

論文の内容の要旨

論文題目 システム同定と数理最適化に基づいた制御器自動設計と
精密位置決め装置への応用に関する研究

氏 名 北吉 良平

本稿は、システム同定と数理最適化を基にサーボモータの制御器を自動調整することを目的とした研究について述べたものである。近年、産業界では工場自動化のニーズの高まりに伴って、自動化装置の主要部品の1つであるサーボモータのニーズが非常に高まっている。サーボモータは半導体製造装置や産業用ロボットなど高速高精度な位置決め動作を実現する装置に用いられるため、環境の変化や外乱へのロバスト性や目標位置に到達するまでに要する時間（整定時間）が性能指標として重視される。これらの性能は、サーボモータを装置に取り付けた際の制御パラメータの調整の巧拙に大きく左右されるため、調整は非常に重要な工程である。特に精度が必要な装置においては、熟練の作業員が経験に基づいて調整工程を実施しているが、人手による調整作業は時間を要するため、調整工程を自動化した使いやすい（Easy to Use）機能の開発も行われている。しかし、自動調整機能を用いて全ての機械を調整できるまでには至っておらず、一層の性能向上が求められている。

現状の制御器の自動調整機能はサーボパック（サーボアンプ）の限られたリソースを基に、機械を駆動した際に得られる時系列データを基に試行錯誤で調整を行っているものが主流である。駆動時の時系列データを基に調整する手法は、データに機械の線形特性と非線形特性が両方とも含まれているため、非線形特性を考慮しながら調整ができる点やサーボモータが駆動させる機械（制御対象）が、どのような線形特性（大負荷イナーシャ・低剛性）を持っていたとしても対応できる汎用性が長所である。一方、調整すべきパラメータ数が増えると試行回数が増えるため調整時間も爆発的に増える点や、調整結果が局所最適な結果に陥りやすく作業員が簡単に凌駕する性能を実現してしまう場合があるという短所も持ち合わせている。更なる調整性能を実現するためには、駆動データの一部だけを用いて調整するのは限界があると思われる。

最近のICT(Information Communication Technology)の発展に伴って、大容量の記憶素子を持つ上位コントローラをサーボモータや産業用ロボットに接続し、マイクロ秒のサンプリング周期で駆動データを大量に収集する傾向が強まっている。この上位コントローラをサーボモータの先についている制御対象の線形特性を調べるための外部記憶素子として利用することも可能である。

そこで本稿では、制御対象の特性を調べる（システム同定を行う）ためにサーボモータを用いて制御対象の機械を加振し、得られた駆動データを基に上位コントローラ・PCを用い

て周波数応答データ・時系列データの双方を利用して制御対象の線形・非線形特性を解析し、解析結果を基に最適化計算を用いて制御対象の特性に合った制御器を自動生成するデータ駆動型自動制御器設計の研究に取り組んだ。より具体的には、下記の3つが本稿におけるオリジナリティである。

1. 周波数応答データと時系列データの双方を活用したハイブリッド同定
2. Structured H_{∞} 制御を基にしたカスケード型制御器の構造・パラメータの最適化
3. 繰り返し同定を基にした周波数応答データの誤差にロバストな制御器自動調整

制御対象として、1軸のリニアモータを用いた精密位置決め装置、回転型サーボモータで駆動されるボールねじ、バックラッシュや摩擦を持つハーモニック減速機を選ぶことで産業機器へに適用することが可能か実用性を評価した。

第1章では、サーボモータが必要とされる原因である工場自動化のニーズの高まりについての社会的な要因や、ICT技術の発展による大量の駆動データの利活用の広がりについて説明する。そして、自動調整技術およびシステム同定技術がどのような発展を遂げてきたかを説明する。第2章では、現状のサーボモータに実装されている自動調整機能を紹介しつつ、駆動データの利活用が限定的になっていることを示す。

そして、第3章では研究で調整対象とする産業機器・実験装置の構成を説明した上で、サーボモータを用いて加振し得られた駆動データから制御対象の線形・非線形特性を分離・解析する。本来、機械の非線形特性を解析するには、非線形特性に合った別の実験を行う必要があるが、本研究では複数の非線形性のモデルを解析時に陽に考慮し、周波数解析と時系列解析を共に行う「ハイブリッド同定」を行うことで加振指令から線形性と非線形性の分離・解析を可能としている。本章で得られた解析結果は、第4章・第5章における制御器の自動設計に活用される。

第4章では、制御対象の線形特性を基に、Structured H_{∞} 制御と呼ばれる固定構造の制御システムに対して、所望の制御特性を与えるパラメータを設計する手法を用いることで、FB(FeedBack)制御器の自動調整を実現した内容を説明する。従来、Structured H_{∞} 制御の適用は、制御器の構造が固定された場合に限定されていたが、基底フィルタ (Basis filter) と呼ぶ筆者が提案するフィルタ群を導入することで構造の最適化をも可能とし、より実用的な制御器設計を可能とし、制御性能を向上させた結果を説明する。第5章では、解析から得られた線形特性と非線形特性の両方を用いて、FF(FeedForward) 制御器を設計し応答性の向上と非線形特性により発生する誤差の抑制を実現する。第6章では、解析した線形特性と実際の機械の特性が異なっていた場合に、周波数解析で特性が異なっている周波数を特定・再同定を実施し、制御性能を劣化させることなく最適調整を実施する方法について述べる。最後に、第7章では、本研究のまとめを述べるとともに、今後の課題について述べる。