203 ハイブリッド型 STW による RRO の低減

Reducing RRO by Hybrid-type STW for Hard Disk Drives.

○ 正 井上 貴博 (日立STR) 堀崎 誠 (日立STR) 瀬尾洋右 (日立STR) 山崎静男 (日立STR)

Takahiro Inoue, Makoto Horisaki, Yousuke Seo, Shizuo Yamazaki

Data Storage & Retrieval Systems Division, Hitachi, Ltd., 2880 Kozi, Odawara, Kanagawa, Japan

Accurate servo track writer (STW) is indispensable for hard disk drives (HDDs) with high track density. We have developed a prototype of the Hybrid-type STW, which consists of two writing stages. In the first stage, master patterns are written on one surface of the master disk prior to drive assembly. In the second stage, the master disk is assembled with several raw disks in a HDD, and the servo patterns are written on the disks on the basis of the master patterns. This paper describes the design of servo system for the Hybrid-type STW and experimental results using a 2.5 type HDD. One of our results is that in comparison with the conventional STW, the Hybrid-type STW can suppress low frequency vibrations of ball bearings and reduce the maximum value of repeatable runout (RRO).

Key Words: Hard Disk Drive, Servo Track Writer, Hybrid-type STW, H-infinity control

1. 緒言

近年、磁気ディスク装置 (HDD; Hard Disk Drive) では、小型化、高密度化、低コスト化が急速に進展し、最近では年率 100% 以上の高トラック密度化が行われている。このため、高トラック密度化に対応した HDD のサーボ信号品質と生産性向上に有利なサーボトラックライタ (STW; Servo Track Writer) の開発が重要となってきた。そこで、基準となる位置信号 (マスタパターン) を予め書き込んだマスタディスクを HDA (Head Disk Assembly) に組み込み、改めてサーボパターンをディスク上に記録する STW^{1,2)} (ハイブリッド型 STW) を検討した。本方式はマスタディスクに書き込まれたマスタパターンを基準としてヘッドを位置決めするため、スピンドル振動をサーボ系で圧縮して、STW することが可能となる。また、HDA に組み込んだ後、外部のレーザ測長系や、クリーンルーム内の作業が不要となるため、製造環境の制限が少なく有利である。

ハイブリッド型 STW の基本概念は文献 1), 2) にて発表されており、最適レギュレータを用いたハイブリッド型 STW 制御系の設計法が提案されている。本論文では、高精度にサーボパターンを記録するために H_{∞} 制御理論を用いて、ハイブリッド型 STW 制御系の感度関数の整形を行う。さらに、サーボパターンの書き込み精度を HDD フォロイング時に観測される位置誤差信号 (PES; Position Error Signal) の RRO (Repeatable Runout) により評価する。併せて従来 STW と比較を行い、本方式の特質を検討する。

2. ハイブリッド型 STW の概要

ハイブリッド型 STW によるサーボパターンの記録は、以下の 2 つの手順があり、

- ① マスタディスク作成段階
- ② サーボパターン記録段階

マスタディスク作成段階は、マスタ STW と呼ばれる専用の STW 装置により作成される。複数の未記録ディスクをマスタ STW に搭載してマスタパターンを同時記録し、マスタディスクを同時に多数枚作成する。この時、スピンドルモータによる非同期振

動が書き込まれないよう、エアスピンドルを用いて、高精度にマスタパターンを記録する。

次にサーボパターン記録段階では、図 1 に示すように、1 枚のマスタディスクを、サーボパターンの書かれてないディスクと共に HDA に搭載し、HDD の自身のヘッドにより、マスタパターンに追従 (マスタフォロイング) させ、すべてのディスク上にサーボパターンの記録を行う。

本方式では、サーボパターンの精度は、マスタフォロイング時の位置決め精度により決定される。そこで、マスタパターンのデータセクタ数を HDD の 4 倍としてサンプリング周波数を高めることにより、サンプルホールドの位相遅れを低減した。

マスタディスク搭載時に発生する数十 μm の偏芯は、HDD では同期振動成分となるため、サーボパターン記録段階で、偏芯を補正し、サーボパターンがスピンドルモータの回転中心とする同心円となるように記録した。この時、ヘッドはマスタパターンのトラックを横切りながら位置決めされるため、位置信号の非線形性により位置決め精度が劣化する。そこで、位置信号の非線形性に対しても、サーボパターン記録時に補正を行った。

Fig.1 Concept of the Hybrid-type STW.

3. マスタフォロイング制御系の設計

通常、HDDフォロイング制御系の相補感度関数のゲイン特性は、100Hzから1kHzで0dB以上、また、1kHz以上の帯域で、0dB以下となっている。つまり、記録されたサーボパターンに100～1kHzの振動成分が含まれている場合、HDDフォロイング制御系により、ヘッドの動きがかえって増幅される。しかし、1kHz以上の帯域で相補感度関数のゲインが0dB以下であるため、1kHz以上の振動成分に対しては、ヘッドは追従しない。すなわち、1kHz以下の振動成分を圧縮してサーボパターンを記録すれば、それ以上の周波数帯域での振動成分を若干増幅しても、全周波数帯域におけるヘッドの動きを低減できる。以上のことから、マスタフォロイング制御系の設計仕様を、次のように決定した。

＜マスタフォロイング系制御の設計仕様＞

- a) 感度関数のゲインを 1kHz 以下で 0dB 以下、かつ 100Hz 以下で -20dB 以下
- b) 高域の共振モードに対して安定 (5kHz 以上で、相補感度関数ゲインが -15dB 以下)

上記の a), b) はそれぞれ、感度関数 S 、相補感度関数 T に対する仕様で、図2において、感度関数重み関数 W_1 、相補感度関数重み関数 W_2 を与えて、外部入力 w から制御量 z_1, z_2 への伝達関数の無限大ノルムが 1 未満、すなわち、

$$\|W_1 S\|_{\infty} < 1 \quad \text{かつ} \quad \|W_2 T\|_{\infty} < 1 \quad (1)$$

を満足する補償器 C を求めることにより達成される。

ここで、 $S = (1 + PC)^{-1}$ 、 $T = (1 + PC)^{-1}PC$ 、 P : 制御対象

制御対象として動特性をモデル化すべき構成要素は、機構部として、図1に示したヘッド、サスペンション、キャリッジ、ボイスコイルモータ (VCM) であり、回路部としてパワーアンプやノッチフィルタがある。ここでは、制御対象 P を、機構部の2次特性と、回路部の遅れやプロセッサの演算時間遅れを近似したむだ時間要素でモデル化した。

$$P(s) = \frac{K\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} \frac{1 - 0.5Ls}{1 + 0.5Ls} \quad (2)$$

式(2)で K は機構系のゲイン、 ω は固有角周波数、 ζ は減衰係数、 L は遅れ時間である。

また、重み関数 W_1 、 W_2 は仕様 a), b) を満足するように決定した。図3に今回使用した重み関数 W_1 、 W_2 のゲイン特性を示す。

重み関数を含めた一般化プラントを求めると、

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 & -W_1 P \\ 0 & W_2 P \\ 1 & -P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (3)$$

となる。

式(1)を満足する補償器 C を求めることは、式(3)で、外部入力 w から制御量 $[z_1, z_2]$ への伝達関数の無限大ノルムを 1 未満にする補償器 C を求めることになる。

市販のパッケージソフトを用いて実際に計算すると、13 次の補

償器が得られた。得られた補償器を7次に低次元化してDSPに実装して実験を行った。図4にマスタフォロイング制御系の感度特性、相補感度関数の周波数特性を示す。得られた制御系は、感度関数のゲイン特性が 0dB 以下となる帯域が 800Hz 以下、1kHz においては約 1dB 程度振動を増幅する系となり、設計仕様 a), b) をほぼ満足する系となった。

Fig.2 Block diagram of the generalized plant.

Fig.3 Gain characteristic of weight function.

Fig.4 Frequency response of the sensitive function and the complementary sensitive function (experiment results).

4. 実験による評価

2.5 型 HDD に対し、ハイブリッド型 STW でサーボパターンを記録し、フォロイング時に観測される PES を評価した。比較のため、同一 HDD に対し、従来 STW でサーボパターンを記録した場合の PES の評価も行った。PES は観測可能な唯一の位置情報であり、この信号に基づいて記録禁止 (ライトフォールト) の条件が判断される。したがって、PES のピーク・トゥ・ピーク値を低減することが高トラック密度化にとって重要な課題の一つである。また、ヘッドの軌跡自体はトラックピッチ変動を抑える意味で重要となるので、PES からヘッドの軌跡を計算で求め、ハイブリッド型 STW と従来 STW による結果との比較も行った。

図5の a), b) にそれぞれハイブリッド型 STW でサーボパターンを記録した場合の PES の RRO (100 トラック分の最大、平均、最

小), 従来 STW での RRO を示す。従来 STW による結果には、図 5b) の①のように、PES の劣化 (玉軸受けの低周波振動等によりサーボパターンの書き始めと書き終わりでサーボパターンが不連続になるため³⁾) が見られる。(今回実験した従来 STW では、同一セクタからサーボパターンの記録を行ったので、同一個所で不連続点が発生する。) 一方、ハイブリッド型 STW では、このような PES の劣化は見られない。

しかし、ハイブリッド型 STW では、不連続部を除いた領域の RRO は若干劣化した。その主たる要因として、マスタパターンの書き込み精度が挙げられる。

Fig.5 RRO (max,mean,min)
a) by the Hybrid-type STW, b) by the conventional STW.

図 6 に PES をもとに計算で求めたヘッドの軌跡のスペクトルを示す。スペクトルの rms 値 ($\pm 3\sigma$) を比較すると、ハイブリッド型 STW では $0.155\mu\text{m}$ 、従来 STW では $0.228\mu\text{m}$ で、ハイブリッド型 STW は、ヘッドの動きを 30% 程度低減できている。また、スペクトル分布を比較すると、ハイブリッド型 STW による結果は 800Hz 以下の成分が低減されている。これは、ハイブリッド型 STW では HDD の玉軸受けや外部振動による低周波振動をサーボパターン記録時に圧縮できるためであると考えられる。

図 7 に計算で求めたトラックピッチを連続した 6 トラック分表示す。($0.2\mu\text{m}$ ずつ原点をずらして表示している。) 図 7 のように、ヘッドの動きの小さいハイブリッド型 STW は、トラックピッチ変動を改善でき、ハイブリッド型 STW は高トラック密度化に向けた STW 方式と言える。

5. 結言

ハイブリッド型 STW および従来 STW でサーボパターンを記録した HDD を作成し、PES の RRO とヘッドの軌跡を評価し、以下の結論を得た。

- (1) ハイブリッド型 STW はサーボパターンの書き始めと書き終わりの不連続量を低減でき、その結果、RRO のピーク・トゥ・ピーク値を低減できる。
- (2) ハイブリッド型 STW は HDD の玉軸受けや外部振動による低周波の振動成分を圧縮できるため、フォロイング時のヘッドの動きを低減できる。その結果、トラックピッチ変動を改善

できる。

6. 参考文献

- 1) H.Ono, "Architecture and performance of the ESPER-2 hard-disk drive servo writer", *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 37, No.1, (1993), 3-11.
- 2) K.Noda, M.Naoe, "Novel NRRO Minimization Algorithm for an Ultra-High-Density Servo Track Writer", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol.33, No.5, (1997), 2626-2628.
- 3) 山田 朋良, "磁気ディスク装置の位置信号書き込みにおける玉軸受振動の影響に関する考察", 日本機械学会年次大会講演論文集, V, (1999), 147-146.

Fig.6 Spectrum of the magnetic head's trajectory
a) by the Hybrid-type STW, b) by the conventional STW.

Fig.7 Head's trajectory
a) by the Hybrid-type STW, b) by the conventional STW.