

氏 名	柿 崎 隆 夫
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 3 年 10 月 9 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 54 年 3 月 東北大学大学院工学研究科機械工学専攻 前期 2 年の課程修了
学 位 論 文 題 目	動力学を考慮した揺動形アクチュエータの設計に 関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 猪岡 光 東北大学教授 江村 超 東北大学教授 長南 征二 東北大学教授 谷 順二

論 文 内 容 要 旨

ファイルメモリの中心的役割を果たしている磁気ディスク装置では、機構技術と電子技術とが相補って飛躍的な高性能化が進められてきた。中でも主要性能であるトラック密度（半径方向の記録密度）とアクセス時間（命令を受けてから記録再生が可能になるまでの時間）を支配するヘッド位置決め技術については、現在ではサブミクロンの高精度・十数ミリ秒の高速位置決めが実現されている。さらに最近の高性能大容量磁気ディスク装置においては、装置のスループットを向上させるためにマルチアクチュエータ構成も必須となりつつある。このように、ヘッド位置決め機構であるアクチュエータの高性能化には多大な努力が払われてきており、特に近年は装置の小形化、高信頼度化が大きな要求条件となっている。このため、アクチュエータから空気清浄系までの機構要素を一体化して密閉度の高い容器に収納した密閉形磁気ディスク装置が主流になり、これに伴って小形で簡易な揺動形アクチュエータが採用されるようになった。しかし揺動形アクチュエータではピボット軸回りの回転を利用して位置決めするため、ピボット軸受系の振動、さらにピボット軸や可動部であるヘッドアームなどで剛性の低い曲げモーメントの機構振動が励起されやすい。この機械共振が顕著な場合にはヘッド位置決めサーボの安定性確保のために制御帯域が制限され、装置の小形化は達成できても所望の位置決め性能を得ることが困難になる。このような問題を回避するため、揺動形アクチュエータにおいてはその動力学を考慮した高度な設計が必要となる。しかし上記の問題に対する一般性のある指針というものは未だ十分でなく、装置の開発では多くの場合技術者の経

験と直観に頼っていた。

以上のような観点から、著者は動力学を考慮した揺動形アクチュエータの設計に関する一連の研究を行った。はじめに揺動形アクチュエータで最も重要な機構要素であるピボット軸受に注目し、アクチュエータの動的特性に及ぼす影響を実験的に解明した。次にピボット部に存在するすきまの影響を解析し、高精度な軸受構成のための指針を明らかにした。さらに機構構成部品や機構アセンブリの振動特性の解明を通して、まず小形磁気ディスク装置を対象としたコンパクトな揺動形アクチュエータを、ついで装置スループット向上に不可欠な揺動形アクチュエータの動力的設計法を確立し、これらの技術を高性能磁気ディスク装置の開発へ注入した。以上により小形高密度磁気ディスク装置 (PATRY) および高速大容量磁気ディスク装置 (GEMMY) を実現した。さらに、将来のより高速高精度なアクチュエータの設計に資することをねらいに、リンク弾性やジョイント部のすきまなどを含むあらゆる動力学特性を精密に考慮した設計を可能とする、アクチュエータの3次元動的モデリング法を確立した。

本論文は第1章の序論から第7章の結論までで構成される。以下に各章の概要を述べる。

第1章 序 論

本章では研究の背景、研究の目的および各章における研究の内容について示す。

第2章 揺動形アクチュエータの伝達特性に及ぼすピボット軸受の影響

本章では揺動形アクチュエータの伝達特性に及ぼすピボット軸受の影響を実験的に検討した結果について述べる。まず、インパルス法を用いた実験モード解析により、ピボット軸受として最も一般的な単列深みぞ玉軸受のラジアルばね定数および減衰係数を求め、アキシャル予圧荷重の増大によりラジアルばね定数は増加するが減衰係数は減少すること、減衰特性は潤滑グリースに大きく依存することなどを明らかにする。次に、アクチュエータ位置決め系の機械伝達関数を求め、一般に伝達特性には軸受のラジアルばねに起因する共振および反共振が対になって現れ、この共振はグリースの減衰効果によって大きく抑圧されることを示す。以上の結果から、アクチュエータの伝達特性に及ぼす軸受の影響は軸受の動的特性から高精度に予測できることを実証する。

第3章 揺動形アクチュエータの動的特性に及ぼすピボットすきまの影響

本章では揺動形アクチュエータの動的特性に及ぼすピボットすきま(軸受嵌合すきま)の影響について論じる。まず、剛体としてのアクチュエータ可動部とピボット軸、ピボットすきま、軸受のばね・減衰特性を考慮して、平面モデルとしてのアクチュエータの運動方程式を導びく。ついで、サーボトラックランナウトに追従するための閉ループ位置決め制御系を構成するアクチュエータについて、すきまの存在によるピボット要素間の接触・非接触時の動的挙動を統一的に扱える運動方程式を導出する。さらに、サーボトラックが正弦波状に変位する場合についてシミュレーションを行い、すきまを増加させてゆくとピボット部で高周波衝突振動が発生し、跳躍現象を伴ってヘッド

位置決め誤差が増大すること、すきまとトラックランナウトとが同程度になると系はほぼリミットサイクル状態となることなどを示す。以上の結果から、ヘッド位置決め誤差や軸受弾性変形量に及ぼす軸受嵌合すきまの影響を定量化するとともに、高精度な位置決めを実現できる許容すきまの設定条件を明らかにする。最後に、すきまのあるアクチュエータを用いた実験により、解析の妥当性を実証する。

第4章 小形高密度磁気ディスク装置用揺動形アクチュエータの設計と動的解析

本章では、小形で大容量な磁気ディスク装置に搭載するための高性能かつコンパクトな揺動形アクチュエータの設計について述べる。アクチュエータの動的設計には有限要素法 (FEM) や実験モード解析法を導入する。まず、有限要素法を用いてヘッドアーム基本形状と主要振動モードとの関係、さらに形状パラメータと固有振動数との関係を定量的に明らかにする。さらにコイル質量をパラメータとしたヘッドアームアセンブリの解析により、可動部の共振周波数 2 kHz 以上を実現した結果について示す。ついでインパルス法を用いた実験モーダル解析により、揺動形に特有なアクチュエータアセンブリの主要振動モードは、ピボット軸をばねとして剛体のヘッドアームアセンブリが変位するピボットモードおよびピボット近傍をノードとするヘッドアームのベンディングモードの二つであることを明らかにする。さらに同定した位置決め系の振動モデルを用いた動的設計により、振動系と制御系の両者を考慮した位置決めサーボの特性改善手法について述べる。最後に、以上の研究によりコンパクトな揺動形アクチュエータを実現するとともに、これを 8 インチ径の小形高密度磁気ディスク装置に搭載し、平均シーク時間 18 ミリ秒以下、トラック密度 43 トラック/mm の性能を達成した結果を示す。

第5章 揺動形デュアルアクチュエータの動的解析と制御

本章では、独立に駆動可能な 2 つのヘッドキャリッジを持つ小形で簡易な揺動形デュアルアクチュエータの動的解析と制御について述べる。まず特徴的な振動の発生メカニズムについて検討し、サーボの安定性を損なう主要因の一つは微小な動的インバランスによるキャリッジのローリング振動であり、その低減には軸方向でのキャリッジの対称構造化が有効であることを示す。さらに、アクチュエータ、ディスクスピンドルを含む機構振動モデルにより振動相互干渉のメカニズムを明らかにするとともに、モデルに基づく前置補償器を用いたクロスフィードフォワードタイプの非干渉化制御によれば、高速位置決め動作時においても相互干渉を 1/3 以下に低減できることを実証する。さらに、本研究の結果を用いて 10.5 インチ径の大容量高速磁気ディスク装置に搭載するアクチュエータを開発し、スピンドル容量 2.2 ギガバイト、平均シーク時間 12 ミリ秒の装置性能を実現した結果について示す。

第6章 リンク弾性とジョイントすきまを考慮した揺動形アクチュエータの動的モデリング

本章では、複数の弾性リンクおよびすきまのあるジョイントを有する揺動形アクチュエータにつ

いて、その動的挙動を高精度に記述できる3次元動的モデリング法を論ずる。運動方程式の構成には、剛体リンクの運動記法である 4×4 行列法に加え、すきまと弾性による変位を表すための摂動法を導入する。各弾性リンクは3次元有限要素法によりモデル化し、ついでコンポーネントモード合成法を適用することにより解析自由度を大幅に縮小する。弾性リンク同士を結合する回転形ジョイントについては、構成要素の衝突および摩擦に伴って発生する各種の非線形作用力を一般的な形で定式化する。最後に2リンク揺動形アクチュエータを対象とした計算シミュレーションにより、本モデリング法によれば機構の動的特性に及ぼすリンクの弾性およびジョイントすきまの影響を高精度に解明・予測できることを示す。

第7章 結 論

本章では、本研究で得られた結果、さらに本研究が機械工学一般および機械工業に与えた効果を総括する。

審 査 結 果 の 要 旨

磁気ディスク装置の高性能化にはヘッド位置決めアクチュエータの高速高精度化が不可欠である。近年、装置の小型化に伴って揺動形アクチュエータが採用されるようになったが、この形式ではピボット軸受け系の振動、さらにピボット軸やヘッドアームなどで曲げモード振動が励起されやすいことから、機構の動力学を考慮した設計法の確立が急務となっていた。本論文では、動力学を考慮した揺動形アクチュエータの設計に関する研究成果をまとめたもので、全編7章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、一般的なピボット軸受けである単列深みぞ玉軸受のラジアルばね定数および減衰係数に及ぼす予圧加重及び潤滑グリースの影響を実験的に解明している。さらに、アクチュエータ位置決め系の機械伝達関数を導出するとともに、伝達特性に及ぼす軸受けの影響が軸受けの動的特性から高精度に予測できることを実証している。

第3章では、閉ループ位置決め制御されるアクチュエータについて、ピボット軸受けすきまを考慮した非線形運動方程式を導出している。さらに、正弦波状のサーボトラックランナウト条件下でのヘッド位置決め誤差や軸受け変形量に及ぼすすきまの影響、および許容すきまの設定条件を明らかにしている。

第4章では、コンパクトなアクチュエータについて、有限要素法および実験モード解析により、アクチュエータアセンブリなどの主要振動特性を解明し、さらに振動・制御系を考慮した位置決めサーボの設計法を述べている。設計したアクチュエータは小型高密度磁気ディスク装置に搭載され、このクラスではじめて平均シーク時間18ミリ秒以下、トラック密度43トラック/mmの性能を実現している。

第5章では、揺動形デュアルアクチュエータについて、面内外連成振動のメカニズムと低減法を明らかにするとともに振動相互干渉モデルを構築し、モデルに基づく非干渉化制御によれば干渉を1/3以下に抑圧できることを実証している。本結果によるアクチュエータは大容量高速磁気ディスク装置に搭載され、容量2.2ギガバイト、平均シーク時間12ミリ秒の性能を実現している。

第6章では、すきまを持つ3次元回転型ジョイントにおける非線形な動力学を厳密に定式化し、リンク弾性及びジョイントすきまなどの諸特性を考慮できるアクチュエータの3次元動的モデリング法を開発している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、揺動形アクチュエータの主要な動力学特性を解明し、これに基づく設計論により高性能なアクチュエータを実現するとともに、より高精度に動的挙動を記述できる3次元動的モデリング法を確立したもので、機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。