

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K21098

研究課題名(和文) 精密サーボシステムの極限性能追及を目指した数理計画法に基づく制御器設計法の確立

研究課題名(英文) Mathematical Programming-based Controller Design for Extremely Improving Servo Performance

研究代表者

前田 佳弘 (Maeda, Yoshihiro)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70769869

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高速・高精度位置決め制御技術の極限性能追及を目指し、フィードバック(FB)制御におけるトレードオフ問題を追及可能なFB制御器設計法を確立した。提案法は、FB制御器の設計問題を効果的に数理計画問題に落とし込むことで、制御器構造とパラメータの両者をシステムティックに設計可能であり、従来の設計手法を超えるFB制御性能を獲得可能である。このことは、産業サーボシステムで経験される厳しい実問題を考慮した実験評価を通じて検証された。提案法は、本研究で扱った精密位置決め問題のみならず様々なFB制御問題に応用可能であり、本研究分野への波及効果が期待できる。

研究成果の概要(英文)：This research project proposed a mathematical programming-based feedback (FB) controller design method for extremely pursuing the fast and precise positioning control performance. The proposed method can systematically design a feedback controller based on the design algorithm that effectively combines the mathematical programming methods for design of not only the controller parameters but also the controller structure. The effectiveness of the proposed method has been verified through experiments considering FB controller design problems in industrial servo systems, in comparison to the conventional FB controller design methods.

研究分野：モーションコントロール

キーワード：フィードバック制御 数理計画法 モーションコントロール

1. 研究開始当初の背景

高速・高精度位置決め制御技術は、産業用メカトロニクス機器の生産性や加工精度向上に係る重要な要素技術の一つである。そこにおける制御器の設計問題とは、究極的には、位置決め（サーボ）システムが発揮し得る極限性能を実現する制御器を設計することであり、それを追求する制御器設計法が学術的・産業的に求められる。

本研究で扱うフィードバック（FB）制御器は、高速・高精度位置決め制御において、通常、制御周波数帯域（以降、簡単に“制御帯域”とよぶ）の拡大が求められる。しかし、FB 制御には「安定性の保証」という必須要件が存在し、制御帯域の拡大と安定性の拡大はトレードオフの関係にある。従って、上記2つの性能指標のトレードオフ問題をいかに高度両立するかが FB 制御器設計の焦点となる。

近年では、上記トレードオフ問題を数理計画法の枠組みで定式化し、計算機の高速度演算能力を活かして FB 制御器を設計するアプローチが注目されているが、「制御性能の極限追及」という極めて難しい問題の解決を目的とした FB 制御器設計理論・方法論は学術的に未だ確立されておらず、取り組むべき課題として残されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高速・高精度位置決め制御技術の極限性能追及を目指し、数理計画法に基づいて FB 制御のトレードオフ問題を効果的かつシステムティックに追及可能な FB 制御器設計法を確立することである。具体的な研究目的は以下となる。

- (1) FB 制御器設計におけるトレードオフ問題を数理計画問題に落とし込むために、効果的な問題の定式化方法を見出し、基礎設計理論を確立する。
- (2) FB 制御器の構造とパラメータを自由度とした極限性能追及のために、(1)の設計理論を基調とした極限性能追及アルゴリズムを構築する。
- (3) 産業用精密サーボシステムに提案法を適用し、産業界で経験される厳しい実問題に対する実験評価を通じて、有効性を検証する。

3. 研究の方法

(1) 数理計画法に基づく FB 制御器設計理論の確立

安定性の確保を制約条件、制御帯域の拡大を目的関数とした制約付き最適化問題によって FB 制御器パラメータを設計した。安定性に関しては、通常、ある一定以上の安定度を有することが設計仕様として与えられるため、不等式制約（必須要件）として定式化する方針とした。そして、従来研究^[1]で用いてきた図1に示すようなナイキスト線図上の円条件をはじめ、不等式制約条件の付与方法

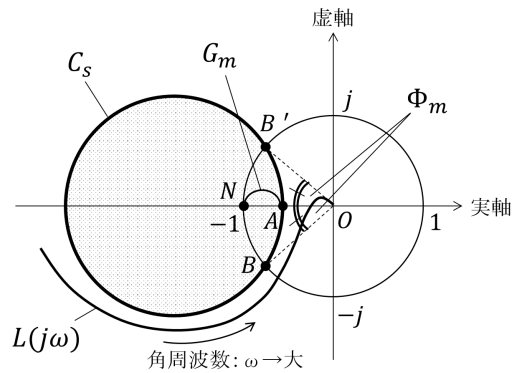


図1. ナイキスト軌跡に対する円条件

を多角的なアプローチから検討した。一方、サーボ帯域は、最大化したい性能指標であることから、目的関数として定式化する方針とした。そこでは、制御帯域幅を示す値を最大化する方法、ある周波数帯における周波数特性を最適化する方法、の2種類に絞って、FB 制御器設計における実際の勘どころを効果的に反映可能な目的関数の定式化方法を検討した。

[1] Y. Maeda and M. Iwasaki, “Circle Condition-Based Feedback Controller Design for Fast and Precise Positioning”, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 61, no. 2, pp. 1113-1122, 2014.

上記に加えて、従来の数理計画法に基づくFB 制御器パラメータ設計法は、設計自由度として扱えるパラメータは分子パラメータに限定されるものがほとんどであった。その場合、分母パラメータは何かしらの規則に従って予め決定しておく必要があるが、その決定方法については未確立であり、難しい問題として残されている。しかし、分母パラメータも自由度に含めてパラメータ設計を行う方が極限性能追及に資することは明白であり、本研究では、分子・分母パラメータの両方を設計自由度とするパラメータ設計法への拡張も並行して検討を行った。具体的には、1種類の数理計画法によって分子・分母パラメータを設計する方法、2種類の数理計画法を組み合わせて分子・分母パラメータを設計する方法をそれぞれ構築し、比較評価した。

また、産業用サーボシステムをはじめとする種々の高速・高精度位置決め制御問題において実問題となる高次共振モードや各種位相遅れ、アクチュエータ・ドライバの制約、プラント特性変動や不確かさを扱えるようなパラメータ設計法とするために、上記を考慮した制約条件と目的関数への拡張方法を検討した。

(2) 極限性能追及アルゴリズムの構築

FB 制御器の設計において適切な制御器構造を与えることは極めて重要である。(1)の

パラメータ設計法はある制御器構造が与えられた場合のパラメータの最適化という位置付けであり、極限性能追及を実現するためには構造も含めてFB制御器設計を行う方が効果的なことは明白である。そこで本研究では、構造とパラメータを設計自由度として極限性能追及を行うために、予め構造候補を一つ決め、その構造について数理計画法に基づくパラメータ設計を行うアルゴリズムを構築した。そこでは、パラメータ設計における制約付き最適化問題の可解性と評価値の情報を利用することで、FB制御器設計を効率化することも同時に検討した。

(3) ガルバノスキャナを用いた実験検証

プリント基盤レーザ加工機で用いられるガルバノスキャナを制御対象として、提案法を実験検証した。具体的には、周囲温度変化・自己発熱によるプラントパラメータ変動起因の位置決め精度劣化問題を扱い、パラメータ変動時の高次共振モードのロバスト安定化・感度化、サーボ帯域の最大化、位置決め精度の改善効果を、従来FB制御器設計法と比較評価した。実験においては、研究室所有の恒温恒湿槽を用いて実際にプラントパラメータ変動を発生させ、産業用サーボシステムの実問題レベルで実験評価を行った。

4. 研究成果

(1) 数理計画法に基づくFB制御器設計理論の確立

FB制御器パラメータ設計問題の定式化方法として、

凸計画問題（整形行列不等式）

非線形計画問題

メタヒューリスティクス

の3つの数理計画法に基づく方法を網羅的に検討した結果、産業用サーボシステムの実問題を扱えるような設計法という観点でみると、の方法が設計問題の厳密性、求解安定性、効率性などのバランスが最も優れていた。そして、FB制御性能の極限追及を考えると、

- 厳密性：最適化問題の枠組みに落とし込む際の問題緩和の影響が少ないこと
- 求解安定性：構造変化時のパラメータ設計が安定的に行えること

の2点が重要であるという結論を得た。ここで得られた知見は、本研究のみならず、今後の研究においても極めて重要なものであった。従って、最終的にはの方法をベースとしてFB制御器パラメータ設計の基礎理論を確立した。また、それを産業用サーボシステムの実問題（ロバスト安定性、ロバスト感度など）を扱えるように拡張し、固定構造FB制御器の最大性能を発揮するパラメータをシステムティックに設計可能とした。

一方、FB制御器の分母パラメータも設計自由度に含めるため、2種類の設計法を構築した。1つめの方法は、分母パラメータの自由度化により目的関数が非凸となる問題を、近

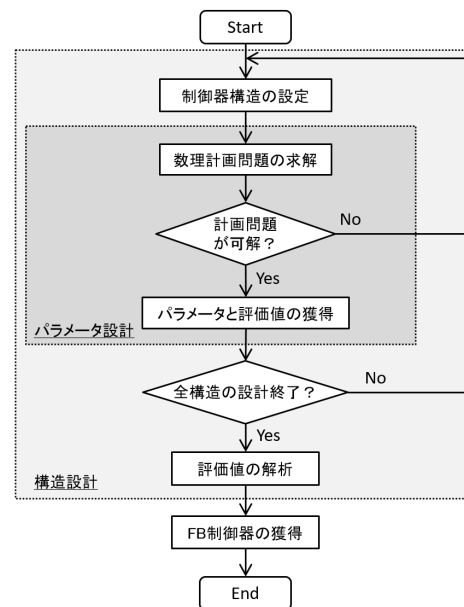


図2. 極限性能追及アルゴリズムのフローチャート

似的に凸関数化するアプローチであり、3次程度の低次数制御器であれば分子・分母パラメータを一括設計可能とした。その求解結果は、大域的最適解と一致するものであり、制御性能向上のみならずパラメータ設計の効率化も同時に実現可能となった。この成果は、非凸問題を凸緩和して繰返し最適化によって求解する従来手法よりも簡単に、数値計算的な問題もなく、より高速に求解可能な新しいアプローチであり、優れた研究成果と捉えている。ただし、高次数制御器への展開が難しいことを確認しており、その理論的背景の考察と課題解決を今後行っていく予定である。

2つめの方法として、分子パラメータは非線形計画法、分母パラメータをメタヒューリスティクスにより設計するという、2種類の数理計画法を組み合わせたアプローチを構築した。1つめの方法よりもプログラムが複雑化することは否めないが、設計問題の近似に伴う厳密性の低下もなく、高次数FB制御器を扱うことが可能である。また、数理計画法の組み合わせ方を工夫することで、求解の効率性も実用上問題ないレベルで実現することができた。

(2) 極限性能追及アルゴリズムの構築

順次選択するFB制御器構造に対するパラメータを(1)の数理計画問題に基づく設計法によって求解し、その数理計画問題の可解性と評価値によって最良のFB制御器構造・パラメータを一意に獲得する極限性能アルゴリズムを構築した。図2に極限性能追及アルゴリズムの概略フローチャートを示す。パラメータ設計における制約付き最適化問題の可解性を利用することで、当初の計画通り、与えられた構造の有望度を効率的に判断することが可能となり、多くの構造自由度が与

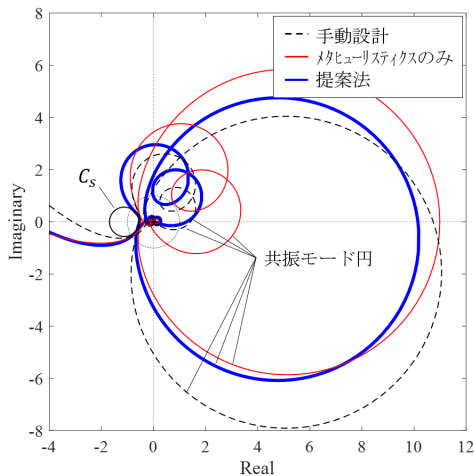


図3. ナイキスト線図 (安定性)

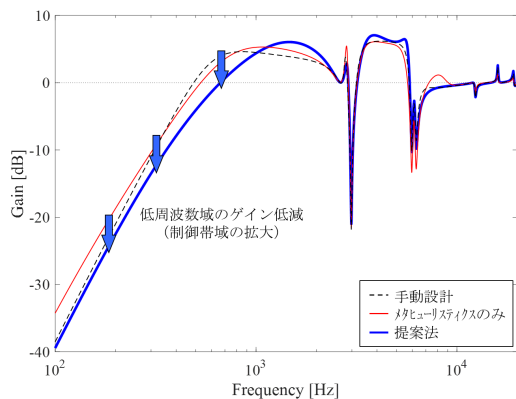


図4. 感度特性

えられた場合の設計時間を大幅に短縮することが可能となった。

上記に加えて、構築したアルゴリズムは、(1)で述べた分子・分母パラメータの両方を同時設計する方法の場合も有効に機能し、構造・パラメータ(分子・分母両方)の最適設計が可能となった。

(3) ガルバノスキャナを用いた実験検証

温度変化時のプラントパラメータ変動に対するロバスト安定化、ロバスト感度化を実現しつつ、サーボ帯域の拡大を極限追及することを目的に、提案法をガルバノスキャナに適用して実験検証した。比較のため、手動設計によって良く検討された構造・パラメータを有するFB制御器と、メタヒューリスティクスのみを用いて極限性能追及アルゴリズムにより構造・パラメータ設計を行ったFB制御器も同時に評価した。図3に安定性評価のためのナイキスト線図、図4に感度特性の周波数特性を示す。結論として、提案法は他の2手法と同等の安定性を具備しながら、最も制御帯域拡大を実現するFB制御器を設計することができた。その背景として、まず、手動設計したFB制御器とは異なるFB制御器構造が設計された点である。これは、構造も

設計自由度に含めた(2)の極限追及アルゴリズムの効果が表れた結果と言える。次に、メタヒューリスティクスのみによる設計法と比べると、設計時間を半分以下に短縮できると共に、設計されるFB制御器も同一のものが安定的に得られた。これらは、

- (1)のFB制御器設計の基礎理論構築において、トレードオフ問題の定式化に非線形計画法が有用である
 - (2)の数理計画法の可解性と評価値解析に基づく極限性能追及アルゴリズムが、上記と組み合わせることでより効率的に機能する
- の2点の効果と言える。

以上のように、(1)~(3)のそれぞれの項目において概ね計画通りに研究を推進し、位置決め制御性能の極限追及に資するFB制御器設計法の確立という成果を上げることができた。その過程において、

- FB制御器の分子・分母パラメータを同時設計する上で有効な方法の基礎を見出したこと
- 制御器構造を設計自由度に含めたアプローチの有効性を確認できたこと
- 数理計画法の可解性を利用して、制御パラメータの安定範囲を自動算出するという付加的な効果を見出し、パラメータ自動調整にも応用展開できる手応えを得たこと

は、将来的な研究を見据えて非常に有用な知見であった。また、本研究を通じて導入したサーボアナライザや高速計算機は、その後の研究において大いに役立っている。1年目の研究成果は既に雑誌論文、学会発表論文として公表済みであり、2年目で得た成果もこれから多数発表する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

前田 佳弘, 郷 直樹, 岩崎 誠, “最適化問題の可解性を利用した制御パラメータの安定範囲算出とパラメータ調整の効率化”, 電気学会論文誌D, 138巻, 2018, 392-401, DOI: 10.1541/ieejias.138.392

〔学会発表〕(計6件)

郷 直樹, 前田 佳弘, 岩崎 誠, “フィードバック制御器パラメータの安定範囲算出法の比較評価”, 電気学会全国大会, 4-225, 2018

内園 貴大, 前田 佳弘, 岩崎 誠, “非線形パラメータ構造FB制御器設計法における目的関数の影響解析”, 電気学会全国大会, 4-224, 2018

Takahiro Uchizono, Yoshihiro Maeda,
Makoto Iwasaki, “ An Evaluation
Function Design Method for
Constrained Optimization-Based
Feedback Controller Design ”, Proc.
of the 4th IEEJ International Workshop
on Sensing, Actuation, Motion Control,
and Optimization, V1-11, 2018.

郷 直樹, 前田 佳弘, 岩崎 誠, “ 最適
化問題の可解性を利用した人によるフ
ィードバック制御器パラメータ調整の
効率化 ”, 電気学会産業応用部門大会,
2-37, 2017

内園 貴大, 前田 佳弘, 岩崎 誠, “ 非
線形パラメータ構造 FB 制御器設計にお
ける凸評価関数への簡易変換法とその
評価 ”, 電気学会産業応用部門大会,
2-36, 2017

Yoshihiro Maeda, Makoto Iwasaki,
“ Circle Condition-Based Robust
Feedback Control Against Plant
Perturbation ”, Proc. of 7th IFAC
Symposium on Mechatronic Systems,
2016, 109-114.

〔図書〕(計1件)

前田 佳弘, “ 産業サーボシステムの高
速・高精度化を支えるフィードバック制
御器設計法 ”, 電気学会 D 部門ニューズ
レター, 6月号, 2018

〔産業財産権〕

- 出願状況(0件)
- 取得状況(0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://icontrol.web.nitech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田 佳弘 (MAEDA, Yoshihiro)
名古屋工業大学・大学院工学研究
科・准教授
研究者番号: 70769869