

高密度記録のための位置決め技術

Head Positioning System for High Areal Density Recording

山口高司 日立グローバルストレージテクノロジーズ

T. Yamaguchi, Hitachi Global Storage Technologies, Inc.

This article overviews head positioning systems for hard disk drives to realize high areal density recording, and describes major issues in the area. Head positioning technology can be divided into three categories: quality of the positioning signal, including servo track writing; reduction of disturbances which cause head off-track, and disturbance suppression capabilities such as high servo bandwidth. The major issues in position signal quality are how to realize linearity and how to write servo signals with appropriate accuracy by using a servo track writer (STW). Push pin STW, non-contact STW, media STW, self STW, and pattern printing STW are compared. In the second category, flow-induced vibration is dominant, and ways of reducing this are suggested. In the third category, several servo controls are described, including phase stabilized control with a single-stage actuator, dual-stage actuator servo, and feedforward compensation to cancel selected disturbances.

Key words: hard disk drive, head positioning, servo control, servo track writer, flow induced vibration

1. はじめに

本稿では、ハードディスク装置（以下、HDD）の機構・サーボ制御技術、特にヘッド位置決め技術を解説する。HDDは磁気ヘッドをディスク上の目的のトラックに移動、位置決めして、トラック上に信号を記録したりその信号を再生したりする情報記憶装置である。最近のデスクトップ用HDDでは、ディスク片面上に320ギガビット(Gbit)の記憶素子に情報が記録されているが、その情報の記録・再生を行う素子は、ヘッド一つである。したがって、そのヘッドを目的の記憶素子上に高速でかつ正しく（精密に）位置決めすることが、HDDにおける本質的な情報記憶動作である。たった一つの素子で膨大な情報を記録再生してしまうというこのしくみが、HDDやDVDのビット単価を大幅に引き下げ、現時点ではギガバイトクラスの情報記憶装置の主流を占めている。

ヘッド素子の高速高精度位置決めを実現するための機構・サーボ制御技術は、上記のように磁気記録における記録密度向上にとって（コストも考慮して）不可欠な技術である。記憶素子面積に対してメカの位置決め精度が不十分

ではこういったコンセプトは成り立たないため、位置決め誤差となるさまざまな振動要因をメカニズムや制御でどうやって低減していくかが課題である。以下では、機構・サーボ制御技術開発のフレームワークを紹介し、その中で現状技術、将来の課題について言及する。

まず市場動向、製品動向を概観する。2003年は、HDDにとってビジネス上は好調、技術的には困難な年であった。デスクトップPC、ラップトップPCとも売れ行きが伸び、これに伴いHDDの出荷台数も大幅に伸びた。さらに、CE（コンシューマエレクトロニクス）市場がいよいよ本格的に拡大を始め、特にHDD搭載のDVDレコーダ、携帯音楽プレーヤ向けHDDの市場が広がってきて、HDD出荷台数に貢献し始めている。

また、フォームファクタ（外形寸法やインターフェース）の多様化も進んできている。1.8インチHDDが徐々に市場、それもCE市場に浸透し始めている。1インチHDDでは、容量増加やベンチャー企業の進出が始まっているがこの市場は半導体メモリの容量増大に追い上げられてきている。サーバ用HDDでは、投影面積が2.5インチHDDに等しい製品が開発され一気に小型化が進んできた。インターフェースにおいてもシリアルインターフェースへの置き換えが始まっている。またそれぞれのフォームファクタにおいて高速回転機種の開発がなされている。これらの多様性は容量増大中心の製品提案から他の機能を重視した製品提案への転換を示している。

一方、記録密度は95年頃から毎年2倍、すなわち年率100%で向上してきたが、現在ではその向上率は鈍化し年率60%とも40%ともそれ以下とも言われている。年率100%の時代にはオーバテクノロジー現象と呼ばれて技術が市場要求を超えている現象が問題視されていた。つまり市場で最も売れ筋の容量より2倍から4倍の容量の製品の開発競争がなされていた。しかし現時点ではそれだけの高記録密度が、CEという新しい市場を開拓することに貢献し、また記録密度向上率の鈍化が現時点ではHDD市場には影響していない。記録密度向上率の低下にはさまざまな要因が言われており筆者はそれらをカバーできないが、ヘッド感度、ヘッド寸法、ディスクノイズ、そしてヘッドの浮上量といった磁気記録の本質的なところで性能向上が非常に難しくなってきたと言える。2004年は磁気記録の

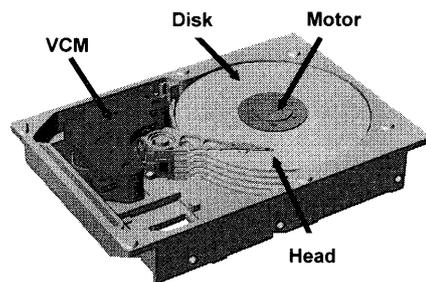


Fig. 1 Schematic diagram of an HDD.

技術開発の主流がどこを向くかが見定められるたいへん重要な年になると思われる。

2. ハードディスク装置の位置決めシステム

本章では、HDDの位置決め系の構成や技術を概観するとともに、位置決め精度向上のための技術開発フレームワークを説明する。

2.1 基本構成

Fig. 1にHDDの外観図を示す。スピンドルモータによって1枚または数枚のディスクが一定速度で回転し、ディスク上をヘッドが移動、位置決めできるように、ヘッドを駆動するボイスコイルモータ(VCM)が設けられている。VCMによってヘッドはピヴォット軸周りに揺動運動を行う。ヘッドはジンバル、サスペンションによって支持され、ディスク表面と10ナノメートルレベルの距離を保って追従できるようにディスク面に垂直方向には柔軟に、かつ高精度な位置決めを行うためにディスク半径方向には高剛性になるような機構構造になっている。スピンドルモータはFDBと呼ばれる動圧流体軸受が最近では多く用いられている。これにより振動が激減したとともに騒音が低減している。

2.2 位置決め技術のブレークスルー

HDDの記録密度向上において、いくつかのブレークスルー技術が開発、実用化されてきた。MRヘッド、GMRヘッドが最近では代表例であろう。位置決め機構技術の分野では、あまり目立ったブレークスルーは見当たらないと思われる。しかし、ダウンサイジング(小型化)を実現するためのさまざまな要素技術の継続的な開発が位置決め精度向上に大きく貢献している。この「小型化に伴う各種機構要素の継続的な性能向上」が、例えば2段アクチュエータ技術のようなブレークスルー技術と同等以上の効果を実現している。なおこの小型化技術のトピックスの一つとしてFDBモータが挙げられる。

一方、サーボ制御技術は80年代末に多数あるディスク面の1面に特殊な位置信号を書き込みこれに追従するサーボ面サーボ方式から、すべてのディスク面に間欠的ではあるが位置信号を書き込むようにしたデータ面サーボ方式に切り替わってからは、すべてのヘッドが記録再生時に

Table 1 Technical subjects for mechanics and servo

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Head positioning accuracy 2. Access time (seek time and rotational speed) 3. Robustness to environmental changes and disturbances (shock and vibration, temperature, and altitude changes) 4. Minimal adverse impact on the environment (quiet operation, low-power operation, and low thermal output) 5. New form factors (particularly smaller disk diameters and an overall shrinking of product dimensions) 6. Lowest possible cost. |
|--|

自身の位置を検出してフィードバック制御をかけられるようになり、位置決め精度が大きく向上した。その後は、制御帯域向上とフィードフォワード制御の活用が開発のメインテーマである。主なトピックスとしては、加速度センサを用いた外部振動や衝撃の検出と制御、位置信号検出のサンプル周期より短い周期でVCMに制御信号を送るマルチレート制御による高速シーク制御、回転同期振動に対する追従制御と非追従制御の切り分け、などがある。2段アクチュエータまたはマイクロアクチュエータは制御帯域向上の最有力技術であるが、ダウンサイジングによって機構系が小型化すれば機構系の固有周波数が高くなるため2段アクチュエータを用いなくても制御帯域を上げられる可能性がある。CE分野でより大容量のHDDが求められかつ機構系のダウンサイジングつまり小型化を行わない場合に登場の可能性がある。

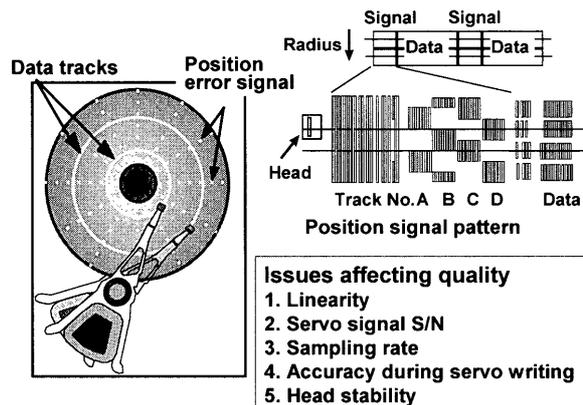
ところで機構・サーボ制御技術について述べるときは、位置決め精度のための技術以外の課題について言及しないと不十分である。Table 1に示すように、(1)位置決め精度のほかに、(2)アクセス時間、(3)環境変動に対するロバスト性、(4)環境への影響の最小化、(5)用途に応じたフォームファクタなどの変化への対応設計、および(6)コストがある。(2)についてはディスク回転数とシークタイム(ヘッド移動時間)からなる。(3)は具体的には、外部振動や衝撃の耐力、温度、気圧、湿度変化に対する低感度を指している。(4)は、消費電力、騒音の低減が中心である。これらは顧客の要求と直結しており、この仕様を維持または向上させつつ、記録密度を向上させる機構・サーボ制御技術を提案しなくては受け入れられない。この分野におけるブレークスルーのトピックスにはロードアンロード機構が挙げられる。

2.3 精度設計—位置決め系の開発フレームワーク

位置決め精度の要求は、記録トラックと再生時のヘッド軌跡とのずれ、および隣接トラック信号との干渉による再生信号のS/N比の低下がどれだけ許容されるか、から求められる。この自己トラックと隣接トラックとの距離と、記録時と再生時のヘッド軌跡のずれに仕様を与えることは、TMRバジェット設計(track misregistration budget)

Table 2 Three major areas of work on improving positioning systems

<p>1. Position signal quality Servo signal Servo track writer</p> <p>2. Reduction of error factors Reduction of disturbances due to disk rotation (windage) Reduction of disturbances due to seek Reduction of external disturbances</p> <p>3. Increase of disturbance-reduction capabilities Increase of servo bandwidth Disturbance compensation by feedforward</p>

**Fig. 2** Position signal.

としてよく知られている。この値から位置決め系の位置決め誤差要因に配分される。つまり磁気記録系の主要仕様である目標エラーレートから、オフトラック量への仕様が配分される。このオフトラック量は位置決め誤差因子に配分される^{1), 2)}。本稿ではこの部分におけるフレームワークを説明する。

位置決め系の精度設計では、まず基準となる位置信号の品質が問題になる。HDD 位置決め系に限らず、すべての位置決めシステムにおいて、測定できる状態量と制御したい状態量の差を明確にすることが出発点である。両者が異なる場合には（ほとんどの位置決めシステムはこれに相当する）そのずれを誤差因子に含めなくてはならない。次に測定系の精度がある。これらを含めてここでは基準位置信号の品質、と呼んでいるが、まずこの品質を確保する技術を挙げなければならない。

次に、ヘッドは基準位置信号に簡単に追従できない。その理由は、さまざまな外乱がありこれがヘッドとトラックの間の位置ずれを生じさせているからである。この外乱の低減が2番目の位置決め系開発テーマである。これは位置決め系における機構技術開発にほぼ一致する。

次に、外乱はHDD 外部からやってくるものもあれば、ディスクが回転することによって発生する外乱もあり、完全になくすことはたいへんに難しい。そこで、外乱が入ってきてもヘッドとトラックの相対位置ずれを起こしにくくする、またはずれを直ちに小さくする必要がある。これをここでは誤差圧縮技術と呼ぶ。これが3番目の位置決め系開発テーマである。この技術開発はほぼサーボ制御技術の分野に属する。

以上のように、位置決め系の技術開発においては、基準となる位置信号の品質向上、外乱そのものの低減、外乱を圧縮する技術、の三つに分類して考えることができる (Table 2)。以下では、それぞれの技術および将来課題について詳述する。

3. 基準位置信号の高品質化技術

3.1 基本構成

まず測定量と制御量がどの程度一致しているかの検討が

必要である。HDD の位置決め測定系は、独立したセンサを設けている一般の位置決めシステムと異なり、製品の中にセンサを埋め込んでいる。そこで、センサを埋め込むという作業における品質と、センサそのものの品質、について分離して議論する必要がある。

Fig. 2 は、位置信号について記述したものである。位置決め系において制御したい量は、ヘッドとトラックとの相対位置である。ディスクのトラックに一定間隔で特殊なパターンをあらかじめ書き込んでおき、そのパターンをヘッドが検出することによってヘッドがトラックからどれだけずれているかを測定できるようになっている。したがって、HDD の位置決め系においては、制御量と測定量は一致していることがわかる。なお、現在では記録ヘッドと再生ヘッドが分離しているので、この二つのヘッドの距離をあらかじめ測定しておき、位置決め時には補正をしなくてはならない。この点で完全なフルクロズドループとは言いがたいが、制御量と測定量との間の誤差は非常に少ない。

センサは、再生ヘッド、トラック上の特殊なパターン（これをここでは位置信号と呼ぶ）、処理回路からなっている。また位置信号は、あらかじめサーボトラックライタと呼ばれる生産設備で書き込んでおかななくてはならない。以下では、ヘッド、位置信号などからなるセンサの性能と、サーボトラックライタの性能について詳述する。

3.2 位置信号

位置信号は、トラック番号を表す領域、トラック内で連続的な位置情報を与える領域、およびその他の領域からなる。主要な課題は、連続的な位置情報を与える領域における位置信号の分解能、精度、直線性、および安定性である。分解能とは区別しうる LSB (least significant bit) がいくつの変位を表しているかであり、HDD の場合再生ヘッドの感度向上に伴って自動的に向上してきている。精度とは真の位置と測定値とのずれおよびばらつきを合わせた総合的なよさであり、HDD の場合直線性と安定性で考えるとわかりやすい。位置信号のもう一つの課題は検出頻度である。

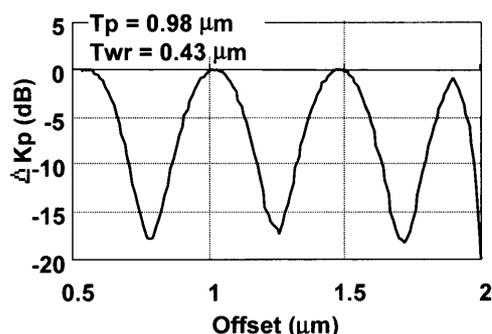


Fig. 3 Simulated position-linearity deterioration.³⁾

(1) 直線性: Fig. 2は位置信号の一例であるが、四つのバースト信号をヘッドが検出し、その検出電圧の差分からトラック中心位置との変位を求める。バースト信号はトラック幅いっぱい書かれるため、ヘッドがトラック中心から大きく外れるとA-Bの信号は飽和して直線性がなくなる。そこでその代わりにC-Dの信号に切り換え直線性を維持する。ヘッドの感度分布が一定と仮定すると直線性を確保できるが、感度分布がある場合さらにはその分布が非対称である場合、直線性は確保できない。信号の記録動作は、トラックの中心位置に位置決めして行うので、直線性はあまり問題にならないが、再生動作のときは、記録ヘッドと再生ヘッドとの位置ずれを補正して再生ヘッドを記録された信号の中心にもっていかなくてはならないので、オフセットした状態で信号を再生する。ヘッドはピボット中心に揺動動作を行うため、ディスクの内周と外周とではヘッドの軸とトラックとのなす角度が異なってくる。したがってこのオフセット量も変化するために再生ヘッドを位置決めするときは、直線性がないと検出ゲインが変化しサーボ特性に影響を与える。

再生ヘッドの感度分布を正規分布の形状としバースト信号が一定の場合、オフトラック方向における検出された信号は両者のコンボリューションになりFig. 3のような形状になる³⁾。Fig. 3において縦軸はヘッドの検出感度の変化量を表している。したがってトラック中心での検出感度を基準とすると(0 dB)、オフセット量に応じて検出感度が図のように変化し、これが直線性の悪化を示している。そこで再生ヘッドの幅(T_{wr}) (や感度分布)とトラックピッチ(T_p)との関係が重要になる。注意しなくてはならないのは、 T_p は位置信号におけるピッチであり、必ずしもこのピッチをデータトラックピッチにしなければならない必然性はないということである。なおこの直線性は制御的な手法で一部補償可能である。

(2) 安定性: ヘッド感度分布の変化などの特性変動は位置決め系のセンサとして好ましくない。ヘッドの安定性は記録密度の向上に伴い大きな課題になっているが、センサとしては直線性の変化が問題であり、これを考慮したヘッド開発が必要である。

Table 3 Servo track writers

STW	Advantages
Push pin STW	Used in existing major methods, has to be used continuously.
Non contact STW	Remove in fluences coming from mechanical contact at push pin STW.
Media STW	Lower cost, positioning accuracy can be enhanced by additional mechanisms.
Self STW	Lower cost, some alternatives to write more accuracy patterns.
Pattern printing STW	Lower cost, several business models exist.

(3) 検出頻度: 位置信号はデータトラックにある一定間隔で書き込まれているため、位置信号の検出はサンプリング動作となる。以前から光ディスク装置のような連続的な位置検出のできるしくみの研究が行われてきたが、現時点では、信号のS/Nを確保しつつ現行方式でいかにエリアを増やさずに必要なサンプル数を確保するかというテーマが中心と思われる。

3.3 サーボトラックライタ

サーボトラックライタ(STW)は製造段階で、ディスク面上に特殊なパターンである位置信号を書き込む生産設備である。位置信号を書き込む方式としてTable 3に示すようにプッシュピン方式、非接触方式、メディアSTW、セルフSTW、および磁気転写方式が考えられている。

(1) プッシュピン方式⁴⁾: この方式は、ヘッド支持部にピンをあて、ピンの反対側にポジションと呼ばれる駆動機構を設けてこれによってピンの位置を制御する。ピンとヘッド支持部とはバイアス力がかかることにより一体で移動するので、ポジションによってヘッドをディスクの半径方向に少しずつ移動させ、位置信号を書き込む。一方、周方向にはクロック信号を書き込むクロックヘッドが用意され、一定のパルス列を書きそれを読むことによって周方向に同期した位置信号を書き込むことができる。この方式は従来から多く用いられており現在でも主流である。トラック密度の向上とともに、ポジションのセンサであるエンコーダの分解能やピンの剛性が課題になっている。エンコーダは線形性のための内挿技術など非常に進んでおり精度が高い。この方式は、ポジション、プッシュピン、クロックヘッドなどが必要で構造的に複雑であり高価になることと、STW時にはHDDのカバーを外したり、クロックヘッドを入れるための穴をベースにあけるなど剛性上望ましくないことが問題である。

(2) **非接触方式**^{5), 6)}: プッシュピン方式は、ピンがヘッド支持部を直接押す方式になっているので、振動が発生しやすい。そこで、エンコーダ側とヘッド側との距離を検出し一定になるようにフィードバック制御しながら、エンコーダからの位置指令を徐々に変えてサーボライトする非接触方式も提案されている。この方式はプッシュピンなどメカニカルな課題を取り除いたため高精度であるが、ヘッド側の例えばアーム部に位置検出のためのしくみが必要になる。さらに、アーム部に廉価なスケールを貼り付けてこれを直接測定し、VCMでヘッドを移動位置決めする方式も提案されている⁷⁾。これはエンコーダの代わりにシンプルなスケールを用い、HDDのVCMを利用するという点で精度を出しやすい。

(3) **メディア STW**⁸⁾: この方式は、ディスク単体状態で位置信号を書き、そのあと装置に組み込む方式である。高精度な静圧軸受スピンドル上に多くのディスクを積層し、専用のヘッドでサーボライトする。専用のメカニズムであるので、機構的にいろいろな工夫がしやすい。またヘッドもSTWに取り付けられたヘッドであるので、より高品質なヘッドを選択的に用いることもできる。位置決めはエンコーダで行う。一方、サーボライト後に装置に組み込むので、位置信号のトラックはかならず偏心する。ディスクのクランプの方法によっては、ディスクの変形によるトラックの高次の変形が生じ、これが高次の回転同期振動モードになる。このため、HDDでのヘッド位置決め時には1次から数次までの回転に同期した振動成分に追従しなくてはならない。また偏心が大きい場合には半径方向のみならず回転方向にも影響するため回転ジッタの増大を見込まなくてはならない。この方式は、偏心の問題を後述のサーボ制御方式で解決することと、専用のSTWにて書くため精度が上げられる。また、一度に多くの枚数のディスクがサーボライトできるので、設備投資に対して有効である。

(4) **セルフ STW**^{9), 10)}: この方式は、専用の回路を付加するだけで機構的には製品の状態でサーボライトを行う方式である。エンコーダやクロックヘッドなど外部の測定系を用いないで、自分のヘッドだけでタイミングをとり位置決めを行い位置信号を書く。設備投資としては最も安い。この方式では精度的に不安があるとして、あらかじめ位置信号をメディアSTWなどで少量書き込んでおき、それを種としてセルフSTWする方式も提案されている(ハイブリッドSTW)。

(5) **磁気転写方式**^{11)~14)}: この方式は、CDやDVDのようにマスタディスクを半導体のプロセス技術を適用して作製し、このマスタディスクとディスクとを接触または非接触状態にさせて、マスタディスクのパターンをディスクに転写させる方式である。マスタディスクの精度はリソグラフィの精度に従って向上する。設備は大掛かりだが、転写時間はディスクの数回転分なので、生産性は他の方式に比

べて良好である。転写精度や、接触させる場合はコンタミネーションの問題などが考えられるが、これらはおおむね解決されている。実用化の方法として、最終の位置信号パターンをこの方式で書き込む場合と、特殊な位置情報をこの方式で書き込み、あとはHDDの中で最終の位置信号を書き込む場合が考えられている。またこの磁気転写をHDDメーカーが行うのか、ディスクメーカーが行うのかといったビジネスモデルもいくつか検討されている。

以上、いくつかの現在実用化されていたり、開発中のSTWを紹介したが、STWは設備投資が大きく、仮に同じ生産量でも機種が変わりトラック本数が増えるとSTW時間が長くなり生産性が落ちてしまう。それを補うためにさらにSTWを購入しなくてはならないため、ビジネスとしてはいかに安価なSTWを実現するかが大きな課題になっている。近年ではトラック密度が100 kTPI(トラックピッチ=254ナノメートル)に近く、ピッチ誤差は数ナノメートルを要求されている。そのため今後のさらなる記録密度向上に対応するためには、どのSTW方式が精度確保の観点で有望であるのか、といった点も大きな課題になっている。

価格の点ではプッシュピン方式が最も不利である。メディアSTWと磁気転写方式の生産設備は高価であるが大量生産ができるので単価としては安価である。セルフSTWは設備そのものが安価である。

一方、精度の点ではどの方式とも原理的には200 kTPI程度は対応できると言われている。問題は、エンコーダの精度やマスタディスクの精度から位置信号のピッチ精度までの間にどれだけの誤差因子が介在し、それをどれだけ排除できるか、である。つまり、測定量と制御量(制御したい状態量)との間の誤差が大きくそれが排除しにくい場合は、その方式は精度向上の維持が困難になると考えられる。

別の課題としてHDDメーカーには現在生産を続けるのに必要な多くのSTWがある。その資産をいかに活用するかがコストに大きく影響するため、既存のSTWをいかに使いこなすか、違う方式のSTWを導入する場合はどのように両者を使い分けるか、それらを考慮した上でSTW技術開発を進めなくてはならない。

4. 外乱因子とその低減技術

4.1 外乱因子の分類

Fig. 4に位置決め精度に影響を与える外乱を模式的に示す。HDD外部からの外乱と内部で発生する外乱とに分類される。外部からの外乱で位置決め精度上最大の課題は、装置に回転を起こさせる外乱である。ヘッドを支持するアクチュエータは、揺動軸周りでバランスがとれているので、回転以外の外乱に対しては影響を受けにくい。しかし回転外乱に対してはフィードバック制御の帯域の範囲でし

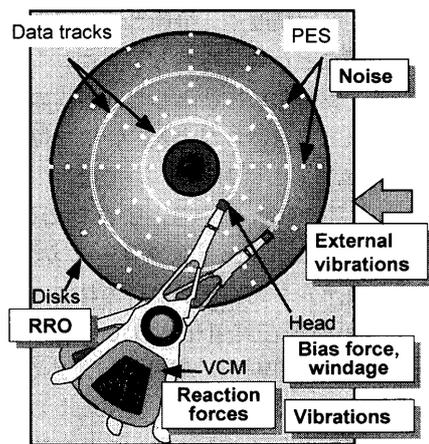


Fig. 4 Disturbances influencing positioning accuracy.

か圧縮できないので、帯域を越える周波数の外乱に対しては容易にオフトラックを起こすという問題がある。一方、装置内部の外乱は、ディスクの回転に伴って発生する振動と、シーク時（ヘッド移動時）の反力である。

4.2 装置内部で発生する外乱とその低減

この外乱は、(1) 定常的なディスクの振動、(2) 定常的なヘッドの振動、および(3) シーク時の非定常的な振動、に分類される。

(1) ディスクの振動は主に、モータ振動とディスクフラッタである。モータは最近では動圧流体軸受が主流になってきたので、軸受に起因した振動はほとんど無視できるようになった。そのため回転数の低い2.5インチHDDにおいては回転に非同期な位置決め誤差は十分に少ない。一方、高速回転のHDDにおいては、ディスク回転に伴って発生する円板間の空気の圧力変動によりディスクの面外振動が生じ、これが位置決め誤差として見えている。この振動（フラッタ）は、圧力変化を起こさせにくいような構造、すなわちディスクの外縁に可能な限り接近させて固定壁を設けてディスク上下間の流れの出入りを抑えるシュラウド構造や、ディスク間に適切な形状の板を挿入して流れを制御するスポイラ構造を設けることにより低減できる。ディスク厚、ディスク径を大きくすることによっても振動を下げる事が可能である。

(2) サーバHDDなど高速回転の機種では、風乱によってヘッドが振動しやすい。そこで、ヘッドに流れる風量を下げるためにディスクからVCM側に流れを導くような流路を設け、ヘッド振動を低減したり、ヘッドを支持するサスペンションやアームの形状を工夫し、振動しにくくする工夫がなされている。

風乱に起因するディスクやヘッドの振動低減のために、流れの解析や測定方法の開発など基礎研究も盛んになってきており、flow induced vibration (FIV) と呼ばれる流れに起因した振動の低減メカニズムの開発は、今後のHDD

の位置決め系向上にとって最も重要な課題の一つである¹⁵⁾。

(3) シーク時にはシーク時間をできるだけ短くするために、最大加速、最大減速が望ましい。このとき、シーク反力がベースに伝わり、ディスクを加振する場合がある。そこで、ベーススピンドル系の振動モードを考慮したシーク駆動パターン設計が必要とされる。またシーク時にヘッド支持系が加振されて目標トラックに到達したあと残留振動として残る場合がある。これはヘッド支持系に多くの共振点があるため、機構だけでこの振動を止めることは困難である。この場合は制御系で共振を励振しにくい駆動方式が有効である。

4.3 装置外部からの外乱とその低減

サーバHDDでは、複数のHDDを筐体に入れるため、相互の回転振動やシーク時振動が外乱となる。HDDの支持方法に工夫を行い外乱を遮断する方法もあるが、スペースが制限される場合には困難な場合が多い。HDDに回転を起こさせる外乱に対しては、次章に示す制御系での対応が有効である。

5. 誤差圧縮技術

ここでは、外乱から制御量であるヘッドとトラックとの相対変位までの間の伝達特性をいかに小さくして外乱の影響を下げるか、といった技術について述べる。この技術は、制御帯域を上げて広い周波数範囲での外乱を圧縮するためのフィードバック制御技術と、特定の外乱を相殺するフィードフォワード制御技術に分類される。またこれらは新しいセンサやアクチュエータを付加する技術と、既存の構成で性能を上げる技術とも分類される。

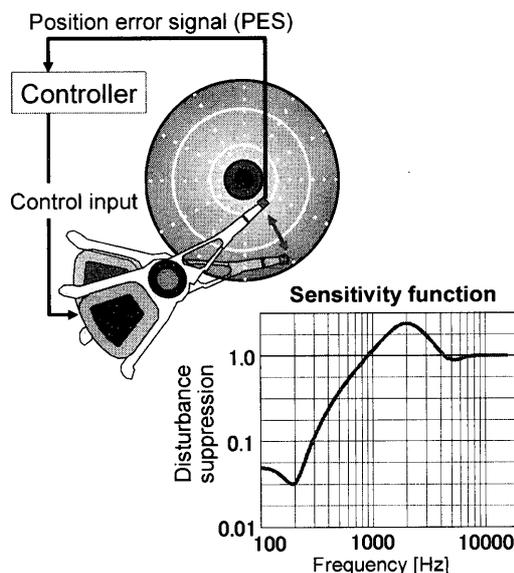


Fig. 5 Servo control structure to suppress disturbances.

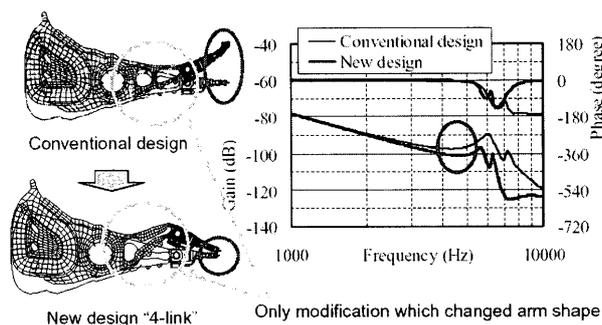


Fig. 6 Newly designed actuator and its characteristics.

5.1 フィードバック制御

誤差圧縮の代表的な技術は、ヘッド位置決めフィードバックサーボ系の広帯域化の技術である。Fig. 5 にサーボ系のブロック線図とこの制御系の感度特性を示しており、感度特性は誤差圧縮の程度を表している。0 dB より小さいところでは、その値分だけ外乱に起因した位置決め誤差を圧縮できる（-20 dB は 10 分の 1）。したがって制御系を広帯域化すること、すなわち 0 dB 以下の周波数範囲を拡大することが、外乱圧縮性能を向上することにつながる。

広帯域化を実現するために必要なことは、(1) 必要サンプリング周波数の確保、(2) 安定性の確保、の 2 点である。(2) は、機構系の共振特性、および系に含まれるむだ時間や位相遅れによって決められる。機構系の共振に対して安定性を確保する方法として、共振ゲインを小さくするノッチフィルタの挿入が従来から用いられてきたが、これは位相を遅らせてしまうのでいつも効果があるとは言えない。最近では機構共振の位相特性も考慮して制御系を設計する動きがあり、この場合はたとえ共振ピークが高くても位相が安定領域にあるならば安定であるので、そうなるような機構、制御系の設計が進められている¹⁶⁾。また、機構共振があっても、ヘッド先端での振動振幅を小さくするような方式の開発も行われている。Fig. 6 に示すように、アームに 4 節リンクの機能を実現させるように形状を工夫することで、共振周波数におけるヘッド先端部の変位を低減できる。その結果ゲイン余裕が大きくとれて安定性が確保でき、この場合では従来に比べ 300 Hz サーボ帯域の向上が実現できている¹⁷⁾。

かなり以前から広帯域化の切り札として研究開発が進められてきている 2 段アクチュエータであるが、実験結果から帯域の拡大、これによる位置決め精度の向上が実証されている。Kobayashi らは、Fig. 7 に示すサスペンションを PZT で駆動する 2 段アクチュエータを試作し、クロスオーバー周波数 2 kHz を達成し、風乱に起因した位置決め誤差量を 23% に低減した¹⁸⁾。Kurihara らは、スライダを PZT で直接駆動するマイクロアクチュエータを開発し 30

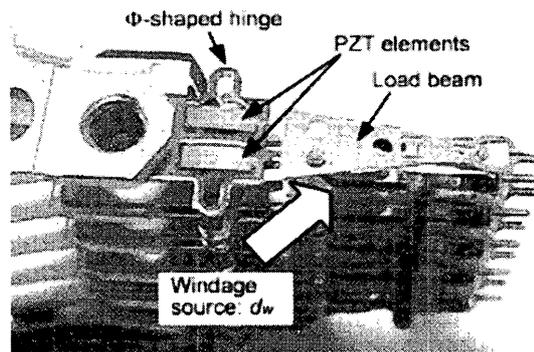


Fig. 7 Dual stage actuator.

V で 0.93 μm の変位、共振周波数 25 kHz を実現している¹⁹⁾。これは現状製品の 2 倍以上の周波数であり、サンプリング周波数との兼ね合いもあるが 3 倍近い帯域の拡大が期待される。また Fujita らは、ヘッド素子を直接駆動する第 3 世代マイクロアクチュエータの試作を行っている²⁰⁾。

ダウンサイジングに伴い機構系の共振周波数は高くなる傾向にある。これによりサーボ帯域を高くしても十分に外乱を圧縮できなくなってきた。今後は選択的な外乱圧縮のためのより精密なループ整形技術などが必要になってくると思われる。

5.2 フィードフォワード制御

制御系の帯域を上げるだけでは、ある特定の周波数成分またはある決まった外乱に対して、十分に圧縮効果を発揮できない場合がある。そのときには外乱を測定または同定してそれを相殺するような信号を加えることによって誤差を圧縮する方法がある^{1), 2)}。

前章で述べた HDD に回転振動を発生させるような外乱に対しては、回転振動でディスクが動く分ヘッドも動かすようにすればよい。このために加速度センサを設けてその外乱を検出し、制御系にフィードフォワードとして入れ込む。センサの検出精度が課題であり、位置決め方向以外の自由度の外乱をセンサが誤って検出すると、位置決め精度を悪化させるようなフィードフォワード信号を出してしまう。したがってセンサの取付け方や取付けた場所の振動特性を考慮する必要がある。

回転に同期した振動は、隣接するトラックも同様な振動を起こしているならば問題にはならないが、STW 時の回転非同期振動はそのままサーボライトされてしまい、これが回転同期外乱になる。これはもともとが回転非同期であるから隣接トラックのそれとは異なり、トラックピッチ誤差の原因になる。またこれらは周波数が高い場合があるため、フィードバック制御系では圧縮しきれない。そこでこれら回転に同期した振動に対しては、あらかじめその成分を求めておきフィードフォワードで相殺する。さらに高次の同期振動に対してはこれもあらかじめ求めておき、今度は逆に位置信号からその成分を取り除くようなフィード

フォワード信号を入れこんで非追従にする, という方法も提案されている。

フィードフォワード技術は, 本稿では触れないが高速なシークを実現する手段として発展してきた。この技術は, 対象のモデルを内部にもつ必要がある。今後はより精密なフィードフォワード制御を行うために個々の対象の現在の特性を反映する適応制御のアプローチが必要になってくると思われる。

6. おわりに

高記録密度のための位置決め技術を概観した。位置決め技術は, (1) 基準位置信号の品質向上, (2) 外乱の低減, および (3) 誤差圧縮能力の向上に分類できることを示し, それぞれに対して現状の技術と課題を紹介した。なお, 位置決め制御技術に関する網羅的な解説として文献 1, 2 がある。

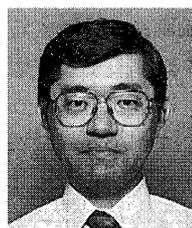
将来の HDD における位置決め系の課題であるが, 一つは代替記録技術への対応がある。垂直磁気記録, ディスクリット媒体, および熱アシスト記録などが提案されているが, 装置として成立するためにはこれらの媒体に位置信号を書き込み, かつヘッドで位置決めしなくてはならない。これらはまだ十分に研究されているとは言えず将来の課題である。

参考文献

- 1) T. Yamaguchi: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, *Journal of Systems and Control Engineering*, **215-15**, 549 (2001).
- 2) T. Yamaguchi: *Journal of Institute of Systems, Control and Information Engineers*, **46**(2), 55 (2002).
- 3) K. Akagi, K. Yasuna, and K. Shishida: 2003 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conf. on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, P-MC-02, p.361 (2003).
- 4) Brown, Sri-Jayantha: *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, **39**(2), 409 (1990).
- 5) Y. Uematsu and M. Fukushi: *Fujitsu Sci. Tech. J.*, **37**(2), 220 (2001).
- 6) S. Weerasooriya, T. Huang: *IEEE Trans. Magn.*, **32**(5), 4004 (1996).
- 7) Y. Uematsu, M. Fukushi, and K. Taniguchi: *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 964 (2001).

- 8) K. Takaishi, Y. Uematsu, T. Yamada, M. Kamimura, M. Fukushi, and Y. Kuroba, *IEEE Trans. Magn.*, **39**(2), 851 (2003).
- 9) G. X. Guo and J. Zhang: 2003 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conf. on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, MCK-1, p. 1 (2003).
- 10) M. Shultz, E. Yarmchuk, B. Webb, and T. Chainer: *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 1878 (2001)
- 11) S. Nagao, T. Yasunaga, and R. Sugita: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **27**, 68 (2003).
- 12) K. Takaishi, Y. Uematsu, T. Yamada, *et al.*: Asia-Pacific Magnetic Recording Conference, BA6-01 (2002).
- 13) T. Ishida, K. Miyata, T. Hashi, *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **39**(2), 628 (2003).
- 14) K. Miyata, T. Ishida, *et al.*: JSME, IIP2001, No. 01-8, 157 (2001).
- 15) H. Shimizu, T. Shimizu, M. Tokuyama, H. Masuda, and S. Nakamura: *IEEE Trans. Magn.*, **39**, 806 (2003).
- 16) T. Atsumi, T. Arisaka, T. Shimizu, *et al.*: *Trans. Japan Society of Mechanical Engineers, Ser. C*, **68**(675), 3298 (2002).
- 17) T. Arisaka, T. Shimizu, H. Masuda, T. Atsumi, and G. Nakamura: 2003 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conf. on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, MC-22, p. 187 (2003).
- 18) M. Kobayashi, S. Nakagawa, and S. Nakamura: Asia-Pacific Magnetic Recording Conference, BA4-01 (2002).
- 19) K. Kurihara, T. Mita, M. Hida, S. Koganezawa: 2003 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conf. on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, MC-03, p. 10 (2003).
- 20) M. Mita, H. Toshiyoshi, and H. Fujita: Asia-Pacific Magnetic Recording Conference, CP3-01 (2002).

(2003年12月7日受理)



山口高司 やまぐち たかし

昭56 東京工業大学大学院精密機械システム専攻修士課程修了, 同年 (株)日立製作所機械研究所入社, 昭61より1年間, カリフォルニア大学バークレー校客員研究員, 平13 (株)日立製作所ストレージシステム事業部, 平15 日立グローバルストレージテクノロジーズ技術開発本部機構制御システム開発部, 現在に至る。
専門 制御工学 (工博)