小型磁気ディスク装置のヘッド位置決め制御技術

Head Positioning Control of Small-Form-Factor Hard Disk Drives

鈴木　博　H. Suzuki
谷津　正英　M. Yatsu

小型磁気ディスク装置では，記録トラック上に一定間隔で埋め込まれた位置情報を用いて，記録再生ヘッドを目的のトラックへ速く正確に移動し追従させる技術が求められている。目標速度と実際のヘッド速度の差をVCM（Voice Coil Motor）の制御電流にフィードバックする従来の制御方式では，制御対象の動特性の変化や外乱などの影響を受けやすく，目標トラックへの移動時間にばらつきが生じやすい。これに対し，モデル追従制御の考えに基づいた新しいヘッド位置決め制御技術を開発した。

この方式では，簡単な数式で表現したヘッド系のモデルを望ましい動きをするように制御し，モデルのヘッド位置と実際のヘッド位置の差をVCMの制御電流にフィードバックする。この方式を2.5インチ型磁気ディスク装置に適用した結果，制御対象のゲイン変動や外乱変動の影響を大幅に低減でき，シーク時間の短縮にも有効なことが確認できた。

Controlling technology for small-form-factor hard disk drives (HDDs) has been sought after that would enable quick and accurate head positioning using position information embedded in the recording tracks. The conventional control technology based on velocity feedback is relatively susceptible to changes in drive dynamics and external forces, and thus the head seek settling time tends to vary.

We have developed a new control technology which, based on model following control, feeds back the tracking error between the simple mathematical model and the actual head position. We have applied this control method to a 2.5-inch HDD, and confirmed that it substantially suppresses the detrimental effects of drive gain transition and external force variation and effectively reduces seek settling time.

1 まえがき

ファインメカ製品には，ビデオのようなコンシューマ機器から，磁気ディスク装置や光ディスク装置などの情報機器まで幅広い製品が含まれ，そこで用いられる制御技術の目的，手段，手法，期待される品質もさまざまである。例えば制御部の実現方法は，アナログディスクリート回路をはじめ，安価な汎(はん)用マイコン，さらに高級な演算機能をもったDSP（Digital Signal Processor）まで広範にわたる。制御技術も，古典的なPID（比例，積分，微分）制御から，H∞制御や外乱オブザーバなど現代制御理論を取り入れた先進技術まで幅広い。それらの中から，必要とされる性能，制御技術にかけられるコスト，ノウハウを含めた技術資産などにより，制御手段や手法が選択されることになる。しかし，いずれの場合でも，正確に，速く，かつ環境変動の影響をできるだけ受けずに目標とする状態に移行し，その状態を保持することが制御の目的となる。

ここでは，モデル追従制御方式[(1),(2)]に基づいて当社が新たに開発した小型磁気ディスク装置のヘッド位置決め技術について紹介する。小型磁気ディスク装置（図1）は，ファインメカの制御対象としてとらえた場合，次のような特徴がある。

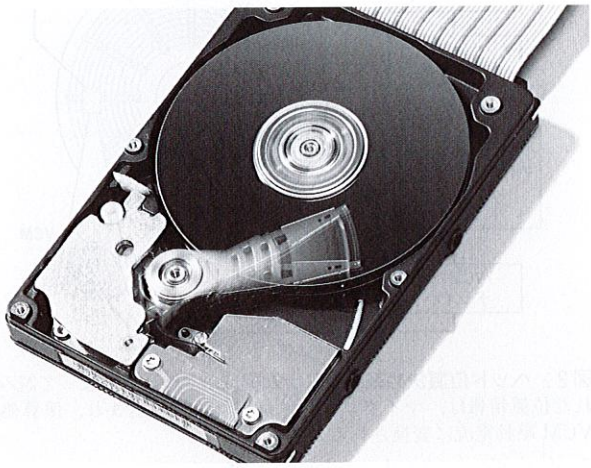

図1．小型磁気ディスク装置　回転式のVCMの先端に取り付けられたヘッドによって読み取られた位置情報で，VCMを制御する。
Small-form-factor HDD in operation

(1) 高速性や外乱圧縮のために，比較的広い制御帯域が要求される。

(2) 位置情報が比較的低いサンプルレートでしか得られ

ない。

(3) コスト制約が厳しく，センサやコントローラにかけるコストも厳しく制約される。

また，制御対象であるVCMに加わる外力やVCM自身のゲインは，部品ばらつきとともに環境条件や時間経過によって変動しやすい。モデル追従制御方式では，制御対象に加わる外力や制御対象自身の変動を制御の開始から終了までの間で吸収することができるため，その変動の影響を受けにくい。

2 小型磁気ディスク装置のヘッド位置決め制御技術

2.1 ヘッド位置決め系

図2に，小型磁気ディスク装置のヘッド位置決め系のシステム構成を示す。この系の目的は，ヘッドを目的とするトラックへ速く正確に移動させ，そのトラックの中心に精度よく位置決めすることである。この系では，まず記録トラック上に一定間隔で埋め込まれた位置情報を記録再生ヘッド（以下，ヘッドと略記）で読み取り，マイクロコントローラに取り込む。取り込んだ位置情報に制御に必要な演算処理を行い，VCMを電流駆動する。こうして作られたフィードバックループで，上述の目的が達成される。

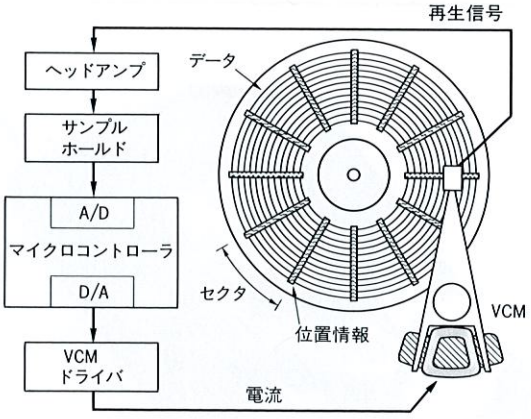

図2．ヘッド位置決め系のシステム構成　ヘッドによって読み取られた位置情報は，マイクロコントローラに読み込まれ，演算処理後VCM駆動電流に変換される。

Configuration of head positioning system

2.2 制御系の構成

図3(a)に従来の制御系の構成を示す。速度制御によってヘッドを目標位置近くまで移動した後，過渡制御と呼ばれるセトリング専用の制御系に切換えて目標トラック位置に落ちつかせる。この方式では，前述したようなVCMの動特性や外力が変化すると，制御系の切換え時の位置や速度が変動しやすい。その影響を受けて，切換えまでの時間や切り換えた後目標トラックに落ちつくまでの時間がばらつく。

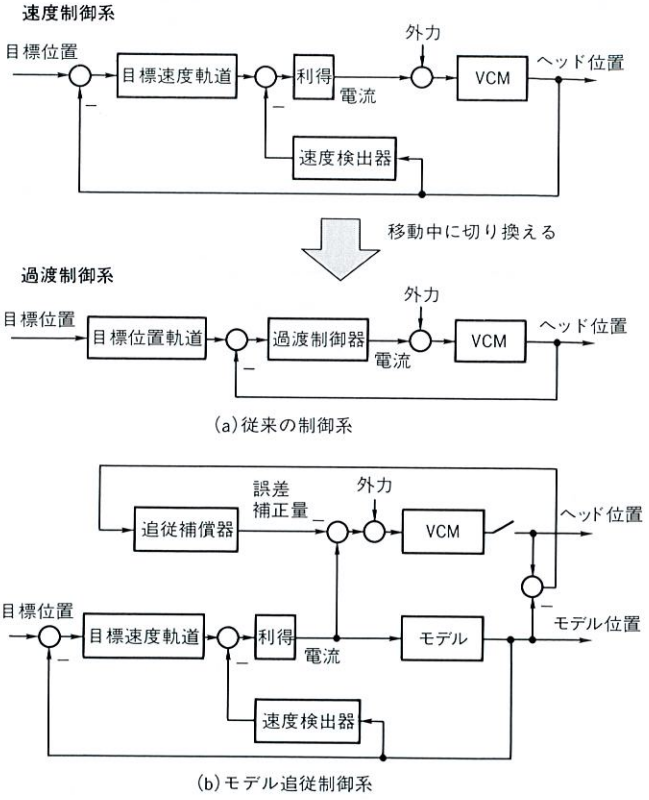

図3．小型磁気ディスク装置の制御系構成　従来のシーク制御方式では，目標位置近くで制御系を切り換えるがばらつきが生じやすい。速度制御と組み合わせたモデル追従制御では，切換えがなくばらつきが少ない。

Control block diagram of small-form-factor HDD

ここで速度制御というのは，目標位置までの残り距離に対応して目標速度を定め（目標速度軌道），観測されたヘッドの速度をその値に合わせるようにフィードバック制御することをいう。

図3(b)にモデル追従制御を用いた小型磁気ディスク装置の制御系の構成を示す。モデル追従制御では，制御対象であるVCMを表現した数式モデルを制御系の中にもち，この数式モデルを制御対象と考えて，望ましい動きをするように電流を与える。同時に，実際のVCMにも同じ電流を与える。実際のヘッドはモデルの動きに追従しきれずに誤差が生ずる。この誤差は補償器によって補償電流に変換されて追従誤差をなくすように実際のVCMにフィードバックされる。外力やゲイン変動によって増える追従誤差は，シーク動作の開始から終了までの間に繰り返されるフィードバックによって，吸収されてなくなる。このため，あらかじめ特別の調整をしなくても外力やゲイン変動の影響を受けにくい。

モデル追従制御でも，制御対象の数式モデルの制御には従来の制御方式で用いられている速度制御を利用した。速

度制御では，目標速度軌道をテーブルとしてもつことで複雑な演算処理がいらない。また，加速度や速度の最大値を簡単に設定できるなどの優れた点もある。目標速度軌道テーブルは，加速は速やかに，減速はVCMの高周波共振成分を励起せずになめらかな軌道となるように決める。このようにして制御された場合のヘッド移動速度と駆動電流を図4に示す。

このように，従来の制御系にも用いられている速度制御をモデル追従制御と組み合わせて，切換えのない一つの制御構造でシーク動作を行う制御方式を実現した。

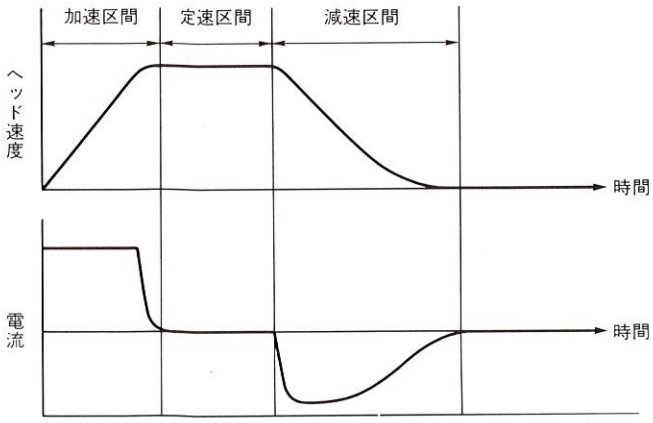

図4．ヘッド移動速度と駆動電流　加速は速やかに，減速はなめらかな軌道となるように制御する。
Head velocity and driving current

2.3　制御対象のモデル化

制御対象である小型磁気ディスク装置のアクチュエータ系は，二重積分の数式モデルとしてもっとも簡単に表せる。

$$dv(t)/dt = u(t) \quad (1)$$

$$dy(t)/dt = v(t) \quad (2)$$

ここで，yはヘッド位置，vはヘッド速度，
uは操作量（VCM電流）

実際の制御系は0次ホールドを含む離散時間の系であるので，サンプル時間$t=kT_s$でのヘッドの位置，速度は次の式で表わせる。

$$v(k+1) = v(k) + u(k)T_s \quad (3)$$

$$y(k+1) = y(k) + (v(k+1) + v(k))T_s/2 \quad (4)$$

ここで，T_s：サンプリング間隔，k：整数

したがって，制御系の数式モデルの動きは，単位系を適切に選ぶことにより，単純な加減算で実現される。二重積分で表わされたモデルと制御対象であるアクチュエータの間の誤差（モデル誤差）は，追従誤差とともにフィードバックループによって吸収することができる。

3　2.5インチ型磁気ディスク装置への適用

2章で紹介したモデル追従制御技術を2.5インチ型磁気ディスク装置に適用し，その制御性能を検証した。制御対象となるVCMにはヘッドと回路をつなぐFPC（フレキシブル配線板）や非動作時にヘッドをデータ領域外にラッチするマグネットなどからさまざまな外力が加わる。この外力は装置個々によってばらつき，さらに経時的にも変化する。また，VCMを含む制御系のゲインも，部品のばらつきや温度によって変動する。制御系には，このような変動の影響を受けずに安定した性能を保つことが求められる。

3.1　外力変動の抑圧

図5に，VCMに加わる外力をすべてのトラック位置で一律に増減させ（電流換算で±10 mA），1,000トラックシークを行った場合のセトリング特性を示す。従来の制御方法では，外力が増えると目標位置の前後で振動的になる。外力が減ると目標位置への到達が遅れる。いずれの場合もシー

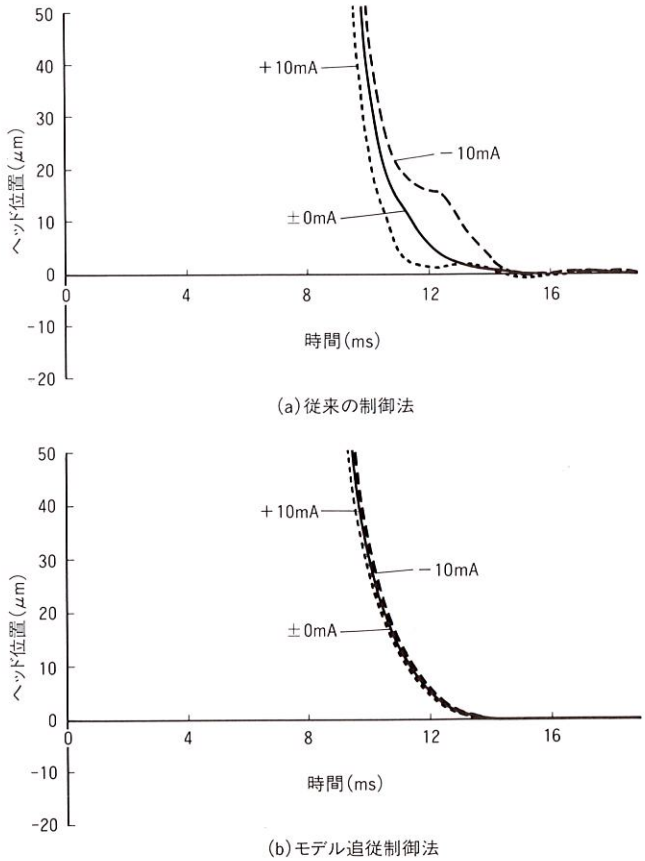

図5．外力変動とシークセトリング特性　従来の制御方式では，外力が変動するとセトリング特性が大きく乱れる。モデル追従制御では，ほとんど影響を受けない。
External force variation vs. seek settling time

ク特性が大幅に乱れる（図5(a)）。一方，モデル追従制御方式では，外乱の変動がない初期状態で従来方式よりセトリングが速く安定しており，外力が増減してもセトリング特性はほとんど変わらない（図5(b)）。

3.2 ゲイン変動の抑圧

図6に，VCMを含む制御系ゲインを±10％増減させ，1,000トラックシークを行った場合のセトリング特性を示す。

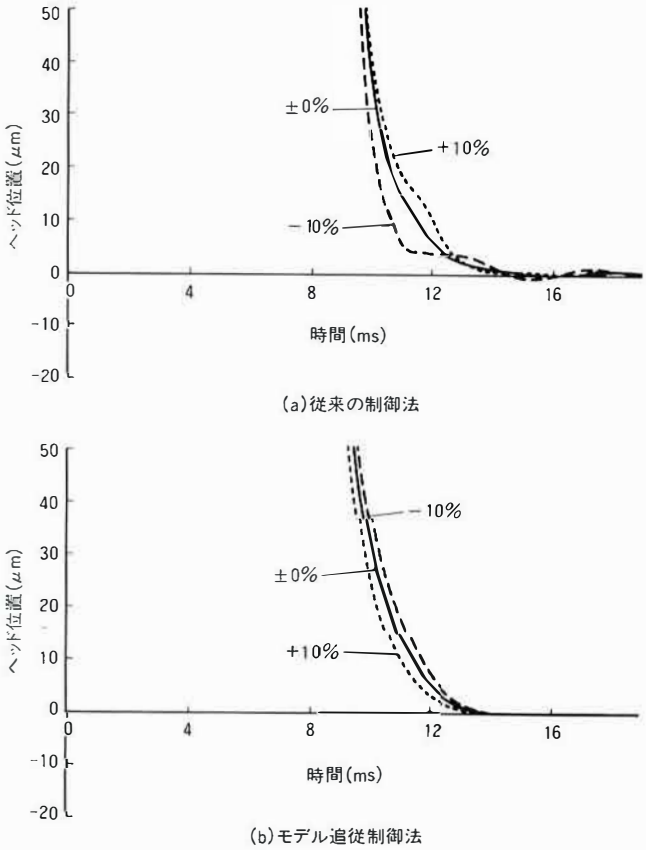

図6．ゲイン変動とシークセトリング特性　従来の制御方式では，ゲインが変動するとセトリング時間が増大する。モデル追従制御では，ほとんど影響を受けない。
Gain variation vs. seek settling time

従来の制御方法では，ゲインが増減するとセトリングが振動的になり，目標位置に安定するまでの時間が増える（図6(a)）。一方，モデル追従制御方式では，ゲインが変動しても振動は発生せず，目標位置に安定するまでの時間も変わらない（図6(b)）。

以上のように，モデル追従制御方式は，従来の制御方式に比べ外力やゲインの変動を非常に受けにくく，安定した制御系を実現できることを確認した。

4 あとがき

コントローラ内の数式モデルを速度制御方式で移動させ，モデル位置との誤差で制御対象への操作量をフィードバック補正するモデル追従制御方式を開発した。この方式を2.5インチ型磁気ディスク装置に応用し，制御性能を検証した。その結果，移動距離によらず，制御対象のゲイン変動や外乱変動の影響を大幅に低減でき，シーク時間の短縮にも有効なことを確認した。

今後は，目標速度軌道の改良や追従誤差補償器の最適化などを行い，さらに性能改善を進めたい。

文　献

(1) 小山正人：低剛性な電動機制御への2自由度制御方式の適用，電気学会産業電力電気応用研究会資料，86，2，pp.21-30（1986）
(2) 松井信行，他：モータコントロールの新しい技術，電気学会論文誌，D113，10，pp.1122-1137（1993）

鈴木　博　Hiroshi Suzuki
マルチメディア技術研究所開発第七部課長。
小型磁気ディスク装置の開発設計に従事。電子情報通信学会会員。
Multimedia Engineering Lab.

谷津　正英　Masahide Yatsu
マルチメディア技術研究所開発第七部。
小型磁気ディスク装置の開発設計に従事。
Multimedia Engineering Lab.