動的オフセットをもつ磁気ディスク装置の精密シーク制御*

岡 村 栄 治^{*1}

Precision Seek Control of HDD with Dynamic Offset

Eiji OKAMURA

In recent hard disk drives with very narrow track pitch, the seek traveling distance must be expressed with a noninteger number of tracks, because the dynamic offset of each head tracking cannot be neglected. For realizing this noninteger-type seek operation, the repeated approximation method of seek distance is developed by assuming a controlled seek time. Further more, to obtain constant seek time, new high-order smoothing trajectories and a precision seek controller with seek distance correction are designed. The new trajectories have zero values of high-order differential coefficients at a seek-termination point for rapid settling and minimum vibration excitation. The proposed seek controller using a DSP contains a normalized trajectory generator, the seek distance calculator, scaling factor corrector using seek distance, and velocity feedback. The validity of this noninteger-type seek controller is confirmed experimentally.

Key Words: Magnetic Disk Drive, High Track Density, Seek Control, Positioning, DSP

1. ま え が き

これまでの磁気ディスク装置では、シーク距離はトラックを単位とする整数値で表された。近年の高密度装置ではトラックピッチは $8\mu\text{m}$ 以下になっており、熱オフセットや熱偏心等に起因するデータヘッド間のオフセット量($2\mu\text{m}$ 程度)を無視することができない。そのうえ、このオフセットは回転位置の関数であり、かつヘッドごとに異なる曲線を描くため、シリンドサ-ボやデータ面サ-ボ技術を用いてトラック追従制御を行うことが必須である。このような状況でシーク前後の動的オフセットを考慮し小数点以下までシーク距離を算出しようとする、シーク終了点の回転位置はシーク時間に依存し、シーク時間はシーク距離に依存するため逐次計算が必要となり、DSP等でこれを実現するのは困難であった。シークで移動する距離がわからなければシーク目標軌道を正確に設定することができず、シーク後の整定が悪化し、シークを高速に精度よく制御することはできない。

本稿では、まずシーク距離の算出はシーク時間を一定とすれば反復近似法により計算できることをシミュ

レーションで示す。次にシーク時間を制御するために新たに最適軌道設計法とシーク制御器を開発したのでこれを示す。この軌道はシーク後の制振性と整定性を考慮し、操作量が最小になるように最適化されている。また、シーク制御器はプラントがこの最適軌道に沿って移動するように移動時間を計算しながら制御を行うので、シーク時間を精確かつ安定に制御することができる。最後にDSPを用いて精密シーク制御器を実現し、制御性能を評価したので、その実験結果を合わせて報告する。

2. 高トラック密度における
シーク制御の問題点

ディスク面上の一点は円筒座標 (z, r, θ) で表現され、 z はヘッド番号(離散値)、 r はトラック単位、 θ はセクタ単位で表すことができる。また、以下ではサ-ボ面サ-ボの場合について考えるが、データ面サ-ボであっても特定のデータ面を基準にし、基準面との差に着目すれば同様に考えることができる。

サ-ボ面でのトラック追従誤差が十分に小さいとして、 R_1 トラックにおけるヘッド Z_1 面でのトラック追従値 r_1 は次式となる。

$$r_1 = R_1 + f(\theta_1, z_1) \dots\dots\dots (1)$$

* 原稿受付 平成5年12月20日。

*¹ 正員、富士通(株) (〒211 川崎市中原区上小田中1015)。

$$f(\theta, z) = \sum_{n=0}^{\infty} \{A_n(z) \cdot \cos(n \cdot \theta) + B_n(z) \cdot \sin(n \cdot \theta)\} \dots (2)$$

ここで、式(2)が動的オフセットを示しており、 A_0 は定常オフセット、 A_n と B_n は n 次回転成分の振幅と位相により決まる係数であり、ともにヘッド番号 z に依存する。

次に z_1 面 R_1 トラックから z_2 面 R_2 トラックへのシークを考える(図1)。このとき、シーク距離 L とシーク時間 T は、回転角速度を ω [rad/sec]として、

$$L = r_2 - r_1 \\ = (R_2 - R_1) + f(\{\theta_1 + \omega T, z_2\}) - f(\theta_1, z_1) \dots (3)$$

一方、シーク制御器においてシーク距離 L からシーク時間 T を的確に推定できるとすれば、

$$T = g(L) \dots (4)$$

したがって、 L と T は式(2)~(4)の連立式から解けるが、 L を陽に表すことはできない。

そこで、従来シークにおけるシークトラック数 L_0 を初期値として、反復近似法を用いて順次 $L_0, L_1, \dots, L_n, \dots$ と近似する。式(3)を式(4)に代入し、

図1 動的オフセットがある場合のシーク距離

図2 反復近似のシミュレーション

$$L_{n+1} = L_0 + f[\{\theta_1 + \omega \cdot g(L_n)\}, z_2] - f(\theta_1, z_1) \dots (5)$$

ただし、

$$L_0 = R_2 - R_1 \dots (6)$$

を初期近似値とする。

図2に動的オフセットを考慮したシーク距離変動のシミュレーション結果と反復近似の効果を示す。この図は横軸にシークトラック数 L_0 を取り、縦軸にはシミュレーションしたシーク距離の誤差率分布の標準偏差を取った。シーク距離データの平均値は $(R_2 - R_1)$ になるが、動的オフセットの効果で実際のシーク距離がどのようなばらつきをもつか図2に示されている($n=0$ の場合)。また、反復近似したシーク距離($L_1, L_2, \dots$)についても同様に誤差率 $|L_n - L|/L$ の標準偏差をプロットした($n=1, 2$ の場合)。この図から最悪オフセット値 L_{ofs} を下式とすれば、

$$L_{ofs} = |a_0| + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{(a_n^2 + b_n^2)} \dots (7)$$

(1) $L > 10 \cdot L_{ofs}$ (長シーク)の場合:

$L = L_0$ として誤差は少ない。すなわち、従来の整数値シークでよい。

(2) $L < 10 \cdot L_{ofs}$ (短シーク)の場合:

L_0 を近似値として使うことは誤差が大きい、一次近似 L_1 で十分な精度がある。すなわち、動的オフセット補償を行う精密シークが必要でシーク距離を小数点以下まで計算し直す必要がある。ただし、短シークではシーク時間 T がオフセットの変動周期より一般的に小さいため反復近似値は急速に収束するので反復は一回で十分である。本シミュレーションでは $10 \cdot L_{ofs}$ が5トラック程度であったが、今後の高トラック密度化に伴い動的オフセット補償が必要なシーク距離はますます長くなってゆく。

3. 高安定シーク軌道の設計

2章において、シーク時間 T があらかじめ予測できれば動的オフセットがあってもシーク距離 L を十分な精度で近似できることがわかった。したがって動的オフセットを考慮したシークを実現するために、シーク制御器は高速移動/高速整定という本来の目的のほかに、シーク時間を閉ループで制御し、その安定化を図る必要がある。従来シーク制御器は移動距離とその時点での目標速度からなるテーブル(軌道)を用意し、これを参照しながら速度制御するものであり、シーク時間についてはまったく制御していない。

シーク時間をも含めて制御するためには、移動途中において目標とする速度のほかに経過時間も簡単に参

照できるような軌道を設定し、この軌道に沿ってスケジューリングどおりに追従するような精密シーク制御器が必要である。ここでは、このような用途に最適であり、かつ従来シークの要件をも満足させる新しいシーク軌道を検討する。

静止しているアクチュエータがある軌道を描いて距離 L だけ離れた点に時間 T だけかかって移動しその後また静止する場合を考える。アクチュエータの位置 (x_0)、速度 (x_1)、加速度 (x_2) および高次加速度群 (x_i) からなる状態ベクトル x を考えると、移動完了後静止すると、 $x(T)=[L \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \cdots \ 0]^T$ なので、種々の機械振動モードをもつアクチュエータが移動完了した後に現れる振動性の過渡応答を制振するためには、この軌道の終点での状態ベクトル $x(T)$ の速度、加速度および高次加速度群が零で(連続で)あることが望ましい。いま、終点で k 次の微分値が零であり操作量が最小である最適平滑軌道を次のように定式化しその解を求める。

アクチュエータが k 次積分系であり、操作量 u 、状態量 x を図3のように取ると、状態方程式は

$$dx/dt = A \cdot x + B \cdot u \quad \cdots \cdots (8)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & & 0 \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots (9)$$

$$B = [0 \ 0 \ \cdots \ 0 \ 1]^T \quad \cdots \cdots (10)$$

境界条件として、 $t=0$ では位置、速度、加速度のみが零であり、 $t=T$ では k 次微分連続性を要求する。したがって、

$$x(0)=[0 \ 0 \ 0 \ a_3 \ a_4 \ \cdots \ a_k]^T \quad \cdots \cdots (11)$$

$$x(T)=[L \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \cdots \ 0]^T \quad \cdots \cdots (12)$$

評価関数として、操作量最小を選択すると、

$$J = \int_0^T u^2 dt = \int_0^T \left(\frac{d^{(k)} x_0}{dt^{(k)}} \right)^2 dt \Rightarrow \min. \quad \cdots \cdots (13)$$

この条件を満足する最適軌道は状態行列 A の固有値がすべて零であり $(k+1)$ 重根であることから、位置 x_0 は $(2k+1)$ 次の代数多項式であり、速度 x_1 は $(2k)$ 次の代数多項式でなければならないことがわか

る。一方、境界条件から x_1 は $t=0$ で二重根以上、 $t=T$ で k 重根をもつので、

$$x_1 = (T-t)^k \cdot \{b_2 \cdot t^2 + b_3 \cdot t^3 + \cdots + b_k \cdot t^k\} \quad \cdots (14)$$

$$L = \int_0^T x_1 dt \quad \cdots \cdots (15)$$

ここで、 (j, k) 次の標準軌道関数 $H_{jk}(x)$ を次のように定義する。ただし、 $2 \leq j \leq k$ 。

$$H_{jk}(x) = H_{0jk} \cdot x^j \cdot (1-x)^k \quad \cdots \cdots (16)$$

$$1 = \int_0^1 H_{jk}(x) dx \quad \cdots \cdots (17)$$

係数 H_{0jk} は第一種の Euler 積分により容易に解け、

$$H_{0jk} = \frac{(j+k+1)!}{(j!) \cdot (k!)} \quad \cdots \cdots (18)$$

この標準軌道関数 $H_{jk}(x)$ を用いると、最適軌道解の式(14)、(15)は次のように関数 H_{jk} の線形結合で表すことができる。

$$x_1 = (L/T) \cdot \sum_{j=2}^k c_j \cdot H_{jk}(t/T) \quad \cdots \cdots (19)$$

$$1 = \sum_{j=2}^k c_j \quad \cdots \cdots (20)$$

標準軌道関数 $H_{jk}(t_n)$ は正規化された時間 $t_n = t/T$ にのみ依存し、始点 ($t_n=0$) において j 次の微分連続性を、終点 ($t_n=1$) において k 次の微分連続性をもっている。

線形結合係数 c_j は境界条件から求めることができ一般的には次式のように解ける。

$$c_j = \frac{k \cdot j!}{L \cdot (k+j+1)!} \cdot \sum_{i=3}^{j+1} \frac{(k+j-i)!}{(j-i+1)! \cdot (i-1)!} \times a_i \cdot T^i \quad \cdots \cdots (21)$$

式(21)から明らかなように、ある一つの c_j のみを1にして他を零になるように初期値 a_j を選ぶことができるので、標準軌道関数 $H_{jk}(x)$ は最適条件を満足している。したがって、以下では標準軌道のみを考察対象とする。

いま、磁気ディスクのアクチュエータを駆動する最適軌道について考える。駆動電流に対して位置応答は二重積分系になっている。また、駆動回路はトランスコンダクタンス・アンプを採用しているがシークのような大振幅動作ではコイルのインダクタンスが無視できないので電流変化率を制限するような駆動方法が望ましい。このために加速度変化率(ジャーク)までを考慮し、軌道終点での平滑度 $k=3$ と選択する。また、軌道が対称のほうが計算しやすいので $j=3$ とし、 H_{33} 標準軌道を選択する。

図4に選択した標準軌道 H_{33} と比較のため H_{22} 、 H_{23} 標準軌道を合わせて示した(速度軌道と加速度軌道を示す)。 H_{22} の場合はすでに SMART 軌道⁽¹⁾として提示されているが、図4からも明らかなようにシ

図3 高次積分モデル

図4 高次平滑軌道

図5 シーク後の残留振動

ーク終了時点において電流が折点になっており、コイル・インダクタンスにより過渡応答の乱れが発生する。H33 軌道は終点での電流が滑らかでフォロイング制御に連続的に移行できる。また、シーク終了直前の電流が小さいため、系因子の変動や外乱により予定より早くシークを終了した場合でもセトリグが急激に悪化することがない。図5にアクチュエータの機械的共振を考慮したプラントモデルに図4のH22とH33の加速度軌道を入力した場合の応答を示す。H33軌道は残留振動が極めて小さいことがわかる。

式(19)~(21)からH33軌道を採用した場合の位置、速度、加速度、ジャーク軌道を求めると式(22)~(25)になる。これらの式はシーク距離 L とシーク時間 T のみに依存するスケール因子(ゲイン) $G_0 \sim G_3$ と正規化時間の多項式である正規化軌道関数部分(x_i の最大値が1になるように正規化)とに分解され、DSPによる固定小数点演算で処理しやすい形になっている。

$$x_0 = G_0 \cdot X_{0n}(t/T) \quad (22)$$

$$\begin{cases} G_0 = L \\ X_{0n}(x) = x^4 \cdot (35 - 84 \cdot x + 70 \cdot x^2 - 20 \cdot x^3) \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} G_1 = \frac{35}{16} \cdot \frac{L}{T} \\ X_{1n}(x) = 64 \cdot x^3 \cdot (1-x)^3 \end{cases} \quad (24)$$

$$x_2 = G_2 \cdot X_{2n}(t/T) \quad (25)$$

$$\begin{cases} G_2 = \frac{84}{5\sqrt{5}} \cdot \frac{L}{T^2} \\ X_{2n}(x) = 50\sqrt{5} \cdot x^2 \cdot (1-x)^2 \cdot (0.5-x) \end{cases} \quad (26)$$

$$x_3 = G_3 \cdot X_{3n}(t/T) \quad (27)$$

$$\begin{cases} G_3 = \frac{105}{2} \cdot \frac{L}{T^3} \\ X_{3n}(x) = -16 \cdot x \cdot (1-x) \cdot (1-5 \cdot x + 5 \cdot x^2) \end{cases}$$

上式から、スケール因子は L に関して一次であり、 L を変えても軌道の形状は変化せず、全体のスケール

図6 スケーリング因子の決定

が変化するだけであること、スケールを決めるには L と T の関係を任意関数で関係付ければよいことがわかる。

L と T の関係を定めるには、シーク最大速度 V_m 、シーク加速度 A_m 、最大ジャーク J_m 、すなわちパワーアンプ出力のスリューレート(=アンプ出力最大電圧/アクチュエータ・インダクタンス)を考慮する必要がある。よって、 $G_1 < V_m$ 、 $G_2 < A_m$ および $G_3 < J_m$ を満足するように決めればよい。図6にこの一例を示す。網線部が上記条件を満足する領域であり、ここでは

$$T = 1.4 \cdot \sqrt[3]{L} \quad (28)$$

とし、アクチュエータの電流変化がつねに一定値を超えないように設定している(図6の太線)。また、途中で直線が折れているのは最大速度限界を超えないためである(図6の太破線)。

4. シーク制御器の実現

図7に非整数形シーク制御器のブロック図を示す。左半分がシーク距離指示値 L_0 からシーク時間目標値 T を求め一次近似から真のシーク距離 L を計算する部分であり、近似に必要な $f(\theta, z)$ はテーブル形式でRAMに置き、適当な時間間隔で更新するようにし

図 7 シーク制御器のブロック図(点線はシーク開始前のシーク距離補正を示す)

た。回転角 θ の代わりに現在セクタとシーク到着予定セクタを使ってテーブルを参照する。

右上半分は軌道制御部であり、測定した位置情報から正規化時間 t_n を推定し、正規化時間から式(23)により目標速度を、式(24)から加速度を計算する。この軌道発生計算はすべて正規化状態変数 (x_{0n}, x_{1n}, x_{2n}) と正規化時間 ($t_n = t/T$) で行い最後にスケール因子を乗じた。したがってシーク距離の一次近似による補正が必要なのはスケール因子のみである。このスケール因子修正はシーク開始直前に一回だけ実行し、シーク中は正規化位置、速度、時間のみを使って軌道計算を行う。正規化時間は、シーク加速時はサンプリング回数により開ループで作成するが、減速時は検出位置から除算により正規化位置を算出し、これにより正規化位置軌道テーブル [$x_{0n} : t_n$] [式(22)の正規化部分] を逆引きして正規化時間を求める閉ループ構成になっている。

制御器の出力は軌道目標速度とオブザーバによる推定速度の差(制御誤差)にループ利得を乗じ、それに軌道加速度値から求めたフィードフォワード電流値を加算して得られる。

5. 実験結果

目標軌道として H33 を採用した場合のシーク波形を図 8 に、シーク距離とシーク時間の測定結果を図 9 に示す。シーク時間は安定しており従来制御の場合と比較して標準偏差が 1/10 になっていることがわかる。シーク測定時間の平均値はほぼ図 6 の設計値と同じである。ただし、図 9 の測定値は整定時間を含んでいるので一定時間だけつねに長い。図 8 のシーク電流波形は極めて平滑であり、予想どおり残留振動がほとんど現れていない。

図 10 に非整数値シーク (1.5~2.5 Track) の場合を示す。波形 (a) は従来制御例 (BangBang 制御)、波形 (b) は反復近似によるシーク距離補正を抑制した場

図 8 平均ストロークでのシーク波形

図 9 シーク時間統計

[(a),(c) 従来制御 (b),(d) 本制御器]

合、波形 (c) は補正ありの場合でシーク距離によりシーク軌道が正確に修正されているのがわかる。

図 11 は非整数値シーク (0.4~1.6 Track) でのシーク時間統計を示している。従来のシーク制御では 1.0 Track シーク長においてのみ精密なシークを実現しているが、本精密シーク方法ではシーク長が連続的に変化しても完全にシーク時間を制御している。標準偏差も 1/3~1/10 であり動的オフセットがあっても安定したシーク時間になっていることがわかる。

磁気ディスク装置全体として評価した結果では、高

図 10 非整数形シークの位置応答

- (a) 従来シーク
- (b) 動的オフセット補償なし
- (c) 動的オフセット補償付き

図 11 非整数形シークのシーク時間統計

- (a) 従来制御(平均値), (c) 従来制御(標準偏差)
- (b) 本制御器(平均値), (d) 本制御器(標準偏差)

次平滑軌道を採用したことにより、シーク時騒音を従来と比較して 4 dB 程度改善でき、ディスク装置全体としての制振効果も見られた。

DSP は TI 社の TMS 320 P 14 を 24 MHz クロック(サイクル時間 167 ns)で使用した。磁気ディスクの回転同期制御とアクチュエータ制御を時分割で実行し、サンプリング周波数は 13 kHz を実現できた。プログラムサイズは後述のキャリブレーション・ルーチンを含めて 4 kW, データ RAM は 256 ワードを使用した。

6. む す び

シーク内および終端での高次微分値が零であり、閉ループ制御に適し制振効果のある高次平滑軌道を開発した。また、これを目標軌道としシーク時間を精確に推定できるシーク制御器を設計した。動的オフセットがある場合のシーク距離は反復近似を行うことで容易に算出でき、これを補正因子として目標軌道のスケールを修正することで狭トラックピッチにおける精密シーク制御を実現した。本技術を高密度磁気ディスク装置に適用し、シークの高速化/安定化/騒音低減が図れることを実験で確認した。

なお、この技術を実用化するのにあたり、オブザーバの時間遅れ補償、外力キャリブレーションおよびループゲイン・キャリブレーション等の技術も必須であることを注記する。磁気ディスク装置においてはアクチュエータの力定数の変動が大きいこと、本シーク制御においては多量のフィードフォワード制御を併用していることがその理由である。

本論は磁気ディスク装置のアクチュエータ制御について具体的、数値的な検討を行ったが、より一般的には低周波数のゆらぎが無視できない環境下での軌道制御についての一つの解法と考えることができる。

また、「しなやか」な軌道について一般化した視点から検討した。最短時間軌道は通常 BangBang 軌道解を導くが、これを乗物に適用すれば極めて乗り心地の悪いものになる。機械的には内在する振動モードを励起したり、摩耗/損傷を引き起こしやすくなる。ここでは「しなやかさ」の選択基準として、軌道の高次微分に着目し、この自乗積分値が最小になり、かつ軌道端でも高次の微分連続性を有する最適軌道を提案した。

文 献

- (1) Hasegawa, S., ほか 3 名, *Proc. SPIE/SPSE Symp.*, 1248 (1990), 104.
- (2) 溝下・長谷川・高石, 機講論, No. 910-17 (1991-4), 410, 413.
- (3) Miu, D.K. and Bhat, S.P., *IEEE transaction on MAG*, 27-6 (1991), 4471.
- (4) 平田・劉・美多・山口, 第34回自動制御連合講演, (1991-11), 99.
- (5) 山浦・小野, 機講論, No. 920-17 (1992-4), 570.