203 HDD における 2 ステージ系の制御システム構成の違いによる制御性能の比較

Comparison of Feedback controllers for a Dual-Stage Hard Disk Drive

○学 松井 通 (岐阜大学)

正 佐々木 実 (岐阜大学)

Tohru MATSUI, Gifu University, Yanagido1-1, Gifu-shi, Gifu

Minoru SASAKI, Gifu University

This paper discusses four track-following controller designs for a dual stage hard disk drive system with a slider based piezoelectric micro-actuator. The use of dual stage actuator in hard disk drive system has become a means of achieving increased servo actuator bandwidth. LQG regulator is applied to the compensator design of a dual stage hard disk drive. This paper is described and compared four control system architectures (Parallel loop, Master-Slave, Master-Slave with De-coupling, Dual feedback) for a dual stage hard disk drive system. Numerical simulations in both frequency and time domains show performance improvements of the dual stage hard disk drive system over the conventional single stage hard disk drive system.

Key Words: Dual Stage HDD, LQG regulator, Control system architectures, Parallel loop, Master-Slave, Dual feedback, Master-Slave with De-coupling

1. はじめに

磁気ディスク装置の大容量化、高性能化に対応するためには、より一層の位置決め精度の向上及び位置決め時間の短縮が必要である。しかし、磁気ディスク装置には、位置決め性能、追従性能に悪影響を与える様々な外乱が存在する。それらを抑圧するには、高精度位置決め機構を実現し、制御系のサーボ帯域を拡大することが有効であり、また、高周波数域まで感度関数を小さくすることが有効である。しかし、従来のボイスコイルモータ(VCM)のみで位置決めを行うシングルステージ系では、これらの仕様を満たすのは限界があり、困難であると思われる。そこで、本研究においては、マイクロアクチュエータ(MA)を微動アクチュエータとし、VCMを粗動アクチュエータとした2ステージアクセスサーボ機構系を構成し、状態量を推定してなおかつ外乱を考慮に入れて外乱抑圧性を高め、さらに Following 制御に評価関数を用いて最適化することのできる LQG 制御理論を適用して、4 種類の 2 ステージ系の制御システム構成を取り上げ、制御性能について比較・検討する。

2. 制御システムモデルの構成

高速・高精度な位置決め制御を実現するために、平行型(Parallel loop)、マスタースレーブ型(Master-Slave loop)、デュアルフィードバック型(Dual feedback loop)、非干渉マスタースレーブ型(Master-Slave with De-coupling)の4種類の制御システムモデルを構築し、それらの特性について示す。

平行型は、Fig1に示すようにVCMとマイクロアクチュエータを並列に接続し、各々の出力の和を目標位置にフィードバックす

るものである。この場合の閉ループ伝達関数と感度関数は(1), (2)式のようになる。

Fig. 1 Parallel Loop Control System

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_1 + G_2(s)}{1 + G_1(s) + G_2(s)} \quad (1)$$

$$G_{\text{sensitivity}}(s) = \frac{e(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + G_1(s) + G_2(s)} \quad (2)$$

マスタースレーブ型は、マイクロアクチュエータが目標に追従し、VCMは、マイクロアクチュエータが動作の限界を超えないように追従するもので、そのモデル図を Fig2 に示す。また、この場合の閉ループ伝達関数と感度関数は(3), (4)式のようになる。

Fig. 2 Master-Slave loop

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_2 + G_1(s) \cdot G_2(s)}{1 + G_2(s) + G_1(s) \cdot G_2(s)} \quad (3)$$

$$G_{sensitivity}(s) = \frac{e(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + G_2(s) + G_1(s) \cdot G_2(s)} \quad (4)$$

デュアルフィードバック型は、VCM が目標値に追従する一方、その偏差をマイクロアクチュエータによって補正させるものである。そのモデル図を Fig3 に示す。また、この場合の閉ループ伝達関数と感度関数は(5)、(6)式ようになる。

Fig. 3 Dual feedback loop

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_1 + G_2 + G_1(s) \cdot G_2(s)}{1 + G_1 + G_2(s) + G_1(s) \cdot G_2(s)} \quad (5)$$

$$G_{sensitivity}(s) = \frac{e(s)}{R(s)} = \frac{1}{\{1 + G_1(s)\} \{1 + G_2(s)\}} \quad (6)$$

非干渉マスタスレーブ型は、マスタスレーブ型にフィードフォワードが付け加えられたもので、これによって、完全に切り離して VCM とマイクロアクチュエータのコントローラを設計できる。そのモデル図を Fig4 に示す。また、この場合の閉ループ伝達関数と感度関数は(7)、(8)式ようになる。

Fig. 4 Master-Slave with Decoupling

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_1 + G_2 + G_1(s) \cdot G_2(s)}{1 + G_1 + G_2(s) + G_1(s) \cdot G_2(s)} \quad (7)$$

$$G_{sensitivity}(s) = \frac{e(s)}{R(s)} = \frac{1}{\{1 + G_1(s)\} \{1 + G_2(s)\}} \quad (8)$$

3 LQG 制御理論

LQG 制御問題は白色性ノイズを含む以下の制御システム

$$\dot{x} = Ax + Bu + \xi \quad (9)$$

$$y = Cx + Du + \eta \quad (10)$$

に対して、次の評価関数を最小にするような最適入力を求める問題である。ただし、 y は出力、 ξ および η は白色性ノイズである。白色性ノイズとは、ノイズとしてあらゆる周波数成分を含む不規則信号で、どの周波数に対してもそのパワーがおおよそ一定の大きさを示すノイズのことである。

$$J = E \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \{x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)\} dt \right] \quad (11)$$

LQG 制御問題を解くためには、以下の LQG 制御問題の仮定が成り立たなければならない。

A1 : (A, B) 可安定 (通常は可制御)

A2 : $R > 0$

A3 : $Q \geq 0$, $(Q^{1/2}, A)$ 可検出

A4 : (C, A) 可検出 (通常は可観測)

また、LQG 制御問題は、状態フィードバックとオブザーバゲインは別々に設計可能であるという分離定理により、LQ 制御問題と Kalman フィルタ問題に分けることができ、LQ 制御問題の解が

$$u = -Fx \quad (12)$$

と与えられ、また、カルマンフィルタ問題が

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu - H(y - C\hat{x}) \quad (13)$$

と与えられるとき、これらより LQG 制御問題で求まる制御器は

$$K(s) = F(sI + A + BF + HC)^{-1}H \quad (14)$$

となる。

Fig. 5 LQG Control System

4. 数値シミュレーション結果

第2世代型マイクロアクチュエータについて、LQG 制御理論を適用し、デジタルコントローラを設計し、4種類の2ステージ系制御システム構成の制御性能について比較・検討する。Fig6に数値シミュレーションに用いた第2世代型マイクロアクチュエータの構成を示す。

今回使用した VCM とマイクロアクチュエータは、Fig7, Fig8に示すような周波数特性のものを使用した。

Fig. 6 Architecture of Micro Actuator

Fig. 7 Bode diagram of VCM

Fig. 8 Bode diagram of Micro Actuator

各制御モデルについて LQG 制御理論をもちいて制御系を設計し、数値シミュレーションを行った。デジタルコントローラのサンプリング周期は $10[\mu\text{sec}]$ である。

平行型についての閉ループ周波数特性を Fig9 に示す。サーボ帯域は約 $1.9[\text{kHz}]$ である。感度関数特性を Fig10 に示す。ゼロクロス周波数は $9.2[\text{kHz}]$ 、低周波数域におけるゲインは $59.8[\text{dB}]$ である。 $1[\mu\text{m}]$ のステップ応答を Fig11 に示す。約 $1.3[\text{msec}]$ で収束している事が分かる。

Fig.9 Bode diagram of Parallel loop system

Fig.12 Bode diagram of Master-Slave loop system

Fig.10 Bode diagram of Parallel loop sensitivity function

Fig.13 Bode diagram of Master-Slave loop sensitivity function

Fig.11 Step response of Parallel loop system

Fig.14 Step response of Master-Slave loop system

マスタースレーブ型についての閉ループ周波数特性を Fig.12 に示す。サーボ帯域は約 1.8[kHz]である。感度関数特性を Fig.13 に示す。ゼロクロス周波数は 9.2[kHz]、低周波数域におけるゲインは 59.4[dB]である。1[μm]のステップ応答を Fig.14 に示す。約 1.3[msec]で収束している事が分かる。

デュアルフィードバック型についての閉ループ周波数特性を Fig.15 に示す。サーボ帯域は約 2.3[kHz]である。感度関数特性を Fig.16 に示す。ゼロクロス周波数は 2.2[kHz]、低周波数域におけるゲインは 79.9[dB]である。1[μm]のステップ応答を Fig.17 に示す。約 1.8[msec]で収束している事が分かる。

Fig.15 Bode diagram of Dual feedback loop system

Fig.18 Bode diagram of Master-Slave with De-coupling system

Fig.16 Bode diagram of Dual feedback loop sensitivity function

Fig.19 Bode diagram of Master-Slave with De-coupling sensitivity function

Fig.17 Step response of Dual feedback loop system

Fig.20 Step response of Master-Slave with De-coupling system

非干渉マスタースレーブ型についての閉ループ周波数特性を Fig.18 に示す。サーボ帯域は約 2.5kHz である。感度関数特性を Fig.19 に示す。ゼロクロス周波数は 2.0kHz, 低周波数域におけるゲインは 72.2[dB] である。1 μ m のステップ応答を Fig.20 に示す。約 2.0[msec] で収束している事が分かる。

4 種類の 2 ステージ制御系構成とシングルステージの閉ループ周波数特性, 感度特性, ステップ応答の結果を比較した表を Table 1 に示す。

Table 1 Control performance

	Closed-loop system		Sensitivity function			Step response	
	Servo Bandwidth	Peak gain	Low-Frequency gain	Frequency at 0[dB]	Peak gain	Over shoot	Settling time
Parallel loop	1.9[kHz]	7.5[dB]	-59.8[dB]	9.2[kHz]	10.0[dB]	0.23[μm]	1.3[msec]
Master-Slave	1.8[kHz]	9.0[dB]	-50.4[dB]	9.2[kHz]	11.3[dB]	0.23[μm]	1.3[msec]
Dual feedback loop	2.3[kHz]	8.4[dB]	-79.9[dB]	2.2[kHz]	10.8[dB]	0.32[μm]	1.8[msec]
Master-Slave with De-coupling	2.5[kHz]	9.0[dB]	-72.2[dB]	2.0[kHz]	11.2[dB]	0.38[μm]	2.0[msec]
Single Stage	2.3[kHz]	3.5[dB]	-48.6[dB]	0.7[kHz]	4.6[dB]	0.38[μm]	2.8[msec]

Table 2 Gain Margin and Phase Margin

	Gain Margin	Phase Margin
Parallel loop	3.2[dB]	29.6[deg]
Master-Slave loop	2.5[dB]	29.1[deg]
Dual feedback loop	18.1[dB]	78.1[deg]
Master-Slave with De-coupling	18.1[dB]	78.1[deg]
Single Stage	4.1[dB]	56.2[deg]

まとめ

4種類の2ステージ系の制御システム構成を取り上げ、これらのシステム構成の違いによる制御性能を比較するために、各制御系について数値シミュレーションを行った。

閉ループ周波数特性においては、ピークゲインの抑圧は平行型が最も優れているが、サーボ帯域を見ると、非干渉マスタースレーブ型が他のモデルに比べて高いサーボ帯域を実現できることが分かった。感度特性においては、ゼロクロス周波数は非干渉マスタースレーブ型、デュアルフィードバック型が他に比べて低く、速応性はかなり劣る。低周波数域のゲインは、非干渉マスタースレーブ型、デュアルフィードバック型は低く抑えられている。ステップ応答においては、平行型、マスタースレーブ型がオーバーシュートが抑えられ、整定時間も短く、目標位置に素早く収束し、速応性に優れている。これらのことを総合すると、他の構成に比較して平行型が良好な制御特性を示しているものと思われる。

参考文献

[1] Fan, L.-S., Ottesen H. H., Reiley, T. C. and Wood, R. W.; "Magnetic Recording Head Positioning at Very High Track Densities Using a Microactuator Based Two-stage Servo System," *IEEE Trans. on Magnetics*, No.42-3, pp.222-233, 1995.

[2] Koganezawa, S., Takaishi, K., Mizoshita, Y., Uematsu, Y., Yamada, T., Y., Yamada, T., Hasegawa, S. and Ueno, T.; "A Flexural Piggyback Milli-Actuator for over 5Gbit/in² Density Magnetic Recording," *IEEE Trans. on Magnetics*, No.32-5, pp.3908-3910, 1996.

[3] J.Y. Yen, K. Hallamasek, and R. Horowitz, "Track-Following Controller Design for a Compound Disk Drive Actuator," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.112, pp.391-402, 1990.

[4] T. Suzuki, M. Sasaki, F. Fujisawa, T. Usui, T. Yoshida, and H. Hirai, "Robust Track-Following Control of Dual Stage Hard Disk Drive using Mixed Sensitivity Problem," *Proc. of the 2nd Asian Control Conference*, Seoul, Korea, July 22-25, pp. III-239-242, 1997.

[5] T. Suzuki, T. Usui, M. Sasaki, F. Fujisawa, T. Yoshida, and H. Hirai, "Comparison of Robust Track-Following Control Systems for a Dual Stage Hard Disk Drive," *Adv. Info. Storage Syst.*, Vol.10, pp.101-118, 1999.

[6] T. Suzuki, K. Satoh, M. Sasaki, F. Fujisawa, K. Mori and O. Haruaki, "Robust Tracking-Following Control of Dual Stage Hard Disk Drive," *Third International Conference on Motion and Vibration Control*, pp.142-147, 1996.

[7] T. Mori, H. Munemoto, Y. Otsuki, and K. Akagi, "A Dual-Stage Magnetic Disk Drive Actuator using a Piezoelectric Device for a High Track Density," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.27, No.6, pp.5298-5300, 1991.

[8] K. Ito, T. Miura and M. Sasaki, "Track-Following Control of Dual Stage Hard Disk Drive," *Proceedings of 3rd IWAM*, pp.93-98, December, 1999.

[9] Y. Soeno, S. Ichikawa, T. Tsuna, T. Sato, and I. Sato, "Piezoelectric Piggy-Back Microactuator for Hard Disk Drive," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.35, No.2, pp.983-987, 1999.

[10] Lin, Guo., Douglas, Martin. and Don, Brunnet,; "Dual-stage Actuator servo Control for High Density Disk Drives", *Proc. of International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp.132-137, 1999.