連載講座

機械制御
実践講座ハードディスク・
ODD (DVD) の機械制御

Control Technology for Hard Disc and Optical Disk Drives

平井 洋武

Hiromu HIRAI

◎1945年7月生まれ

1968年九州大学工学部電子工学科卒業，同年（株）日立製作所入社，1999年より名古屋工業大学教授

◎研究・専門テーマは情報機器の機構制御

◎正員，名古屋工業大学

〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町/

E-mail: hirai@elcom.nitech.ac.jp

はじめに

情報化社会は，これまで，文字，音声および画像情報のデジタル化とともに進展してきた．今後は，衛星放送，衛星通信あるいは広帯域ISDN等の基幹施設が整備され，映像情報の本格的なデジタル化が進むものと思われる．ハードディスクおよびDVDは，情報の大容量記憶・再生装置として，このような情報化社会において，重要な役割を果たし続けるものと思われる．

ハードディスクおよびDVDにおいては，円板状の媒体に情報をいかに高速にそして正確に記録あるいは再生するかが重要である．情報を記録・再生する磁気ヘッドあるいは光学ヘッドの位置決め機構には，制御技術が利用されており，製品の性能を左右する重要な要素となっている．

本稿では，ハードディスクおよびDVDの制御技術の概要，開発の動向および今後の展望について述べる．

ハードディスクの制御

2-1 ハードディスクの概要

ハードディスクの構成を図1に示す．記録媒体が形成された複数枚の磁気ディスクは同一回転軸上に積層されて，スピンドル機構により駆動され，高速回転している．このディスクの表と裏の両面上に同心円状に設けられたトラックに情報が記録される．情報を記録・再生する磁気ヘッドはヘッド支持機構により微少なすき間を保って磁気ディスク上に保持されている．ヘッド支持機構は，ボイスコイルモータ（VCM）により駆動され，位置決め制御系により，目的のトラックに位置決めされる．現在のハードディスクでは，データはある決められた容量単位（バイト数）に区切られたセクタから構成されている．このセクタの先頭に位置信号を書き込み，すべてのデータ面に位置信号が書き込まれている．位置決め制御系は，この信号に基づいて位置決め動作を行う．

2-2 ハードディスクの位置決め制御技術

磁気ディスク装置の制御系の基本構成を図2に示す．データの記録あるいは再生すべきトラック位置が目標値として与えられる．磁気ヘッドの位置が制御量である．目標値と制御量の偏差が大きい場合には，シーク制御系（速度制御系）が動作し，目標トラックに近づいたところでフォロ잉制御系（位置制御系）に切り換えられる．

制御系は，機構系の振動特性のばらつき，ゲイン変動および外乱の作用の影響を受ける．機構系の振動特性のばらつきは，その固有周波数および減衰定数の変動として現れる．ゲイン変動には，VCMの力定数およびヘッド間の位置検出ゲインのばらつきがあり，ループゲインの変動として現れる．外乱には，力外乱と位置外乱がある．力外乱には，VCM可動部を支持している軸受の摩擦力，磁気ディスクの高速回転に伴って生じる空気流の影響等がある．位置外乱としては，基準となる位置信号の書き込み誤差，磁気ディスクの偏芯^{しん}，スピンドル機構のベアリングの振動等が

ある。さらに、位置検出出力には信号ノイズが重畳する。これらを考慮して制御系をモデル化すると図3を得る。駆動部は制御系の補償要素、サーボ増幅器およびVCMを含む伝達特性を表している。位置外乱、力外乱および信号ノイズの存在のもとで、目標トラック位置と磁気ヘッドの位置との偏差である位置誤差をゼロに近づけることが、制御の目的となる。

2-3 ハードディスクの制御技術の開発動向

制御系の設計においては、安定性と応答性の両立が望まれる。ところが、閉ループ制御系だけでは応答性の点で限界を生じる。そこで、閉ループ制御系の伝達遅れの主要因である制御モードの逆特性を目標値に付加し、応答性の改善を図る2自由度制御系が採用されている⁽¹⁾。

一方、2自由度制御系は、単純な閉ループ制御系に比べて、制御対象のゲイン変動の影響を受けやすい。したがって、これらの制御方式を有効に動作させるためには、制御対象のゲイン変動を補正する必要がある。ゲイン変動に対しては、ヘッドごとのゲイン変動やヘッドの動作トラック位置によるVCMの力定数の変動等を、あらかじめ推定してテーブル化しておき、フォローイング制御動作時にそれぞれのゲインを設定する方法が考えられている⁽²⁾。一方、ゲイン変動は、経時変化や温度、湿度、気圧の環境変化の影響を受ける場合もある。シーク制御動作の減速中にゲイン変動を逐次推定し、目標速度とヘッド速度との偏差が最小となるように加速度フィードフォワードゲインを各サンプリングごとに調整する適応制御技術が活用されている⁽³⁾。

図1 磁気ディスク装置の構成

図2 磁気ディスク装置の制御系の基本構成

図3 制御系モデル（フォローイング動作）

響を受ける場合もある。シーク制御動作の減速中にゲイン変動を逐次推定し、目標速度とヘッド速度との偏差が最小となるように加速度フィードフォワードゲインを各サンプリングごとに調整する適応制御技術が活用されている⁽³⁾。

磁気ディスク装置の制御系は、構造の異なるシーク制御系とフォローイング制御系から構成され、シーク制御系からフォローイング制御系へ一方に切り換えられる。この時、シーク制御系が整定するのを待ってフォローイング制御系へ切り換えていたのでは、位置決めに時間がかかってしまう。一方、シーク制御系が整定する前に切り換える場合、磁気ヘッドの状態量（位置、速度等）が定常状態に達する前にフォローイング制御系に切り換えることになる。切り換え後の過渡応答を小さくするために、フォローイング制御系の補償要素の内部変数の初期値を設定する方法等の工夫がされている⁽⁴⁾。

2-4 今後の展望

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、よりいっそうの位置決め精度の向上および位置決め時間の短縮が必要である。そのためには、2節で述べたような各種の外乱を低減あるいは制御的に圧縮する必要がある。外乱の影響は制御系のサーボ帯域を拡大することにより圧縮することができる。

サーボ帯域を拡大するために、位置決め機構の可動部分に加速度センサを取り付け、そこから得られる加速度信号をフィードバックすることにより、機構系の振動を抑え、サーボ系の高帯域化を図る方法が提案されている⁽⁵⁾。さらには、現状の駆動機構に可動部質量を小さくした第2のアクチュエータを付加し、VCMとの協調（2段アクチュエータ）により全体としてのサーボ帯域の向上を図ることが検討されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

磁気ディスクの半径は年々小径化してきており、現在は3.5インチおよび2.5インチが中心となっている。磁気ディ

スクの半径が小さくなると、通常機構系の固有振動数は上がる傾向にあり、サーボ帯域の拡大には有利である。

今後は、上記2段アクチュエータ等の新規技術による方法と、ダウンサイジングによる方法との相乗効果によって磁気ディスク装置の記録密度の向上が進んでいくものと思われる。

(原稿受付 1999年9月24日)

● 文 献 ●

- (1) 小林・山口・押味・曾山・秦・平井, 磁気ディスク装置のマルチレート零位相差フィードフォワード制御, 日本機械学会IIP'98情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, No.98-26 (1998-8), 21-22.
- (2) Kobayashi, M., Yamaguchi, T. and Hirai, H., Adaptive Control of a Hybrid Servo System for Magnetic Disk Drives, *JSME International Journal*, 39-4, C (1996), 772-780.
- (3) 小林・吉田・山口, 磁気ディスク装置の適応シーク制御, 日本機械学会IIP'95情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, No.95-49 (1995-8), 35-36.
- (4) 山口・穴田・平井, 磁気ディスク装置ヘッド位置決めサーボ系におけるサーボモード切り換え時の初期値補償問題の基礎検討, 計測自動制御学会論文集, No.29-7 (1993), 792-799.
- (5) 小林・山口・吉田・平井, キャリッジ加速度情報を用いたマルチセンシングヘッド位置決め制御, 日本機械学会第74期通常総会講演会講演論文集(IV), No.97-1 (1997-3), 404-405.
- (6) 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 Transactions on Industrial Electronics*, No.42-3 (1995-6), 222-233.
- (7) Koganezawa, S., Takaishi, K., Mizoshita, Y., Uematsu, Y., Yamada, T., Hasegawa, S. and Ueno, T., A Flexural Piggyback Milli-Actuator for over 5Gbit/in² Density Magnetic Recording, *IEEE Transactions Magnetics*, No. 32-5 (1996-9), 3908-3910.

米沢 実

Minoru YONEZAWA

◎1967年7月生まれ

1993年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了

◎研究・専門テーマは制御工学、ディスク装置開発

◎正員, (株) 東芝 研究開発センター

(〒210-8582 川崎市幸区小向東芝町1/

E-mail: minoru.yonezawa @ toshiba. co. jp)

ODD (DVD) の制御技術

—メカ・制御系の最適設計技術—

1枚の光ディスクに1Gバイトを超える容量のメモリ一、一昔前の夢の話が現実に手のひらの上にある時代となった。光ディスクの技術は提案されてから30年余り⁽¹⁾, 確

実に進化を遂げて、現在DVD(Digital Versatile Disk)で片面4.7Gバイトの容量を実現している。可搬媒体である利便性を持ち、DVDやMO(Magneto-Optical)ディスクなど、その使用用途に応じて形態も変化して情報社会の一端を担う媒体に成長したと言ってよいだろう。今この光ディスクの発展を支えている技術の一つがメカ・制御技術である。中でも光学スポット位置決め制御の帯域は5kHz前後であり、世の中で実用されているメカ制御の最高レベルの制御帯域となっている。この高帯域を実現するメカ・制御技術を一言で言うと、量産ばらつきや非線形要素を持つメカ特性を許容する、メカ・制御の同時最適化技術である。本稿では、光ディスク装置のスポット位置決め制御が抱える課題を明らかにしながら、課題解決のための制御技術の現状と展望について紹介する。

3-1 制御対象と制御課題

光ディスク装置のスポット位置決め制御における制御対象は、一般に送りモータ・フォーカスアクチュエータ・トラッキングアクチュエータの三つである。図4にDVD-RAMドライブのスポット位置決めメカ構成例を示す。送りモータとしてリニアモータを採用し、CD(Compact Disc)レンズとDVDレンズを保持する部分がフォーカスとトラッキングの2軸に駆動されるアクチュエータとなっている構成である。この送りモータとフォーカス・トラッキングアクチュエータの制御課題について、以下に解説する。

(1) 送りモータの制御課題 光ヘッドをディスク半径方向に移送する送りモータには、低コストで高速アクセスを実現することが求められる。アクセスタイムを重視するMOドライブでは、リニアモータなど高加速度を発生可能なモータが採用されている。少しでもコストを下げるために、移動方向の案内軸受部をすべり軸受にする例も見られるが、すべり摩擦の非線形性が制御系に悪影響を与えないように考慮する必要がある。一方、コストを重視するCDドライブでは、DCモータの採用が一般的である。しかしこの場合も、ギヤや送りねじなど駆動力伝達機構に存在する摩擦やバックラッシュの影響を考慮する必要があり、低コストで高速アクセスを実現するためには非線形要素の影響を考慮した制御系設計が必須となる。

(2) フォーカス・トラッキングアクチュエータの制御課題 情報の記録再生を行う光学スポットは、対物レンズをディスク垂直方向に駆動するフォーカスアクチュエータと、半径方向にスポット変位させるトラッキングアクチュエータによって目標トラックに位置決めされる。高密度光ディスク装置におけるこの位置決め精度は、フォーカス方向0.2 μ m、トラック方向0.05 μ m程度である。DVD-RAMドライブのトラッキング制御では、偏心外乱100 μ mに対して上記精度を実現するために、図5に示すサーボ特性を上回る制御系が要求されており⁽²⁾, 結果として制御帯域は5kHz前後となる。この高精度位置決めには、可動部に巻かれたコイルで発生する電磁駆動力を用いて、フォーカス方向とトラッキング方向の2軸に変位可能なアクチュエー