

# **Doctoral Dissertation (Summary)**

博士論文（要約）

## **Multivariable High-Precision Motion Control with Structured Modeling and Data-Driven Convex Optimization**

（構造的モデル化とデータ駆動凸最適化による  
多変数超精密位置決め制御）

**Masahiro Mae**

37-207078 前 匡鴻

Dissertation Submitted to

**Department of Electrical Engineering and Information Systems**

for the Degree of

**Doctor of Philosophy**

at

**The University of Tokyo**



**December 2022**

Supervisor

**Professor Hiroshi Fujimoto**

精密位置決め制御は、半導体や液晶パネルを製造する露光装置、工作機械、産業用ロボット、ハードディスクドライブなどの産業装置に欠かせない技術である。社会を支える産業装置の高性能化は、我々の豊かな生活に直結している。高性能化の要求に伴い、制御対象の複数共振モードや複数入出力を考慮した制御手法が必要不可欠であるが、従来の制御手法では複数共振モードを無視した剛体系に基づく制御や、複数入出力を無視した単入出力系の制御が用いられることが多く、制御性能を悪化させる要因となっていた。

本論文では、複数共振モードや複数入出力といった多変数系のダイナミクスを考慮した精密位置決め制御手法を提案した。多変数系を構造的にモデル化することにより、制御対象や設計される制御器のダイナミクスを見通し良くエンジニアが解釈できる形に定式化する。また、多変数系の制御器に対して凸最適化を用いたデータ駆動の制御器設計手法を用いることで、多数の制御器パラメータの調整の難しさを解消する。これらの制御手法を、精密位置決めステージ、2慣性系モータベンチ、ビーム型装置、ハードディスクドライブなどの実システムに応用し、計算機シミュレーションおよび実験を通じて有効性を明らかにした。

本論文の内容と構成は以下のようになっている。

第I部において、第1章で高性能化するメカトロニクス制御装置の産業応用における要求と課題を明らかにした。産業界のメカトロニクス制御装置における先進的な精密位置決め制御の性能要求は年々高まっており、高性能化のために複雑化した制御装置の多くは、剛体以上の自由度を持つ複数モード系や、複数の入出力を持つ多入力多出力系であるため、それらのダイナミクスや冗長性を考慮した制御器設計が必要である。このような背景を踏まえ、多変数系の精密位置決め制御において冗長性を有効活用することで高い制御性能を実現し、モデルベース制御器設計で培われた物理的な意味づけをデータ駆動制御器設計の枠組みに拡張することを本論文の目標とした。本論文の前半（第2・3・4・5章）では、マルチレートフィードフォワード制御を用いた連続時間軌道追従性能の改善を複数モード系や多入力多出力系に対する枠組みに拡張し、より高い制御性能を実現することを目標とした。本論文の後半（第4・5・6・7章）では、多変数系のような複雑でモデル化に手間のかかる制御対象に対して、設計後の物理的解釈が可能なエンジニアに優しい制御器の設計手法をデータ駆動凸最適化で実現することを目標とした。

第II部において、制御対象の状態変数に追従させることにより連続時間軌道追従性能を改善するマルチレートフィードフォワード制御器を、複数モード系や多入力多出力系といった冗長性を持つ制御対象のモデルに基づいて設計する手法を提案した。

第2章で、マルチレートフィードフォワード制御を複数モード系に拡張する具体的な手法を示した。複数モード系のマルチレートフィードフォワード制御では、複数モード系の冗長性や連続時間の零点のダイナミクスを考慮した制御器設計が必要となる。まず、マルチレートフィードフォワード制御で用いる状態変数軌道生成を、多入力多出力系の一般的な枠組みに拡張した。加えて、和と積の2種類のモード分解により、複数モード系の冗長性を有効に活用したマルチレートフィードフォワード制御器を設計し、連続時間軌道追従性能を改善した。複数の共振モードを持つ精密位置決めステージを制御対象とした検証により、指令値や制御対象に合わせた制御器設計指針を示した。

第3章で、マルチレートフィードフォワード制御を多入力多出力系に拡張する具体的な手法を示した。多入力多出力系のマルチレートフィードフォワード制御の課題として、複数の入力ごとに用いるサンプリング周期の選び方に冗長性が存在することがある。そこで、マルチレートフィードフォワード制御の多入力多出力系への拡張のた

めに、一般化可制御性指数の選び方における可制御性の強さを指標とした、制御対象のダイナミクスに合わせた適切な入力サンプリング周期の選び方を提案した。2慣性系モータベンチと6軸の精密位置決めステージで検証を行い、入力サンプリング周期の適切な選び方による制御性能の改善を確認した。

第III部において、従来はモデルに基づいて設計されてきた状態追従型サンプル値フィードフォワード制御器をデータ駆動で設計する枠組みを提案した。

第4章で、調整パラメータに対して線形なフィードフォワード制御器において、サンプル値制御に基づいた微分器を導入することにより、連続時間軌道追従性能を改善する手法を提案した。従来のマルチレートフィードフォワード制御器は、制御対象のモデルの逆系として設計されるため、実験装置に合わせたパラメータの直感的な調整、実験データを用いたパラメータの更新が困難であった。そこで、状態追従型サンプル値フィードフォワード制御をデータ駆動化するために、パラメータに線形な構造のフィードフォワード制御器を提案した。基底関数型フィードフォワード制御の枠組みを取り入れることにより、調整パラメータに線形な形でフィードフォワード制御器を定式化した。零次ホールドのダイナミクスを考慮したサンプル値微分器を導入することにより、連続時間応答を考慮した離散時間の基底関数を設計した。2慣性系モータベンチにおける検証により、従来の零次ホールドのダイナミクスを考慮しない基底関数型フィードフォワード制御器よりも制御性能が改善することを確認した。

第5章で、第4章で提案した調整パラメータに対して線形なサンプル値フィードフォワード制御器を、多入力多出力系の複数モード系においてパラメータの物理的解釈が可能な形で定式化し、反復学習制御を用いてパラメータをデータ駆動で更新する手法を提案した。多入力多出力系のフィードフォワード制御器設計において、干渉を考慮するためには多入力多出力系のモデルが必要となるが、静的な非干渉化を行った後の干渉成分のモデリングは物理的解釈も難しく、グレーボックスモデリングにおいてもパラメータ同定が非常に難しいことが問題とされていた。そこで、多入力多出力の複数モード系に対する構造化されたフィードフォワード制御を用いることで、位置決め制御において支配的な低周波数の誤差に着目し、調整パラメータが物理的に解釈可能な形でフィードフォワード制御器を定式化した。反復学習制御により、モデリングの難しい多入力多出力系に対するフィードフォワード制御器のパラメータを、実験データと対角の剛体モデルのみから反復的に更新し誤差を最小化した。ビーム型装置における検証により、干渉を考慮しない従来のフィードフォワード制御器と比較して制御性能が改善することを確認した。

第IV部において、精密位置決め制御対象の外乱抑圧のために、制御対象のパラメトリックモデルを必要とせず周波数応答データを直接用いて構造的なフィードバック制御器を凸最適化により自動設計する手法を提案した。

第6章で、ロバスト性能に主眼をおいた外乱抑圧のための制御器設計問題に対して、周波数応答データを直接用いて凸最適化する手法を提案した。従来のフィードバック制御器自動設計において、誤差の改善を直接目的関数として定式化した例は多くは見られなかった。外乱抑圧性能をより向上させるためには、制御対象の複数の変動モデル、複数周波数の外乱に対処するフィードバック制御器を設計する必要性がある。そこで、複数の外乱周波数に合わせたフィードバック制御器を、制御器の構造を保ったまま調整パラメータに線形な形で定式化した。制御対象と外乱の周波数応答データを直接用いることで、誤差の改善を目的関数とした制御器設計問題を定式化し、逐次線形化により凸最適化の繰り返し計算として求解した。ハードディスクドライブのベンチマーク問題における検証により、外乱が抑圧され誤差が改善することを確認した。

第7章で、ロバスト安定性に主眼をおいた外乱抑圧のための制御器設計問題に対して、周波数応答データを直接用いて凸最適化する手法を提案した。露光装置の精密位置決めステージの外乱抑圧のためのフィードバック制御器設計は、多入力多出力の制御対象のパラメトリックモデルを同定する難しさと、フィードバック制御器設計において干渉を考慮してロバスト安定な制御器を設計する難しさを持つ。特定周波数への外乱抑圧は、その周波数で制御器がハイゲイン化することから、多入力多出力系におけるロバスト安定性の保証と実際の装置への実装に課題があった。そこで、多入力多出力系の軸間の干渉を考慮した周波数応答データを直接用いたロバスト制御器設計問題を定式化し、逐次線形化により凸最適化の繰り返し計算として求解した。実際に産業界で使用されている商用の液晶露光装置の精密位置決めステージにおける検証により、自動設計したフィードバック制御器の実装に成功し、誤差の改善を確認した。

第V部において、第8章でまとめとして本論文を振り返り、本論文を通した研究成果と研究分野における位置づけを述べた。本論文は、多変数系の精密位置決め制御における制御性能と実用性の両立を目標として、「物理的解釈の可能な従来のモデルベースの制御器設計」と「制御性能のさらなる向上とモデリングコストの低減を目的としたデータ駆動制御器設計」の両面を組み合わせ、多変数の精密位置決め制御系のための制御器設計の枠組みを提案し、実際の実験装置による性能検証を行った。理論と実験によりその有効性を示した本論文は、学术界と産業界のどちらにも資する価値を生み出し、その重要性は今後も高まるものであると言える。

なお、本文は英語により記述されていることを付記する。