol. 13, No. 2 (2005)

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, 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

$$v_s = \frac{C_p}{C_p + C_1} v_p \tag{2}$$

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 C₁, C₂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ッセン ブリ単体で実験を行っており、回転する磁気ディスク 上またはスピンスタンド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. 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. 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。

$$PPF \ filter = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}$$
(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

(53)



日本AEM学会誌 Vol. 13, No. 2 (2005)

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 kHz, 減衰比ζ_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. 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版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 ンスタンド)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 サスペンションアッ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はア 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 ζ_{B2} = 0.2、 ζ_{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.