

状態オブザーバに基づいた高速・高精度サーボ制御系の
設計および実現とそのモーションコントロールへの応用

Design and Realization of High Speed - High Precision Servo
Control System Based on State Observer and Its
Applications to Motion Control

第I部 瞬時状態オブザーバによる状態推定とその磁気ディスク装置の
高精度位置決め制御への適用

Part I. State Estimation Using Instantaneous State Observer and Its Application to
High Precision Positioning System of Hard Disk Drive

第II部 左既約分解に基づくアンチワインドアップ制御系の設計と
そのモーションコントロールへの応用

Part II. Anti-Windup Control System Design Based on Left Coprime Factorization
and Its Applications to Motion Control

指導教官: 堀洋一 教授

東京大学大学院 工学系研究科 電気工学専攻
鈴木文泰

本論文では、メカニカルシステムの制御における高性能化を実現するための、高速、高精度サーボ制御系の設計および実現について述べる。ハードディスク装置のヘッド位置決め制御系や半導体露光装置などのように、制御対象を高速、かつ高精度に位置決め制御したいという要求は非常に多くある。このような要求に応えるため、本論文では、状態オブザーバに基づいた高速・高精度サーボ制御系の設計および実現とそのモーションコントロールへの応用について行った研究結果を報告する。

第1部(第1章～第5章)では、高精度な位置決めを達成するサーボ系設計手法として、瞬時状態オブザーバによる状態推定に基づいた手法を提案する。ここでは、デジタル制御系において制御対象の出力が比較的長いサンプリング周期でしか得られないのに対して、制御器はより短い周期で制御入力を出力できる制御系について検討する。このような制御対象の出力のサンプリング周期の制約は、磁気ディスク装置のヘッド位置決め制御系などにおいてはしばしば見られるものである。このような条件のもとで、提案手法を用いて制御対象の出力をより短い周期で推定することにより、制御器は短い周期で制御を行うことが可能となる。第3章で、従来DCサーボモータで適用されてきた瞬時速度オブザーバの手法を述べ、これを一般化し磁気ディスク装置のヘッド位置決め制御系に適用可能な手法を開発した。

第4章では、この提案手法を磁気ディスク装置のヘッド位置決め制御系において検討した結果、以下のことを明らかにした。

1. 提案手法により制御系の安定余有が改善されること(図1)

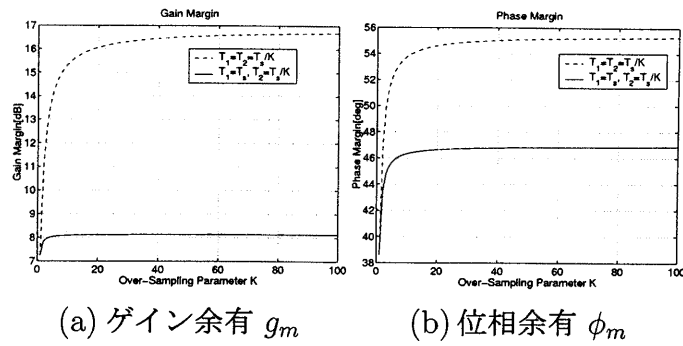


図 1: 瞬時状態オブザーバによる制御系の安定余有の改善: 通常の場合 ($K = 1$) に比べて出力のサンプリング周期、制御入力周期をともに短くした場合 (破線) には安定余有が大きく改善される。制御入力周期のみを短くした場合には数倍程度まで安定余有が大幅に改善される。

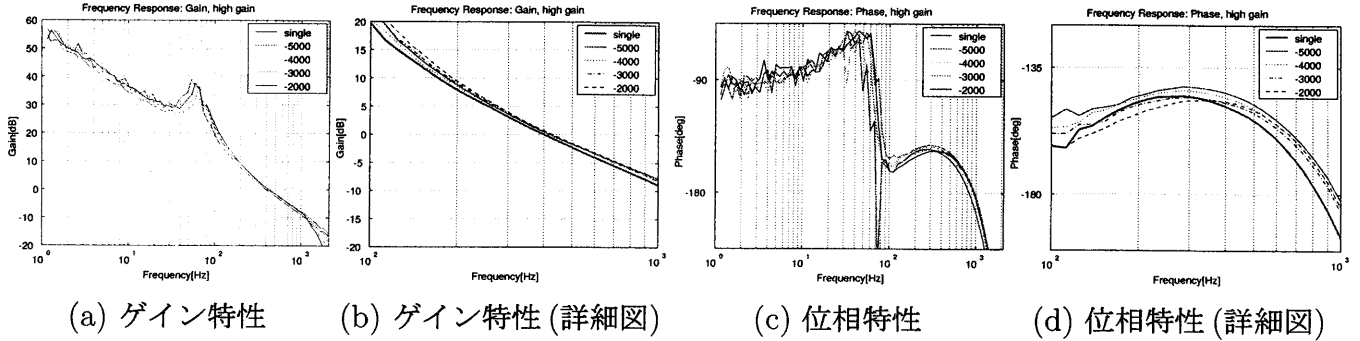


図 2: 提案手法による開ループ周波数特性 (実験結果): 提案手法を用いない場合 (太線) と提案手法を用いた場合のオブザーバの極との関係を示している。オブザーバの極を遅く設定することによりゲイン特性が広帯域化され (図 (a)(b))、位相余有も改善される (図 (c)(d))。

2. この改善効果を利用してフィードバック制御器をハイゲイン化することにより、制御系の広帯域化、位置決め精度の向上が達成されること (図 2)

シミュレーションおよび 2.5 インチ磁気ディスク装置への適用による実験により確認した結果、提案手法によるオーバーサンプリングにより位置決め精度が 15% 程度向上する結果が得られた。

一方、第 2 部 (第 6 章～第 12 章) では、高速な位置決め性能を追求するための手法として左既約分解に基づくアンチwindアップ制御系の設計手法を提案した。これは、制御系を構成するサーボモータなどのアクチュエータにおいてその出力が制限される場合に生ずるwindアップ現象を回避し、アクチュエータの最大出力を有効に利用することにより高速な位置決めを実現する手法である。これまで、数多くのアンチwindアップ制御系の構造を含んだ General Anti-Windup and Bumpless Transfer (AWBT) 法という枠組が提案されているが、これに基づいたアンチwindアップ制御系の一般的な設計法はそれほど多く提案されていない。本論文では、General AWBT 法を簡略化し、制御器の左既約分解表現に基づいた新しい設計手法を提案した。それらの構造および特徴を検討した結果、制御器の左既約分解を適用することにより、以下のように見通しのよい構造を持ち、かつ高速な応答特性を実現する制御系が得られることが明らかになった。

第 8 章では、フィードバック制御器のみを用いた 1 自由度制御系のアンチwindアップ化を提案した。これは、オブザーバと状態フィードバックを用いたフィードバック制御器の構造に注目した手法である。さらに、ユーラパラメトリゼーションによるフィードバック制御器の表現を用いることにより、目標値応答、外乱応答におけるwindアップ現象を十分に抑圧することが可能となることを示した (図 3)。

一方、モーションコントロールでは、フィードバック制御だけでなく、フィードフォワード制御をも用いた 2 自由度制御によるサーボ系の構成法が有効である。2 自由度制御を用いることにより、外乱応答をフィードバック制御により設計し、目標値応答をフィードフォワード制御により設計するというように、両

者を独立に設計できる点に特徴がある。これまで、2自由度制御系に対するアンチwindアップ制御系設計手法に関する研究はそれほど多くない。主に2自由度制御系への入力である目標軌道を調整することにより操作量飽和を生じない応答とする手法が用いられてきたと考えられるが、このような手法では操作量飽和の変動などを考慮に入れて目標軌道のある程度保守的に設計せざるを得ないという問題がある。このような背景のもとに、第9章以降では2自由度制御系に対して目標値応答、外乱応答のwindアップ現象を抑圧する手法を提案した。

第9章では、2自由度制御系の最も基本的な構造を用い、フィードバック、フィードフォワード制御器の内部に操作量飽和をモデル化することにより、windアップ現象を抑圧する方法を提案した。提案手法では、操作量飽和が生じた場合にもフィードバック、フィードフォワード特性が独立となる構成を有している。また、提案手法を右既約分解に基づいたフィードフォワード制御器の設計法と比較することにより、非常に簡単な構造を持つことを明らかにした。提案手法をDCサーボモータの位置制御系に適用し、目標値応答、外乱応答におけるwindアップ現象を十分に抑圧できることを、シミュレーションおよび実験から明らかにした(図4)。

第10章では、与えられた滑らかな目標軌道に制御量を追従させる追従制御系に対するアンチwindアップ手法を検討した。まず、従来提案されている離散時間追従制御系の設計手法が第9章の設計手法を拡張したのものになることを明らかにし、以下の4つの部分で構成できることを示した。

1. フィードバック制御器
2. 右既約分解に基づくフィードフォワード制御器
3. プレフィルタ
4. 目標関数発生器

次に、第9章の手法に基づき、これらの各部分をアンチwindアップ化することにより、離散時間追従制御系のアンチwindアップ手法を提案した。提案手法では、実際に操作量飽和が生じた場合に、それを上記の4つの部分に反映させることによりwindアップ現象を回避している。特に、実際に生じた操作量飽和に基づいて目標関数発生器を調整することにより、操作量の上/下限を利用した高速な追従特性が得られることを明らかにした。

さらに、第11章では、第10章の追従制御系に対するアンチwindアップ手法の多入出力系への適用例として、2軸マニピュレータの軌跡追従制御への適用を検討した。これは、2軸マニピュレータを駆動する各関節のジョイントアクチュエータで生じた操作量飽和を、第10章の手法で回避する手法である。特に、2つのジョイントアクチュエータのうち、片方のみで操作量飽和が生じた際には、それをもう一方のジョイントアクチュエータへ反映させ、2つのジョイントアクチュエータ間で調整を行うことが必要となることを示した。これらの効果は、シミュレーションおよび実験により確認された。

以上のように本論文では、高速/高精度サーボ系実現のため検討してきた手法を2部にわたって述べた。第1部では、瞬時状態オブザーバを用いた状態推定を用いて磁気ディスク装置のヘッド位置決め制御系のオーバーサンプリングを達成する手法を提案し、提案手法による安定余有の改善、位置決め精度の向上効果を明らかにした。また、第2部では、アクチュエータの操作量飽和を考慮した各種のサーボ系設計法を提案し、提案するアンチwindアップ手法により高速な位置決め応答、追従特性が得られることを明らかにした。

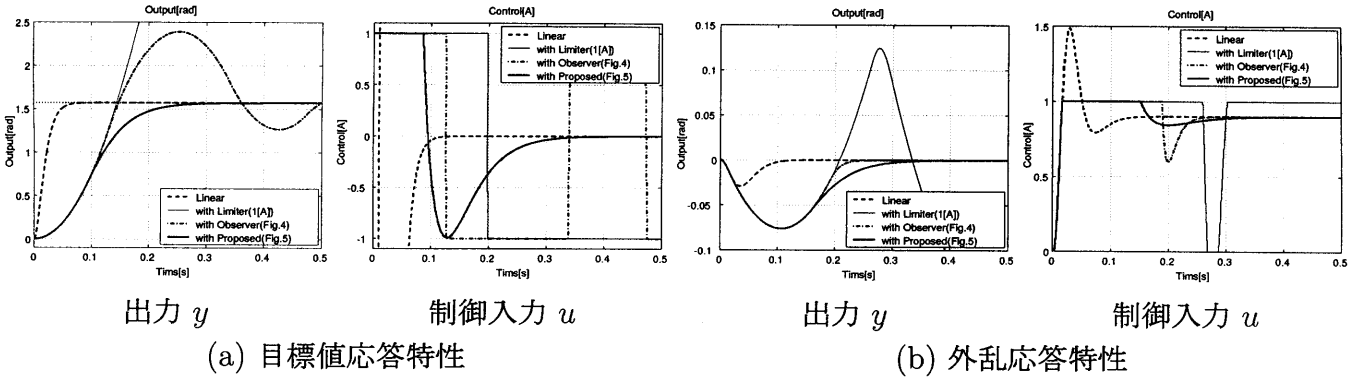


図 3: 提案手法による 1 自由度制御系のウィンドアップ抑圧効果 (シミュレーション結果): 操作量飽和が存在すると制御系が不安定化する (細線) のに対して、提案手法を適用すれば、目標値応答、外乱応答ともに安定化されオーバーシュートを生じない良好な特性を得ることができる。

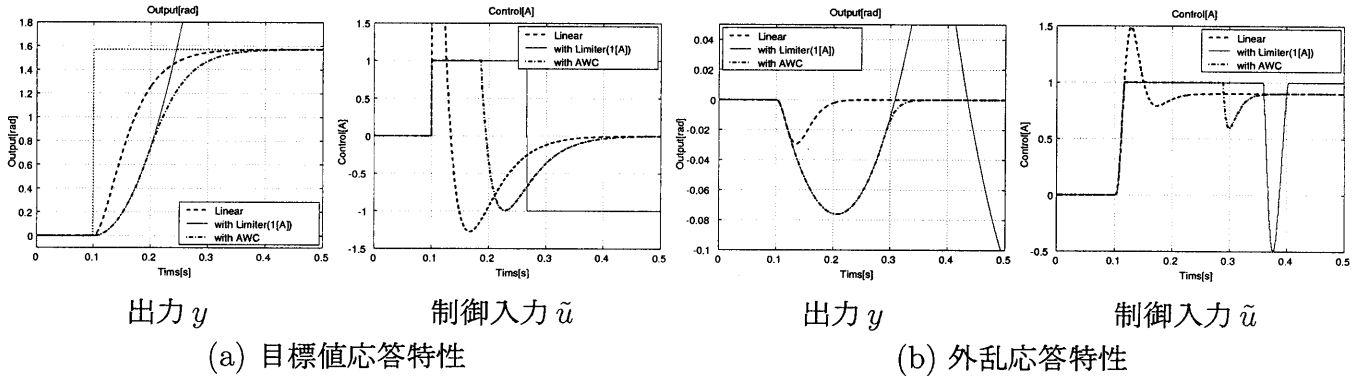


図 4: 提案手法による 2 自由度制御系のウィンドアップ抑圧効果 (シミュレーション結果): フィードフォワード制御器で操作量飽和を考慮する提案手法によりウィンドアップを生じない目標値応答特性が得られる (図 (a) 一点鎖線)。同様にフィードバック制御器で操作量飽和を考慮することにより外乱応答が安定化されウィンドアップ現象が抑えられている (図 (b) 一点鎖線)。