マイクロ光ヘッド用アクチュエータの設計と位置決め制御* (コロケーションタイプを実現する設計指針)

南 條 義 人^{*1}, 下 倉 健 一 朗^{*1}, 木 暮 賢 司^{*1}

Design and Positioning Control of Microhead Actuator for Optical Disk Storage System (Design Guidelines for a Collocation-Type Actuator)

Yoshito NANJO, Ken-ichiro SHIMOKURA and Kenji KOGURE

This paper describes the mechanical design of a microhead actuator for disk storage systems and its positioning control method. A new concept called "quasi collocation" is introduced to discuss the stability of positioning control systems for the structure. A simple actuator model is fabricated, and its dynamic characteristics are numerically and experimentally examined. On the basis of these results, a sensor and driving coils are positioned appropriately to achieve the quasi collocation. A trial servo system for this actuator experimentally confirms a wide control bandwidth beyond the mechanical resonance frequency.

Key Words: Mode of Vibration, Modal Parameter, Transfer Function, Microhead, Disk Storage System, Quasi Collocation, Servo System

1. 緒 言

情報化社会の発展に伴い、記憶装置に対する高密度・高速化が要求されている現在、代表的に用いられているファイル記憶装置は、光ディスク装置と磁気ディスク装置である。磁気ディスク装置は、光ディスク装置に比較してヘッド構成がシンプルかつ軽量であるため高速アクセスが可能だが、トラック幅が十数 μm とトラック密度が低い。一方、光ディスク装置は直径約1 μm のピット記録により、磁気ディスクの約十倍の面記録密度を実現しているが、ヘッド構成の複雑さにより大形化は避けられず、高速アクセスを可能とするための光ヘッドの軽量化・小形化が課題となっている。

以上のような両者の欠点を克服すべく、磁気ディスク装置ではミクロンオーダーの狭トラック化の研究が進められ⁽¹⁾、光ディスク装置では光学系を極限にまで簡素化し、浮動ヘッドに装着可能な光集積ヘッドが提案されている⁽²⁾。すなわち、高速・高密度を追求する両者の将来形態の一つは、狭トラック・小形ヘッドという

点で同様の位置決め機構と性能を必要とし、その課題も共有すると考えられる。

ファイル記憶装置の位置決め機構としては、数十mmのストロークを高速でシークし、かつ0.1 μm オーダーの精密位置決めを実現するアクチュエータの実現が必須課題である。本研究では、以上のような要求を満たすマイクロヘッド用アクチュエータ(MHA)の基本構成を提案し、その設計指針を明確にした。

アクチュエータの軽量化および高帯域化を図る場合、制御帯域内に振動モードが複数個存在することは避けられない。このため位置決め制御系と機構振動系とを分離した設計は困難となり、機構と制御の一体化設計が不可欠となってくる⁽³⁾。

機構系と制御系の一体化設計は、例えば大形柔軟宇宙構造物(Large Space Structure-LSS)の振動制御にみられる。検出部と駆動部を同一地点に配置してコロケーションを成立させ、DVFC法(Direct Velocity Feedback Control)を用いる効果的な振動制御手法が報告されている⁽⁴⁾。また、共振と反共振を相殺し、陽には振動モードが現れないように構造最適化を行った光ヘッドアクチュエータの例も報告されている^{(5)~(7)}。しかし、マイクロヘッド用アクチュエータは振動モードが制御帯域近傍に複数個存在するうえ、機構が小形で

* 平成2年3月31日第67期通常総会講演会において講演、原稿受付 平成4年1月21日。

^{*1} 正員、NTTヒューマンインタフェース研究所(●180 武蔵野市緑町3-9-11)。

あるための制約も多く、これらの手法をそのまま適用することは難しい。

そこで本稿では、簡便に制御系の安定性を確保するため、駆動部と検出部の配置のみに着目した設計指針を示す。まずコロケーションの成立条件を緩和した疑似コロケーションの概念を定義し、疑似コロケーションが成立する場合、閉ループ系は大域的に漸近安定となることを解析的に示す。疑似コロケーションが成立する系では、駆動点と検出点は完全に同一である必要はなく、容易に制御系の安定性を確保できる。この位置決め制御系は、モデル化した制御対象中のすべての振動モードに対しネガティブフィードバックを施すことになるので、Balas⁽⁴⁾の手法の拡張と捉えることもできる。

次に試作したマイクロヘッド用アクチュエータについて、疑似コロケーションが成立する領域を求め、位置決め制御系が安定となる駆動部と検出部の配置例を示す。さらに位置決め制御系を構成し、複数の機構共振を超える制御帯域が実現できることを実験的に示す。

2. MHA の構成

光集積ヘッドはレーザダイオードとフォトダイオードだけからなる微小ヘッドであるため⁽²⁾、従来の磁気ディスク装置同様に浮動ヘッドスライダ技術を応用することでフォーカスアクチュエータを用いることなく、ヘッド-媒体間距離を一定に保持でき、構成の簡素化および軽量化が可能である。

図1に具体的な光集積ヘッド用アクチュエータ構成例を示す。フォーカス方向のヘッド位置決めには、スライダ機構を用いている。これにより光集積ヘッド-媒体間の距離は空気力学的にパッシブに一定に保持される。トラッキング方向のヘッド位置決めには、コースポジションナおよびファインアクチュエータを用いる。コースポジションナは、長ストロークシーク、あるいはディスクの偏心に対するマクロな位置決め、ファインアクチュエータはトラッキング等の精密な位置決め用いられる。ファインアクチュエータはコースポジションナに固定された磁石とスライダに装着された電磁コイルにより駆動される。

本構成の特徴は、従来の光ディスク装置のフォーカスアクチュエータを省略することにより、従来の磁気ディスク装置同様のシーク速度が期待でき、かつコースおよびファインの二段アクチュエータの採用により、従来の光ディスク装置同様の位置決め性能が期待できることである。しかし、スライダ支持機構には、ヘ

ッドが媒体上に安定浮上する必要性から、ローリング、ピッチングおよびフォーカス方向に柔軟性が要求され、同時にヘッド位置決めの必要性からトラッキング方向の柔軟性も要求される。このような柔軟機構の位置決めでは、目標制御帯域近傍に複数の振動モードが存在することは避けられず、機構系の特性を無視した制御手法では制御系の安定性を確保しつつ、望まれる制御性能を実現することはできない。

制御対象の構造が、駆動部と検出部を完全に同一に配置されたコロケーション系であれば、例えばLSSの振動制御に用いられるような各種制御手法により制御系を安定化することは比較的容易である。しかし、マイクロヘッド用アクチュエータの場合は機構的な制約が大きく駆動点と検出点を完全に同一にすることは困難である。

そこで、振動モード解析結果に基づいた疑似コロケーションの概念を導入し、駆動部と検出部の配置に関するアクチュエータの設計指針を示す。まず3章において、疑似コロケーションの意味と、疑似コロケーションが成立する動力学モデルの位置決め制御系は安定となることを解析的に示す。

3. MHA の設計指針

3.1 疑似コロケーション まずはじめに疑似コロケーションの理解を深めるために、いくつかの仮定を置き、構造物上の駆動点から検出点までの伝達関数

図1 MHAの構成例

がコロケーションタイプとなるモデルパラメータの条件を考察する。なお、ここでいうコロケーションタイプとは、周波数領域において低周波域から高周波域へと進むにつれて共振と反共振が交互に現れる場合をいい、位相が0〜180 deg 内にとどまることをいう。

入力 U_d が柔軟構造物上の点 d に作用し、変位 Y_s が同構造物上の点 s で検出されるとき、振動モード解析結果を用いると伝達関数は次式となる⁽⁸⁾。

$$g(j\omega) = \frac{Y_s}{U_d} = \sum_{i=1}^N \frac{\phi_{is}\phi_{id}}{-m_i\omega^2 + c_i j\omega + k_i} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ϕ_{id} , ϕ_{is} は i 次モードにおける駆動点 d および検出点 s における固有ベクトル成分、 m_i , c_i , k_i は i 次モードにおけるモード質量、モード減衰、モード剛性、 N はモデル化した制御対象が持つ振動モードの数、 ω は角振動数、 j は虚数単位である。なお、コロケーションが厳密に成立する場合は、制御対象が持つすべての振動モードにおいて $\phi_{is} = \phi_{id}$ が成立する。

図2にコロケーションタイプの伝達関数概略図を示す。まず、 N 個の振動モードのうち、一、二次の振動モードのみを考慮した動力学モデルを考える。簡単のため $c_i = 0$ とし、 $m_i = 1$ と正規化すれば、伝達関数は次式で表される。

$$\begin{aligned} g(j\omega) &= \frac{\phi_{1s}\phi_{1d}}{-\omega^2 + k_1} + \frac{\phi_{2s}\phi_{2d}}{-\omega^2 + k_2} \\ &= \frac{(\phi_{1s}\phi_{1d}k_2 + \phi_{2s}\phi_{2d}k_1) - (\phi_{1s}\phi_{1d} + \phi_{2s}\phi_{2d})\omega^2}{(-\omega^2 + k_1)(-\omega^2 + k_2)} \end{aligned} \dots\dots\dots (2)$$

式(2)より、共振および反共振周波数は以下のよう

に求めることができる。

$$\begin{aligned} \text{poles: } \omega^2 &= k_1, k_2 \\ \text{zero: } \omega^2 &= \frac{\phi_{1s}\phi_{1d}k_2 + \phi_{2s}\phi_{2d}k_1}{\phi_{1s}\phi_{1d} + \phi_{2s}\phi_{2d}} \end{aligned} \dots\dots\dots (3)$$

図2 伝達関数概略図

この構造物の駆動点から検出点までの伝達関数がコロケーションタイプとなる条件は、固有ベクトル成分が次式を満足する場合である。

$$\text{sgn}(\phi_{id}) = \text{sgn}(\phi_{is}) \quad (i=1, 2) \dots\dots\dots (4)$$

式(4)が成立するとき、図2に見るように共振と反共振は交互に現れる。さらに、以上のことが二、三次モードから $(N-1)$, N 次モードのすべてにおいて成立すれば、すべての共振と反共振は周波数領域において交互に現れ、伝達特性はコロケーションタイプとなる。

以下、モデル化した N 個すべての振動モードにおいて式(4)が成立し、伝達特性がコロケーションタイプとなる構造を疑似コロケーション系と呼ぶ。

3.2 疑似コロケーションが成立する場合の閉ループ系の安定性 次に、式(4)が N 次までのすべてのモードにおいて成立する疑似コロケーション系は、ネガティブフィードバックループを構成した際、大域的に漸近安定であることを解析的に示す。

図3に柔軟構造物の位置決め制御系ブロック図を示す。図3は1入力1出力系であり、 $K > 0$ は固定フィードバックゲインである。これは線形システムだが、非線形システム解析によく用いられる popov の定理⁽⁹⁾を用いて、その安定性を容易に証明することができる。

q をある実数とすると

$$\begin{aligned} (1 + j\omega q)g(j\omega) + \frac{1}{K} &= (1 + j\omega q) \left(\sum_{i=1}^N \frac{\phi_{is}\phi_{id}}{-m_i\omega^2 + c_i j\omega + k_i} \right) + \frac{1}{K} \\ &= \sum_{i=1}^N \left[\frac{\phi_{is}\phi_{id} \{ (m_i - c_i q)\omega^2 - k_i + (c_i - k_i q + m_i q\omega^2)j\omega \}}{[-c_i^2\omega^2 - (k_i - m_i\omega^2)^2]} + \frac{1}{K} \right] \end{aligned} \dots\dots\dots (5)$$

であり、上式の実数部は次式のようになる。

$$\begin{aligned} \text{Re} \left\{ (1 + j\omega q)g(j\omega) + \frac{1}{K} \right\} &= \sum_{i=1}^N \frac{\phi_{is}\phi_{id} \{ (m_i - c_i q)\omega^2 - k_i \}}{-(c_i\omega)^2 - (k_i - m_i\omega^2)^2} + \frac{1}{K} \end{aligned} \dots\dots\dots (6)$$

popov の定理より、 ω に依存せず式(6)を常に正とす

図3 位置決め制御系ブロック図

る q が存在するとき制御系は大域的に漸近安定である。

さて、式(6)第1項の分母は負、第2項は正であり、式(4)を仮定するとき第1項の $\phi_{is}\phi_{id}$ は正である。よって、 N 次までのすべてのモードにおいて $m_i > 0, k_i > 0, c_i > 0$ を仮定するとき、

$$m_i - c_i q \leq 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

であれば、式(6)右辺は正となる。つまり、 ω に依存せず式(6)右辺を常に正にする q は存在する。

以上のことより、図3に示した位置決め制御系の大域的漸近安定性が証明された。

4. 位置決め制御系の実験と解析

4.1 MHA モデル 提案したマイクロヘッド用アクチュエータはコロケーション成立を狙いに、検出部であるヘッドが装着されたスライダを直接駆動する構成としているものの、検出部と駆動部を完全に同一点に配置することは機構の制約や加工精度の点から困難である。しかしながら、厳密にコロケーションが成立していなくても、3章で述べたように伝達特性がコロケーションタイプとなる駆動部と検出部の配置領域は存在する。そこでシンプルなマイクロヘッド用アクチュエータモデルを用いて、疑似コロケーションに基づく設計手法の有効性と、位置決め制御性能を解析的、実験的に検討した結果を以下に示す。

図4にアクチュエータモデルの構成を示す。本構成は、基本要素であるスライダ、支持部および駆動部より成る。支持部には、浮上のためのローリング、ピッチングおよびフォーカス方向の柔軟性が要求され、同時にヘッド位置決めの必要性からトラッキング方向の柔軟性も要求される。そこで安定に浮上し、かつ浮上時の一次の振動モードが並進方向となるように平行ばねを採用した。駆動部には、スライダに直接装着した電磁コイルと固定磁石を用い、小形化の要求から固定磁

図4 MHAモデルの構成

石の漏れ磁束を用いる構成とした。さらにMHAは、駆動範囲として数百 μm を確保しつつ、支持部の一次共振周波数を媒体の回転数と一致させて、偏心による外乱を効果的に抑圧する構成をとる必要がある。以上の条件と本アクチュエータの最大駆動力が約10.0 mNであることを考慮し、支持部の材質および寸法を図4に示す値に設定した。

実験はスライダを静圧空気軸受により非接触支持し、スライダの変位検出には非接触変位センサを用いた。この非接触変位センサは実機におけるヘッドに相当する。

4.2 MHAモデルの機構特性 図5にFEM振動モード解析より得られた4 kHzまでのトラッキング方向の変形が支配的な振動モード形を示す。解析によると、本モデルには4 kHzまでに捻り方向やフォーカス方向の変形が支配的な振動モードも存在する。しかし、それらがトラッキング方向に連成するレベルは微小であり、さらに浮上時にスライダ底面に発生する空気膜ばねを200 N/mmの線形ばねと仮定すると、それらの振動モードは4 kHzを超えた高周波域に移動する。以上のことより、図5に示す四つの振動モードを抽出し解析対象の動力学モデルとした。

次に固有ベクトル成分をもとに、疑似コロケーション成立領域を求めた。図6に疑似コロケーション成立

図5 トラッキング方向の変形が支配的な振動モード形

図6 MHAの疑似コロケーションの成立領域

領域を示す。図6において、点線で分割された三つの領域は、図5に示した抽出した四つのモードに対して式(4)が成立する領域であり、点線で分割された同じ領域内に駆動部と検出部を配置すれば疑似コロケーションが成立する。したがって、3章で述べたようにネガティブフィードバックループを構成した際、抽出した振動モードに関し安定となる。以上の検証を行うため、検出位置を固定し駆動位置を変化させたときの伝

達特性の違いを解析と実験により調べた。

図7(a)は点 d_1 から点 s への伝達特性、(b)は点 d_2 から点 s への伝達特性である。駆動点 d_1, d_2 は左右電磁コイルの中心位置である。減衰は $\zeta=0.005$ と仮定した。図7(a)は駆動点と検出点が図6に示した違う領域に存在するため、疑似コロケーションが成立せず、2.5 kHz付近で位相が -180 degより遅れている。一方、図7(b)では図6に示した駆動点と検出点が同じ領域に存在するため、抽出した四つのモードすべてにおいて、伝達特性はコロケーションタイプとなっている。

以上より、振動モード解析より得られた固有ベクトル成分の係数に着目して機構設計を行えば、疑似コロケーションを実現できることが実験的に確認できた。

4.3 位置決め制御特性 図7(b)に示したマイクロヘッド用アクチュエータモデルを対象に位置決め制御系を構成し、制御性能を実験的に評価した。

実際に制御系を構成する際、モデリングの際に無視した高次モードの影響(スピルオーバー)を考慮する必要がある。ここでは無視した高次モードに対して、従来の周波数領域における設計指標である位相余裕とゲイン余裕によって安定性を確保した。具体的には、4 kHzにおいて -10 dBのゲイン余裕、 40 degの位相余裕を得るように位相遅れ進み補償を用いた。

図8に誤差抑圧特性のシミュレーション結果および実験結果を示す。低周波域において、実験結果はセンサのSN比限界および回路系の共振により、シミュレーション結果とは一致していない。しかし、光ディスクの回転数に相当する40 Hz前後で抑圧ゲインは約 -50 dBであり、約1.5 kHzの制御帯域が実現できている。

以上より、疑似コロケーションを考慮した設計指針に基づけば、制御帯域近傍に複数の振動モードが存在

(a) d_1 から s への伝達特性

(b) d_2 から s への伝達特性

図7 MHAの伝達特性

図8 誤差抑圧特性

する場合でも、安定な制御系を構成できることが確認できた。ただし、図8に見るように約700 Hzと2 kHzを超えた反共振周波数では誤差抑圧率は劣下しており、今後は実用面を考慮した詳細な機構設計と制御性能評価が必要である。機構設計に際しては、本稿で提案した指針に基づきながら構造最適化手法等を利用することが有効であると考えている。

5. 結 言

マイクロヘッド用アクチュエータモデルを例として、コロケーションタイプを実現する設計指針を示し、それが位置決め制御系へ与える効果を実験的に検証した。以下に得られた結果を示す。

(1) 従来のコロケーションの条件を緩和した疑似コロケーションを定義し、疑似コロケーションが成立する閉ループ系は大域的に漸近安定であることを解析的に示した。

(2) マイクロヘッド用アクチュエータの基本構成を提案すると同時に、試作したアクチュエータモデルを例題に制御系に影響を与える振動モードを抽出し、疑似コロケーションが成立する領域を求めた。

(3) アクチュエータモデルを用いて実際に閉ループ系を構成した結果、1.5 kHzの制御帯域近傍に複数の振動モードが存在する場合でも、位相遅れ進み補償だけで安定な制御系が実現できることを確認した。

最後に、本研究を進めるにあたり、終始ご指導して

くださった(株)NTT ヒューマンインタフェース研究所柿崎隆夫主幹研究員、境界領域研究所原臣司主幹研究員、および同研究所オプトメカトロニクス研究部メンバーの皆さんに深く感謝する。

文 献

- (1) Kishigami, J., Itoh, K. and Koshimoto, Y., Three-Dimensional Pole Edge Effect on Narrow Track Film Heads, *IEEE Trans. Magn.*, MAG-24 (1988), 2841-2843.
- (2) Ukita, H., Katagiri, Y. and Uenishi, Y., Readout Characteristics of Micro-optical Head Operated in Bi-stable Mode, *Japanese J. Appl. Phys.*, Vol. 26 (1987), 111-116.
- (3) Shimokura, K. and Kakizaki, T., Dynamic Modeling and Vibration Control of an Elastic Structure using FEM, *ICAM Proc., Tokyo, Japan.* (1989), 213-218.
- (4) Balas, Mark J., Direct Velocity Feedback Control of Large Space Structures, *J. Guidance and Control*, 2-3 (1979), 252-253.
- (5) 背戸・梶原・長松・森藤, 制御性を考慮した構造最適化法による光サーボ系の設計(第1報), 機論, 55-516, C (1989), 2029-2036.
- (6) 梶原・背戸・長松, 制御性を考慮した構造最適化法による光サーボ系の設計(第2報), 機論, 55-516, C (1989), 2037-2044.
- (7) 梶原・背戸・長松・森藤・中江, 制御性を考慮した構造最適化法による光サーボ系の設計(第3報), 機論, 55-516, C (1989), 2045-2052.
- (8) 日本機械学会編, 振動工学におけるコンピュータアナリシス, (1987), 71-80, コロナ社.
- (9) 有本, 線形システム理論, (1977), 229-240, 産業図書.