

2019年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	名古屋工業大学 大学院工学研究科 電気・機械工学専攻
職位または役職	准教授
氏名	前田 佳弘

1. 研究題目

高性能と省労力を高度両立する自動制御設計技術の開発

2. 研究目的

生産年齢人口の減少によるものづくり力の低下という日本が抱える社会問題の一つを解決すべく、これまで複雑さという理由から多大な労力が必要であった各種産業用ロボットに対する制御設計を完全自動化する自動制御設計技術の開発を本研究の最終目的とする。一般に制御設計は、「システム同定・モデリング」、「コントローラ設計」、「コントローラ調整・適応」という3つの設計プロセスに従って行われるが、本申請研究はその中の「システム同定・モデリング」と「コントローラ設計」を短時間かつ高度に自動実行する制御設計技術を開発する。

申請者は過去2年間の助成研究において、「システム同定・モデリング」に係る周波数応答関数(FRF: Frequency Response Function)推定法に関する研究を行ってきた^{[1],[2]}。提案するFRF推定法は、実働中の“単一の位置決め応答データ”からプラントFRFの推定が可能であり、産業界で多用される正弦波掃引法と比較して短時間でFRFを獲得できる点が特徴である。これは自動制御設計の効率化に向けて有効と考えられるが、原理的に推定FRFには急峻に歪んだ形状の推定誤差が発生するため、広帯域なフィードバック(FB)制御器を設計するためには本FRF推定法の特徴を要に考慮した「コントローラ設計」が必要である。本申請研究の具体的な目的は、提案FRF推定法と申請者が別途研究を行っているFB制御器設計法を効果的に組み合わせ、位置決め動作を数回行うだけで広帯域FB制御器を自動設計可能な先進的な自動制御設計法を構築し、その有効性を明らかにすることである。

[1] Y. Maeda et al., "Comparative Evaluations of Frequency Response Analysis Methods for Fast and Precise Point-to-point Position Control," in Proc. of the 15th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC2018), pp. 437-442, 2018.

[2] H. Tachibana et al., "Comparisons of Frequency Response Function Identification Methods using Single Motion Data: Time- and Frequency-domain Approaches," in Proc. of the 2019 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM2019), pp. 498-503, 2019.

3. 研究内容及び成果

3.1. FRF 推定誤差を低減する反復型 FRF 推定法の構築

単一位置決め応答データを用いた FRF 推定法は、入力信号スペクトルが小さい周波数帯において出力信号の量子化に起因して推定誤差が生じることが先行研究で明らかになっている。そこで、文献[2]の FRF 推定法をベースとして、推定誤差の発生周波数を予測しながら位置決め動作と FRF 推定を反復して行うことで推定誤差を低減する反復型 FRF 推定法を提案・構築した。さらに、FRF 推定開始前においてプラントが多くの不確かさを含む場合においても高周波数領域までプラント FRF を自動推定するために、反復学習制御 (ILC) と組み合わせた反復型 FRF 推定法へと発展させた。

3.2. FRF 推定誤差を考慮した数理最適化に基づく FB 制御器設計法の構築

反復型 FRF 推定法においても位置決め応答周波数の 10 倍以上となる高周波数領域では正確な FRF 推定を行うことは原理的に困難であったため、高周波数領域における推定誤差の安定化を考慮した自動 FB 制御器設計法を構築した。本法は文献[3]の方法をベースとして、推定誤差を含む周波数帯の推定 FRF を非構造的な不確かさとして見なして最適化問題を定式化することで、推定誤差に対して現実的に十分なロバスト安定性を有しながら広帯域な FB 制御器の設計を可能としている。

- [3] Y. Maeda et al., "Hybrid optimization method for high-performance cascade structure feedback controller design," in Proc. of the 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2018), WD-004154, pp. 4588-4593, 2018.

3.3. ガルバノスキャナを用いた自動制御設計法のシミュレーション・実験検証

3.1 の反復型 FRF 推定法と 3.2 の FB 制御器設計法から構成される提案自動制御設計法を高速計算機上に実装し、レーザ穴明加工用ガルバノスキャナに対して自動制御設計シミュレーションならびに実機実験を行った。

自動制御設計のシミュレーション結果として、図 1 に推定プラント FRF の周波数特性と真値に対する誤差、図 2 に自動設計された FB 制御器のボード線図を示す。図 1 より、反復推定を行わない文献[2]の方法 (w/o Iteration) は、真のプラント FRF に対して約 1.5 kHz 以上の周波数帯で顕著な推定誤差が生じている。これに対し、反復型 FRF 推定法 (w/ Iteration) は、プラント FRF に対する正確な情報がない初期状態から 15 回の位置決め動作と FRF 推定を反復して行うことで、同周波数帯の推定誤差を大幅に低減し、真のプラントとほぼ同等の FRF を獲得している。その結果、図 2 に示すように初期の FB 制御器から低域を中心に全周波数帯でハイゲイン化された FB 制御器を自動的に設計できており、提案する自動制御設計法の有効性が検証された。

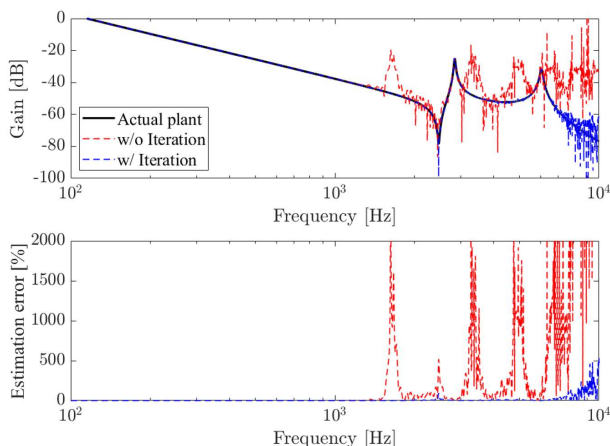


図 1. 推定プラント FRF と推定誤差
(シミュレーション)

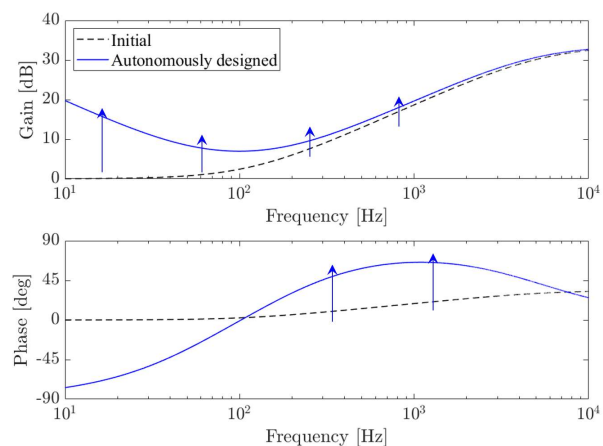


図 2. 自動設計した FB 制御器
(シミュレーション)

4. 今後の研究の見通し

3年に渡る助成研究を通して、単一位置決め応答データを用いたプラント FRF 推定という独創的なシステム同定法の深堀りが進み、それを軸とした自動制御設計という新しい制御設計法の輪郭を構築することができた。本研究では「システム同定・モデリング」と「コントローラ設計」を自動実行することを目的としたが、提案 FRF 推定法は「コントローラ調整・適応」を自動実行する上でも有用と考えており、今後は 3 つの設計プロセスを融合的に実行する自動制御設計法について研究を推進していく予定である。

5. 助成研究による主な発表論文, 著書名

学術論文(査読付)

- “Plant frequency response function estimation considering influence of output signal quantization,” IEEJ Journal of Industry Applications, 2021 (投稿予定)

国内会議(査読なし)

- 田中 直紀, 前田 佳弘, 岩崎 誠, 「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」, 2020 年度電気学会メカトロニクス制御研究会, MEC-20-037, 2020
- 「不確かさを有するプラントに対する周波数応答関数の自動推定法」, 2021 年度精密工学会学術講演会春季大会, 2021 (発表予定)