

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560288

研究課題名(和文) 線形行列不等式応用が拓く高精度2自由度位置決め制御系設計の実用化展開

研究課題名(英文) Practical Applications of Linear Matrix Inequality Techniques to Controller Design of 2-Degrees-Of-Freedom High-Precision Positioning

研究代表者

岩崎 誠 (Iwasaki, Makoto)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10232662

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、各種産業・情報機器位置決め機構の高速・高精度位置決め制御系設計に関して、制御対象に特有の制約条件を線形行列不等式で定式化してその最適化問題を扱うことで、所望の制御仕様を満足する2自由度位置決め制御系の方法論・設計論を産業界に先駆けて学理に即して展開した。提案手法は従来の設計法に見られなかった独創的かつ先駆的なものであり、2自由度制御系の設計法の格段の発展をもたらし、新たな学問的知見として幅広いメカトロニクス分野に応用展開可能である。

研究成果の概要(英文)：In the research project, a pioneering design scheme has been originally proposed as the applications of linear matrix inequality techniques to the 2-Degrees-Of-Freedom high-precision controller for mechatronic positioning devices. In the design, the optimization approaches have been theoretically applied under the given control constraints that was formulated by linear matrix inequalities, which have provided the positioning system with the required performance. The proposed design has promising capabilities to expand the application fields in mechatronic design for the precision positioning as well as the general motion control.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 知能機械学・機械システム

キーワード：メカトロニクス 高精度位置決め制御

1. 研究開始当初の背景

様々な精密加工を支えるメカトロニクス
の要素技術の一つに高精度位置決めが挙げ
られるが、その精度は加工機の機械的運動精
度のみならず、位置決め機構の制御性能にも
大きく依存する。国内外で競争力を発揮し、
高付加価値で差別化が可能、かつ製造コスト
の削減や製品の低価格化も実現可能な精密
加工機械の実現には、所望の制御特性を満足
することのみならず、設計・調整の工数を抑
え、機械設置環境にも適応可能な位置決め制
御技術が必要不可欠である。

高速高精度位置決め制御を実現する 2 自
由度制御系は、元来 FF 補償器と FB 補償器
をそれぞれ独立に設計可能な特徴を有する
ものであり、FF で所望の高速性や高精度性
(機構振動抑制など)を、FB でロバスト安
定性や追従性(外乱抑圧性など)を、それぞ
れ規定することができる。しかしながら、実
際の産業応用に際しては、様々な制御対象や
制御仕様・目的に対応して、現場的かつ試行
錯誤的に補償器設計を行うことが殆どであ
る。すなわち、アクチュエータの出力飽和や
機構振動、環境や外乱の変動、機械パラメ
ータの変動など、制御性能劣化の原因となる各
種制約条件の下でも所望の制御性能を満足
させるシステムティックな設計法は、未だ十
分整備されるに至っていない。

一方、申請者らは科学研究費として平成 14
~15 年度萌芽研究(課題番号:14655157)
と平成 16~17 年度基盤研究 A(課題番号:
16206043)の補助を受け、研究内容の一部で
2 自由度制御による高速高精度位置決め
に関する基礎検討を行った。具体的には、複数
の振動モードを有する機構系と摩擦などの
外乱に対する精密モデリング手法、規約分解
表現や終端状態制御による FF 補償器設計法、
モード切替え制御や適応同定器による環境
や特性変動に対するロバスト性能の具備等
を開発した。その後、産学連携共同研究を通
じて、それらの成果を様々な実フィールドへ
応用展開し、所望の制御性能実現の可能性を
示してきた。しかし、上記背景と同様、そこ
でも要素技術を個別展開した例が大半であり、
各種制約条件に対する定式化、制御仕様
を陽に考慮した補償器設計など、統一的かつ
システムティックな学問的アプローチの確
立が課題として残されていた。

2. 研究の目的

本研究では先ず、2 自由度位置決め制御系
の FF 補償器設計に焦点を当て、LMI の応用
として制御対象や要求仕様に対応する制約
条件を定式化する方法論を整備し、その定式
化の下で最適化問題を解くことで、所望の制
御特性を満足させる FF 補償器設計の提示を
目的とした。すなわち、

1) 駆動アクチュエータの制約(トルクや推
力制限など)、位置決め機構に内在する振
動モードや機器設置床面との連成振動、摩

擦に代表される外乱による位置決め制御
誤差、機器駆動環境の温度変化や経年変化
によるプラント特性変動、位置決め時の駆
動音、などの各制御対象に対応する制約や
仕様を、最適化問題として扱うことのでき
る制約条件として LMI によって定式化す
る

2) 終端状態制御による FF 補償器構造を前
提に、指定した制約条件下での FF 設計を
LMI 最適化問題に帰着させることで、所望
のロバストな制御仕様の満足を保証する
ことにより、各種各様な制約条件を LMI に
よる最適化問題の枠組みで統一的に扱う設
計論を展開し、様々な位置決め装置への応用
展開を探る。その結果、例えば、機構振動を
所望の振幅に抑圧する高精度位置決め、プ
ラント変動に対するロバスト性能の具備、機
械の駆動音を最小化する位置決め等、従来
の FF 補償器設計では実現できなかった制御
性能の実現が可能となる。

一方、本提案設計手法において“LMI によ
る最適化問題が可解”ということは、併せて用
いる FB 補償器や位置決め機構に対して“要
求仕様を満足する FF 補償器候補が存在す
る”ことと等しい。その意味を逆に捉えれば、
本手法は『所望の位置決め性能を達成するた
めに、最適な FB 補償器や機構構造はどうあ
るべきか?』を提示する発展性も併せ持つ。
従って、研究工程の後半では

3) LMI 最適化問題によるアプローチを、FF
と FB 補償器の連携設計、さらに位置決め
機構系と補償器の同時最適化へ応用展開
する

ことで、従来殆ど議論がなされていない 2 自
由度制御系の FF/FB 連携設計の可能性や、
既存の機構と制御の同時設計とは全く異なる
新しい設計論を提示し、実機適用すること
を目的とした。

3. 研究の方法

前述した本研究の目的である、LMI による
制約条件の定式化の方法論と LMI 最適化問題
による FF 補償器設計論の確立、さらにその
応用展開を、実機実験を併用して検証する具
体的な研究計画とその方法は、以下のように
纏められる。

1) 2 自由度位置決め制御系の設計論の確立 と実機による基礎検証(平成 23 年度)

終端状態制御による FF 制御入力生成に際
して、最適化に用いる二次形式評価指標と
所望の制御仕様を不等式で連立して LMI で
表現することで、制約条件の定式化とする。
そして、LMI 制約条件に対して Schur
Complement を適用し最適化問題を解くこ
とで、本提案の FF 補償器設計論とする。
23 年度には、加振実験用振動台上に搭載し
たボールねじ位置決めテーブル装置を用
いた実機基礎検証を行い、位置決め精度と
機台振動振幅を評価して本設計法の有効
性を示す。

2) 実機による応用検証と2自由度制御系設計論の応用展開(平成24年度,25年度)
温度変化によるパラメータ変動下の位置決め精度誤差値やテーブル駆動音レベルを制約条件に選んで、ロバスト制御性能や駆動音抑制を提案手法の応用検証とする。さらに、LMIによる最適化指標値とFB補償器パラメータ又は機構パラメータの関係を、最適化の可解条件として解析することで、FFとFBの連携設計や機構と制御の同時最適化へ展開する。

(1) 平成23年度研究計画・方法

LMIを用いた2自由度位置決め制御系の設計論の確立

本研究では、終端状態制御に基づく2自由度位置決め制御系を前提とし、与えられた制御仕様・目的を満足するFF補償入力生成を、FF補償器設計論と位置付ける。従前の終端状態制御によるFF制御入力生成では、所望の位置決め応答時間(応答ステップ数)の指定の他、入力の高周波成分除去を目的とした入力の二次形式評価指標(等式制約条件)の下で最適化問題を扱っていた。一方、本提案手法では、任意に与える制御仕様を不等式で表現して従来からの入力二次形式指標と連立することで、LMI表現としての制約条件(不等式制約条件)の一般定式化とする。

次に、定式化された制約条件下で最適化問題を解くが、その不等式条件下では従前の線形最適化手法を適用できないため、Schur ComplementによるLMI表現に変換し、FF補償器設計論を展開する。本手法は制約条件の設定自体に設計自由度を有することになり、従来設計手法に見られない、極めて独創性の高い設計論である。

テーブル位置決め装置による基礎検証

本提案手法の実機基礎検証として、申請者研究室所有の加振試験用油圧振動台に搭載したボールねじテーブル位置決め装置を用い、機台振動抑制を考慮した高精度位置決め制御実験を行う。ここでは、テーブル駆動モータで決まる制御入力飽和値と、振動台によって任意に再現されるテーブル機台振動振幅値及びテーブル位置決め精度のそれぞれを、LMIによって制約条件として提案手法に従い定式化する。実験に際しては、振動台をインピーダンス制御することで、テーブル位置決め装置の機台設置床面を任意の剛性で模擬する。

この基礎検証では、駆動モータの飽和範囲内で、所望のテーブル位置決め精度と機台振動振幅の満足を両立する位置決めが実現できるかを、サーボアナライザによる周波数領域での評価も併せて、提案設計論の有効性を示す。

(2) 平成24年度以降の研究計画・方法

ロバスト補償器設計の応用検証

本設計手法の応用検証として、プラントにパラメータ変動が生ずる場合にも所望の位置決め性能を保証する、ロバストFF補償器設計を行う。具体的には、プラント変動を有する2自由度制御系モデル出力を制約条件に加えることで、想定するプラント摂動範囲内で所望の位置決め精度を担保するFF補償器設計を実現する。その実機検証に際しては、研究室現有の恒温恒湿ルーム内で温度設定を可変して、実機パラメータを直接変動させてロバスト位置決め制御性能評価を実施する。

更なる応用検証例として、位置決め装置から発生する駆動音レベルを制約条件に組み込み、所望の騒音抑制を併せて実現可能な高精度位置決め制御系設計を試みる。ここでは、騒音測定システムによって実際の騒音レベルも評価する。このような騒音を考慮した位置決め制御系設計は、他に例を見ない極めて先駆的な試みである。

2自由度制御系設計論の応用展開

本FF補償器設計に際しては、制約条件に対する評価指標の解空間の中で最適化問題を解くことになる。すなわち、この解空間を最適化問題の可解条件として捉えて解析すれば、評価指標を低く抑えるFB補償器パラメータや機構系パラメータの範囲を逆に指定可能である。本研究では、これをFFとFBの連携設計、機構系と制御系の同時設計と位置付け、提案補償器設計論の応用展開とする。このような連携設計・同時設計の概念は、従来から検討されている他の手法とは全く異なるアプローチであり、極めて独創性が高く革新的な試みである。

4. 研究成果

本研究では、以上の背景・目的と研究方法の計画の下、制御対象に特有の制約条件を線形行列不等式(LMI)で定式化してその最適化問題を扱うことで、所望の制御仕様を満足する2自由度位置決め制御系の方法論・設計論を、産業界に先駆けて学理に即して展開した。得られた研究成果を各年度毎に纏めると、以下のようになる。

(1) 平成23年度の成果

終端状態制御に基づく2自由度位置決め制御系を前提に、与えられた制御仕様・目的を満足するFF補償入力生成を、FF補償器設計として実施した。従前の終端状態制御によるFF制御入力生成では、所望の位置決め応答時間(応答ステップ数)の指定の他、入力の高周波成分除去を目的とした入力の二次形式評価指標(等式制約条件)の下で最適化問題を扱っていたが、本提案手法では、任意に与える制御仕様を不等式で表現して従来からの入力二次形式指標と連立することで、LMI表現としての制約条件(不等式制約条件)の一般定式化とした。そして、定式化された

制約条件下で最適化問題を解くが、その不等式条件下では従前の線形最適化手法を適用できないため、Schur ComplementによるLMI表現に変換し、FF補償器設計論を展開した。

本提案手法の実機基礎検証として、申請者研究室所有の加振試験用油圧振動台に搭載したボールねじテーブル位置決め装置を用い、機台振動抑制を考慮した高精度位置決め制御実験を行った。そこでは、テーブル駆動モータで決まる制御入力飽和値と、振動台によって任意に再現されるテーブル機台振動振幅値及びテーブル位置決め精度のそれぞれを、LMIによって制約条件として提案手法に従い定式化した。実験に際しては、振動台をインピーダンス制御することで、テーブル位置決め装置の機台設置床面を任意の剛性で模擬した。この基礎検証では、本研究費の設備備品として購入したDSPコントローラに提案アルゴリズムを実装して実機実験を行った。駆動モータの飽和範囲内で、所望のテーブル位置決め精度と機台振動振幅の満足を両立する位置決めが実現できるかを、同様に設備備品として購入したサーボアナライザによる周波数領域での評価も併せて、提案設計論の有効性を示した。

(2) 平成 24 年度の成果

平成 24 年度には、平成 23 年度に実施した「LIMを用いた 2 自由度位置決め制御系の設計論の確立」および「テーブル位置決め装置による設計論の基礎検証」に引き続き、以下の 2 点を重点的に研究展開した。

ロバスト補償器設計の応用検証：本 2 自由度制御系設計手法の応用検証として、プラントにパラメータ変動が生ずる場合にも所望の位置決め性能を保証する、ロバスト FF 補償器設計を行った。具体的には、プラント変動を有する 2 自由度制御系モデル出力を制約条件に加えることで、想定するプラント摂動範囲内で所望の位置決め精度を担保する FF 補償器設計を実現した。その実機検証に際しては、平成 23 年度に本科研費にて整備したボールねじテーブル位置決め装置のパラメータを直接変動させて、ロバスト位置決め制御性能評価を実施した。更なる応用検証例として、位置決め装置から発生する駆動音レベルを制約条件に組み込み、所望の騒音抑制を併せて実現可能な高精度位置決め制御系設計を試みた。そこでは、騒音測定システムによって実際の騒音レベルも評価した。

2 自由度制御系設計論の応用展開の基礎検討：本 2 自由度位置決め制御系の FF 補償器設計に際しては、制約条件に対する評価指標の解空間の中で最適化問題を解くことになるため、この解空間を最適化問題の可解条件として捉えて解析すれば、評価指標を低く抑える FB 補償器パラメータや機構系パラメータの範囲を逆に指定可能である。本年度には、これを FF と FB の連携設計、機構系と制御系の同時設計と位置付け、提案補償器設

計論の応用展開とした。

(3) 平成 25 年度の成果

平成 25 年度には、本研究プロジェクトで確立した 2 自由度制御系設計の応用展開として、制御系と機構系のパラメータに対する同時最適化の検討および実機実験検証を推進し、本研究課題の纏めとした。そして、今後の新たな研究課題提案の準備として、

- 1) LMI 応用による非線形補償を含めたロバスト位置決め指令生成、
 - 2) 位置決め指令生成に伴う最適な機構形状の設計手法、
- それぞれの基礎を検討した。

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 9 件)

Yoshihiro Maeda and Makoto Iwasaki:
“Circle Condition-Based Feedback Controller Design for Fast and Precise Positioning”, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.61, No.2, pp.1113-1122, February 2014

Yoshihiro Maeda and Makoto Iwasaki:
“Mode Switching Feedforward Compensation Considering Rolling Friction Characteristics for Fast and Precise Positioning”, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.61, No.2, pp.1123-1132, February 2014

Yoshihiro Maeda and Makoto Iwasaki:
“Rolling Friction Model-Based Analyses and Compensation for Slow Settling Response in Precise Positioning”, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.60, No.12, pp.5841-5853, December 2013

Yoshihiro Maeda and Makoto Iwasaki:
“Initial Friction Compensation Using Rheology-Based Rolling Friction Model in Fast and Precise Positioning”, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.60, No.9, pp.3865-3876, September 2013

Yoshihiro Maeda, Masatake Wada, Makoto Iwasaki, and Hiromu Hirai:
“Improvement of Settling Performance by Mode Switching Control with Split Initial Value Compensation Based on Input Shaper”, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.60, No.3, pp.979-987, March 2013

加藤, 前田, 岩崎, 平井: 「フィードフォワード・フィードバック補償器の連成設計による 2 自由度ロバスト制振位置決め制御系の設計」電気学会論文誌, Vol.133-D, No.3, pp.290-299, 2013

Makoto Iwasaki, Kenta Seki, and Yoshihiro Maeda: “High Precision Motion Control Techniques -A Promising Approach to Improving Motion Performance”, IEEE Industrial Electronics Magazine, Vol.6, No.1, pp.32-40, March 2012

加藤, 前田, 岩崎, 平井: 「2 自由度ロバスト制振位置決め制御系のフィードフォワード・フィードバック補償器の連成設計」電気学会論文誌, Vol.131-D, No.12, pp.1416-1423, 2011

加藤, 前田, 岩崎, 平井: 「LMI を用いた 2 自由度ロバスト制振位置決め制御系の制御系の設計」電気学会論文誌, Vol.131-D, No.1, pp.93-101, 2011

〔学会発表〕(計 5 件)

Yoshihiro Maeda and Makoto Iwasaki: “Circle Condition-Based PID Controller Design Considering Robust Stability Against Plant Perturbations”, Proc. of the 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp.6440-6445, 2013 (Vienna)

Souichi Toyama, Yousuke Okado, Yoshihiro Maeda, Makoto Iwasaki, and Hiromu Hirai: “Adaptive Deadbeat Feedforward Compensation for Robust Positioning Performance Against Plant Perturbations”, Proc. of IEEE International Conference on Mechatronics, pp.670-675, 2013 (Vicenza)

Takanori Kato, Yoshihiro Maeda, Makoto Iwasaki, and Hiromu Hirai: “A Coordinate Design of Two-Degrees-Of-Freedom Controller for Fast and Precise Positioning”, Proc. of International Workshop on Advanced Motion Control, 6 pages, 2012 (Sarajevo)

Yoshihiro Maeda and Makoto Iwasaki: “Improvement of Settling Performance by Mode Switching Feedback Compensation in Fast and Precise Positioning”, Proc. of the 37th Annual Conference of the IEEE

Industrial Electronics Society, pp.3287-3292, 2011 (Melbourne)

Yoshihiro Maeda, Masatake Wada, Makoto Iwasaki, and Hiromu Hirai: “Improvement of Settling Performance by Mode Switching Control with Split Initial Value Compensation Based on Input Shaper”, Proc. of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp.905-910, 2011 (Gdansk)

〔図書〕(計 1 件)

Makoto Iwasaki (分担執筆): “Advances in High-Performance Motion Control of Mechatronic Systems”, Chapter 3, “Transient Control Using Initial Value Compensation”, CRC Press, June 2013

〔その他〕

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩崎 誠 (IWASAKI, Makoto)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 10232662