

論文の内容の要旨

論文題目

Input Multi-rate Digital Robust Control for Precise Head Positioning of Hard Disk Drives
磁気ディスクの高精度ヘッド位置決めのための入力マルチレートデジタルロバスト制御

氏 名 大野敬太郎

磁気ディスク業界は、現在大きな転換期を迎えようとしている。1990年代は、記録密度が年率100%という驚異的な勢いで向上した時代であり、関連する技術の大革新をもたらした。ヘッド位置決め制御技術も例外ではなく、マルチレート制御技術を始め、ロバスト制御、2段アクチュエータ制御、摩擦補償のための学習制御、広帯域化のための機構との統合設計技術や静音シーク制御、耐振動衝撃制御技術など、多くの研究成果が位置決め精度の改善に大きく貢献してきた。今世紀に入り、現行磁気記録方式の限界が見え始め、記録密度の向上率が鈍化傾向にあるが、新しい磁気記録方式の実用化に目処が立ち、記録密度の大幅な向上が期待されている。従って、制御系にとって位置決め精度改善が焦眉の急を告ぐ課題となっている。一方で、制御性能の安定性が今まで以上に大きく問われるようになった。これは、景気回復の牽引力となっているコンシューマエレクトロニクス(CE)市場の活況化に理由を求めることができる。CE市場の活況化により、磁気ディスク自体に対する需要が急激に増える一方で、全出荷数に占めるCE市場向けユニットの比率も1年毎に驚くほどの違いを見せている。CE市場に向けた製品の動作環境は従来のもものと異なり、より厳しい範囲で動作保証しなければならなくなっている。従って、ロバスト制御性能が大きな課題となっている。

これに対して本論文では、システムティックな設計ができることを念頭におき、CE市場を睨んだ今後の磁気ディスクのヘッド位置決め制御系をどのように構築するかについて、マルチレート制御技術を中心課題として捉えつつ、具体的・実践的な提案を行った。本論文は3部構成であり、それぞれ磁気ディスク制御の主要な課題であるシーク制御(トラック間移動)、フォロイング制御(同一トラック位置決め)、共振モード補償の各問題を扱った。第1章では、本研究の社会的背景と位置づけに触れ、研究に

至った動機と課題を延べ、本論分の構成を示した。続く第2章では、磁気ディスク装置の機構と制御系を解説し、前章で触れた課題を詳述し、これに対する従来の手法を明らかにした。

第1部では、ある現実的なクラスの不確かさに対してロバスト制御性能を有するシーク制御方法を提案した。これにより、広い範囲の環境変動に対する動作保障が可能なことを明らかにした。

第3章では、状態推定器の推定精度を改善することを考えた。具体的にはマルチレート状態推定器と可変構造推定器の長所を組み合わせた方法を提案し、理論的な考察を行った。まず提案する可変構造のマルチレート状態推定器を導出し、安定性の議論を行い、性能（推定精度の誤差空間）を明らかにするとともに、同状態推定器の設計方法を示し、設計上の制限事項を明らかにした。次いで、同状態推定器に組み合わせる線形レギュレータを示し、閉ループに関する理論的考察を行った。なお、磁気ディスク以外の用途にも供するため、すべての理論導出は多入力多出力問題として扱った。

第4章では、同方法の具体的な設計例を示し、シミュレーション及び実験により効果を確認した。始めに3.5インチのデスクトップ用7,200回転のドライブを対象に設計例を示し、ある非線形性がアクチュエータに存在することを想定し、500Hzの正弦波目標信号を用いた追従制御実験を行い、非線形性に対して十分なロバスト制御性能を有することを確認した。次いでアクチュエータのゲインが不確かであることを想定した実験を行い、同様の結果が得られることを確認した。また、より高い周波数の目標値変動に対してチャタリング等の問題が発生しないこと、さらにショートスパンシーク実験を行い、アクチュエータゲイン不確かさに対してロバスト制御性能を有することを確認した。実験は更に2段アクチュエータ型ドライブ上でも行い、同様の結果を得た。最後に、実践的な問題を取り上げた。保証動作温度範囲の限界近傍ではシーク性能が残留振動により悪化する場合があるが、これはアクチュエータピボットの非線形性が原因と言われている。こうした非線形性のモデル化が困難な実践的問題に対して、提案した方法を適用した結果、シーク応答を改善できることを明らかにした。

第2部ではフォロイング制御における位置決め精度改善の新たなブレークスルーとして、新しいマルチレート制御設計方法を提案した。具体的には、周波数重み関数によるシステムティックな設計が可能なサンプル値 H_∞ 制御設計による一般化ホールド（GHF）の導入を検討し、その実装方法を提案した。GHFの導入は制御系の構造として新しい自由度を与えることになるため、それによる性能改善効果を狙ったものである。

第5章では、GHFを磁気ディスクに適用したときの特性を明らかにすることを目的に、GHF付サンプル値 H_∞ 制御によるレギュレーション問題を考えた。ここでは機械共振等の不確かさに対するロバスト安定化問題は無視し、外乱圧縮問題のみを扱った。まず、磁気ディスク用に設計したGHFコントローラのホールド関数を調べたところ、一般に指摘されているような極度に振動的な解とはならず、また逆に言えば H_∞ 設計理論の枠組みで周波数重み関数の設定によってホールド関数の特性を十分に現実的なものにしうることを確認した。次いで同コントローラの制御性能を、他の数種類の H_∞ コントローラ（連続時間、離散時間、マルチレート離散時間）と比較した。その結果、GHF導入により制御自由度が最も高い同方法の位置決め精度が最も高いことを確認した。

第6章では、GHFの実装方法について更に検討を加え、不均質時分割ホールドを用いることを提案した。ここでの設計は実用性を重視し、GHF付サンプル値 H_∞ 制御によるサーボ問題を考えた。また前章で簡単のために無視した不確かさに対するロバスト安定化問題もここでは考慮した。設計の結果、前

章と同様、実装が比較的容易なホールド関数が得られていることを確認した。次いで、この実装方法として、GHF を不均質時分割された区間一定関数で近似することを考え、近似誤差が最小となるような不均質時分割ホールドを SQP 法を用いて設計する方法を提案した。実験の結果、従来のコントローラよりも位置決め精度を改善することが可能であることを明らかにした。一方、従来の方法で設計された 4 倍マルチレートと、今回の不均質時分割による 2 倍マルチレートを実験で比較した結果、ループ特性と位置決め精度の両方においてほぼ同様の結果が得られたことから、マルチレート倍率の低減による演算処理負担の軽減の 1 手法としても有用であることを指摘した。

第 3 部では、機械共振モードの存在が磁気ディスクのヘッド位置決め制御にとって非常に大きな障壁であることを踏まえ、この機械共振の周波数を適応推定できる適応ノッチフィルタについて検討した。共振周波数が推定できれば、ノッチフィルタの周波数帯を狭小化できるため位相改善が可能で、外乱圧縮特性の改善が可能となる。なお、ここで着目している機械共振モードは、制御帯域より高い周波数領域にあり、場合によってはサンプリングのナイキスト周波数より高い周波数領域に存在するものである。第 7 章では、リアルタイム適応が可能、適応動作のためのテスト信号が不要、複雑な行列操作が不要で演算量が遥かに少ない（対 DFT 方式比）、などを特徴とする、全く新しい適応ノッチフィルタを提案した。ノッチフィルタの中心周波数が実際の共振周波数とずれると、機械共振により当該周波数帯の位置誤差成分が大きくなり、制御入力にも同様の周波数成分が現れる。従って、その成分がノッチフィルタの中心周波数よりも高いか低いかは、中心周波数をカットオフとするハイパスフィルタとローパスフィルタのそれぞれを通した制御入力信号の分散値を比較することによって推定することができる。従って、テスト信号を使用せずに演算量の少ないリアルタイムな共振周波数の推定ができる。同手法の妥当性をシミュレーションにより確認した上で、同アルゴリズムが正常に動作しない場合を明らかにし、安定性に関する議論を行った。最後に実験を行い提案している手法の妥当性を示した。なお、同手法は、次章に述べる周波数分割を用いることで H_{∞} コントローラにも適用可能である。

第 8 章では、共振モードの特性周波数が強い温度依存性を有することから、温度による特性変動を温度センサを用いた温度依存フィルタで補償することを考え、また残る個体間バラツキについてはロバスト設計で補償することを提案した。また、ロバスト設計されたコントローラを速いモードと遅いモードに周波数分割し、それぞれに適したサンプリング周波数でマルチレート動作させることにより、従来の制御系より高精度な位置決めが可能で、演算処理の負担を軽減することができる方法を提案した。さらに、連続時間 H_{∞} コントローラの実用的な低次元化方法を提案し、また一般化 KYP 補題による低次元化についても触れた。提案した手法の妥当性を調べるために実験を行ったところ、温度依存フィルタの導入により、ロバスト設計の際に考慮すべき不確かさの上界を下げることができ、位置決め制御精度改善が可能となることをこの実験を通して明らかにした。

第 9 章では、本論文のまとめとして、提案した各手法が有効であり、今後の高密度化と CE 市場の需要に十分対応するものであると結論付けた。

なお、本文は英語により記述されていることを付記する。