

令和 5 年 5 月 1 日現在

機関番号：13903
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：20K04545
研究課題名（和文）非線形性を有する精密サーボ機構に対するシンプルかつ高性能な位置決め制御法の開発
研究課題名（英文）Development of a Simple and High-Performance Positioning Control Method for Precision Servo Systems with Nonlinearity
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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：機構剛性や摩擦等の非線形要素を有する精密サーボ機構の高速・高精度位置決め制御手法として、位置決め動作時のプラント入出力信号から非線形要素を効果的に近似するプラント周波数応答関数（FRF）の推定し、その推定FRFに基づくシンプルな線形モデルベースのフィードフォワード制御手法を開発した。FRF推定に対する詳細な理論検討、ならびに産業用精密位置決め機構であるガルバノスキャナを対象としたシミュレーションならびに実験を通じて、提案手法の有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、学术界で現在主流となっている非線形要素に対する複雑なシステム同定を伴う非線形モデルベースの制御手法に対して、非線形要素の影響を効果的に禁じ可能な線形プラントモデル同定法を構築することで「制御性能」と「シンプルさ」を高度両立する実学ベースの線形プラントモデルベース制御を確立した点に学術的創造性を有する。これは、精密サーボ機構を具備する後半の産業機械の性能向上と制御設計労力の低減を実現し、労働人口不足が懸念される日本のモノづくり力の向上という社会的貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We developed a simple linear model-based feedforward control method for fast and precise positioning control of a precision servo mechanism with nonlinear elements such as mechanism rigidity and friction. The proposed method estimates the plant frequency response function (FRF) that effectively approximates the nonlinear elements from plant input/output signals during a positioning motion. Through detailed theoretical analysis of the FRF estimation and simulations and experiments using a galvano scanner, which is an industrial precision servo mechanisms, we verified the effectiveness of the proposed method.

研究分野：モーションコントロール

キーワード：精密位置決め モーションコントロール 周波数応答関数 フィードフォワード制御 線形モデル 非線形要素

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

産業用精密サーボ機構の高速・高精度位置決め制御技術は、ものづくりの生産性や品質を左右する重要な要素技術であり、日本が世界をリードする技術分野である。そこでは、制御性能と制御設計の容易さの両視点から摩擦や機械剛性に代表される非線形要素を極力低減した機構設計が行われており、プラントを線形とみなした2自由度制御手法が多用されている。2自由度制御では、モデルベースのフィードフォワード (FF) 制御が制御性能の大半を決定するため、システム同定が高速・高精度性能の追及において重要な役割を担う。

しかし、高速・高精度性能の追及に伴い、微小ながらも現実には存在する非線形要素の影響が顕在化し、従来の正弦波やランダム信号加振等のシステム同定手法により獲得したプラント周波数応答関数 (FRF: Frequency Response Function) から構築した線形モデルベース FF 制御では十分な位置決め性能を獲得できないことが確認されている。この問題に対し、学界では非線形要素に対する非線形モデルベース制御手法に関する研究が数多く行われてきた。本アプローチは原理原則に基づく制御設計が可能な反面、産業応用上でメリットとなるシステム同定・制御設計の複雑化、実装コストの増大は避けられない。非線形性を有するプラントに対し、従来の線形モデルベース FF 制御の枠組みによるシンプルな位置決め制御手法は学術的に確立されておらず、取り組むべき課題であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、非線形性を有する精密サーボ機構を対象に、位置決め入出力信号から非線形システムをよく近似する線形プラントモデルを同定するという独創的なシステム同定手法に基づいた、シンプルかつ高性能な位置決め制御手法を開発することである。本研究では代表的な非線形要素として「モータ/負荷結合部の機械剛性」と「軸受・案内部の摩擦」に焦点を絞り、下記3つを具体的な研究目的とする。

- 1) 非線形要素モデルを用いたシミュレーション解析により、非線形要素の物理的挙動と見かけのプラント FRF 変化の関係を明らかにする。
- 2) 非線形要素の影響を合理的に同定できるという仮説の下、位置決め動作時のプラント入出力信号を用いたプラント FRF 推定手法を構築する。
- 3) 産業用精密サーボ機構を対象に、提案 FRF 推定手法に基づくシンプルな線形モデルベース FF 制御の有効性を実機実験により検証する。

3. 研究の方法

1) 非線形要素の物理的挙動と見かけのプラント FRF 変化の関係明確化

kHz オーダの応答周波数、 μm オーダの位置決め精度が要求されるガルバノスキャナを制御対象として、線形要素に対するモデルと非線形要素 (モータ・負荷結合部の機械剛性の非線形性) に対するモデルを組み合わせた非線形2慣性物理モデルを構築する。そして、諸種の動作条件で測定した実測結果と当該モデルを用いたシミュレーション結果を比較・分析し、非線形要素の物理的挙動が見かけのプラント FRF に与える影響を明らかにする。

2) 位置決め入出力信号を用いたプラント FRF 推定手法の構築

本研究最大のポイントとなる位置決め入出力信号を用いたプラント FRF 推定は、研究代表者らの先行研究で提案している ETFE-Diff (Empirical Transfer Function Estimation With Differential Filtering) 法を基調とし、その推定理論を発展させて構築する。ただし、本手法は本質的に入力信号のスペクトルが小さい周波数帯では出力信号の量子化誤差や雑音により無視できない FRF 推定誤差が生じるため、その対策として (a) 出力センサの高通倍率化、(b) 出力オーバーサンプリング、(c) FRF 補正アルゴリズム、の3つのアプローチを入念な理論検討とシミュレーション評価を通じて開発する。また、3つのアプローチを諸種の条件で評価可能な実験システムを新規に開発し、FRF 推定精度、コスト、演算負荷などの観点から多角的に評価すると共に、効果的な組み合わせ方法も実機実験を通じて明らかにする。

3) 提案 FRF 推定手法に基づく線形モデルベース FF 制御の有効性検証

提案 FRF 推定手法により獲得した推定プラント FRF を高精度に再現する線形パラメトリックモデル同定手法を構築する。ここでは、FRF 再現精度や同定効率を評価項目として、データ駆動型を前提とした様々なシステム同定手法を比較検討する。次に、同定モデルベースの線形 FF 制御を実験システムに実装し、高速・高精度位置決め制御における提案法の有効性を実験により明らかにする。

4. 研究成果

1) 非線形要素の物理的挙動と見かけのプラント FRF 変化の関係明確化

ガルバノスキャナの機械剛性の非線形性として、モータ・ミラー間の軸ねじれ角変位と軸ねじれトルクの特実を実測したところヒステリシス特性が確認されたため、Smoothed Generalized Maxwell Slip (S-GMS) モデルを用いて非線形剛性を表現し、非線形 2 慣性物理モデルを構築した(図 1)。正弦波外乱印加時における非線形性と見かけの FRF 変化の関係をシミュレーションと実験を比較分析したところ、非線形性は特に共振周波数付近において 2 慣性の振幅・位相関係を変化させるように作用することが確認され、これが実験結果で見られる見かけの FRF 変化を生じさせていることが明らかとなった(図 2)。

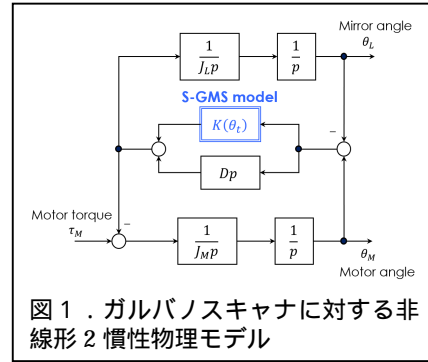


図 1. ガルバノスキャナに対する非線形 2 慣性物理モデル

2) 位置決め入出力信号を用いたプラント FRF 推定手法の構築

(a)出力センサの高通倍率化については、通倍率を増加するほど量子化による等価雑音レベルが低下し、1~2 bit でも高分解能化できれば 5~10 dB 程度の推定誤差の低減が可能であった。このことから、使用する出力センサやコントローラに仕様上の余裕があれば、可能な限り高通倍率化するのが望ましいことが明らかとなった。

(b)出力オーバーサンプリングについては、サンプリング周期を短縮するほど量子化や雑音の影響が低下するが、量子化による等価雑音の変化は主に高周波数領域(ナイキスト周波数付近)に集中し、精密サーボのように予めサンプリング周期が十分小さく設定される場合は出力オーバーサンプリングの効果は極小であった。雑音については、理論的にはサンプリング周期を 1/10 倍することで推定誤差を 10 dB 程度低減できるが、これも雑音レベルが出力信号レベルに対して十分小さい精密サーボの場合は効果が小さいことが確認された。

(c)FRF 補正アルゴリズムについては独自技術の ETFE-Diff 法を基調として、量子化や雑音起因の FRF 推定誤差発生周波数の推定と、局所周波数モデリング法に基づく推定 FRF 補正を行う新たな FRF 推定手法を開発した。本手法は、局所周波数モデリング法のようにランダム雑音信号等の外部信号加振を必要とせず、位置決め入出力信号そのものから FRF の推定・補正が可能である。シミュレーションによる原理検証では、量子化ならびに雑音存在下でも真のプラント FRF を高精度に推定可能であることが確認された(図 3)。

上記(a)~(c)の 3 手法を実験システムに実装し、実験評価を行った結果、単体での FRF 推定誤差低減効果は(c) > (a) (b)であり、組み合わせとしては(a)と(c)が最良であった。また、費用対効果の観点では、最小二乗法ベースの効率的なアルゴリズムの追加のみで実現可能かつ FRF 補正性能も極めて高い(c)単体が最も効果的であると結論付けた。

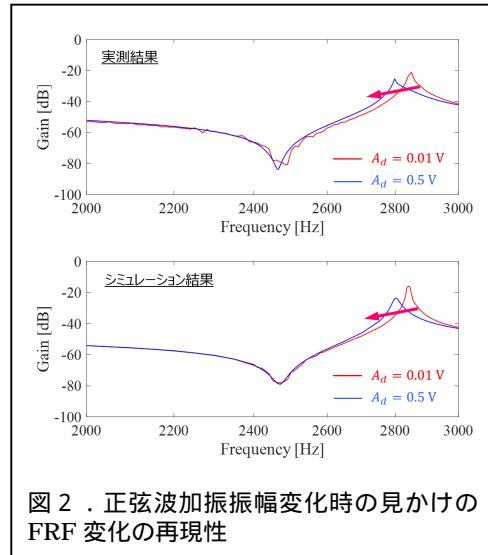


図 2. 正弦波加振振幅変化時の見かけの FRF 変化の再現性

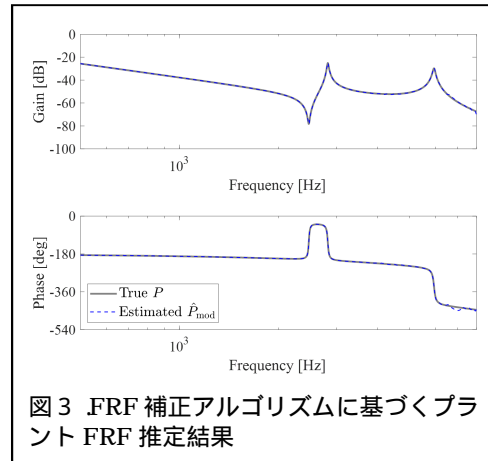


図 3 FRF 補正アルゴリズムに基づくプラント FRF 推定結果

3) 提案 FRF 推定手法に基づく線形モデルベース FF 制御の有効性検証

(c)に基づく推定プラント FRF に対するパラメトリックモデル同定手法として、遺伝的アルゴリズムと最小二乗法を組み合わせた協調型最適化によるデータ駆動型のパラメータ同定手法を構築した。他にも Vector Fitting, 偏分反復法, 遺伝的アルゴリズムなどの単体によるシステム同定手法と比較評価したが、同定精度と効率、そして初期点設定の容易さの観点から協調型最適化が最も優れた結果となった。提案 FRF 推定に基づく線形 FF 制御をガルバノスキャナの位置

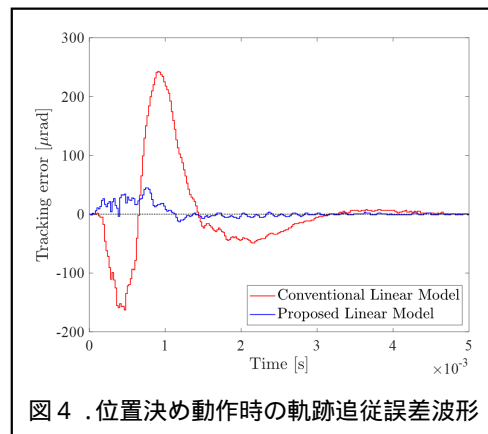


図 4. 位置決め動作時の軌跡追従誤差波形

決め制御実験に適用した結果，正弦波掃引法による測定 FRF ベースの線形 FF 制御と比較して軌跡追従誤差面積を約 98 %低減し，高速・高精度な位置決め性能の獲得に成功した（図 4）。

なお，提案 FRF 推定手法に基づく線形 FF 制御アプローチは非線形摩擦を有するテーブル位置決め機構にも応用し，その有効性が確認されていることから，本研究成果は一般性があり，微小な非線形性を有する精密サーボ機構に対して極めて効果的と言える。また，本研究のポイントである位置決め入出力信号を用いた FRF 推定については，他手法との詳細比較，推定帯域拡大手法の検討，非線形要素と FRF の同時同定，モデリングフリー学習型制御への応用など，当初の予想以上の学術的成果を収めることができた。今後はこれらの成果を基調として，より強い非線形性を有する精密サーボ機構への応用・発展，複雑な制御設計の完全自動化への応用など，シンプルかつ高性能な新しい制御設計技術の創出を目指した研究を進めていく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yoshihiro Maeda and Makoto Iwasaki	4. 巻 70
2. 論文標題 Empirical Transfer Function Estimation with Differential Filtering and Its Application to Fine Positioning Control of Galvano Scanner	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 10466-10475
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIE.2022.3217616	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yoshihiro Maeda and Makoto Iwasaki
2. 発表標題 Frequency-Domain Modeling-Free Iterative Learning Control for Point-To-Point Motion
3. 学会等名 The 32nd IEEE International Symposium on Industrial Electronics（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小楠 飛鳥, 原 涉, 前田 佳弘, 加藤 紀彦, 名和 政道, 吉原 康二, 箕浦 康祐
2. 発表標題 局所周波数モデリングに基づく摩擦システムに対する周波数応答関数と摩擦の同時同定
3. 学会等名 精密工学会 春季大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大橋 保之, 塩原 卓矢, 前田 佳弘
2. 発表標題 協調最適化に基づくプラント周波数応答関数の高効率自動モデリング
3. 学会等名 精密工学会 春季大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原 涉, 小楠 飛鳥, 前田 佳弘, 中上礼奈, 加藤 紀彦, 名和 政道, 吉原康二, 箕浦 康祐
2. 発表標題 摩擦システムに対する簡易な摩擦モデルを用いた高精度プラント周波数応答関数推定法
3. 学会等名 電気学会 メカトロニクス制御研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤 慎平, 小楠 飛鳥, 前田 佳弘, 岩崎 誠
2. 発表標題 位置決め動作信号を用いた周波数応答関数推定問題に対する局所周波数モデリング法の適用評価
3. 学会等名 電気学会 メカトロニクス制御研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Ogusu, Y. Maeda, and M. Iwasaki
2. 発表標題 Comparisons of FRF Identification Methods Suitable for Linear Model-Based Feedforward Control of Galvano Scanner
3. 学会等名 The 8th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤 大峻, 田中 直紀, 前田 佳弘, 岩崎 誠
2. 発表標題 反復位置決め動作に基づくプラント周波数応答関数同定法
3. 学会等名 精密工学会 春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小楠 飛鳥, 田中 直紀, 前田 佳弘, 岩崎 誠
2. 発表標題 2慣性共振系における共振モードの測定条件依存性の要因考察
3. 学会等名 精密工学会 春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中 直紀, 前田 佳弘, 岩崎 誠
2. 発表標題 位置検出値の量子化の影響を考慮したプラント周波数応答関数推定法
3. 学会等名 電気学会 メカトロニクス制御研究会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 周波数応答関数同定システム	発明者 前田 佳弘, 原 渉, 中上 礼奈	権利者 木下 隆利
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-138155	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 FRF同定システム, FRF同定方法及びILCアルゴリズム	発明者 前田 佳弘, 田中 直紀, 伊藤 大峻	権利者 木下 隆利
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-031312	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

前田研究室ウェブサイト https://icontrol.web.nitech.ac.jp/ 前田研究室ウェブサイト http://icontrol.web.nitech.ac.jp/
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	岩崎 誠 (Iwasaki Makoto)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関