

## 2018年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関名	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

ものづくり社会の未来を拓く自動制御設計のための周波数応答関数同定法

### 2. 研究目的

本研究は、現代および将来的なものづくり社会における制御技術者不足の問題に対し、「自動制御設計技術」に関する基盤技術の一つである**制御対象の周波数応答関数 (FRF: Frequency Response Function) の短時間・高精度同定法**の構築を目的とする。一般に、FRF 同定では信号雑音比に優れた周波数応答解析が可能な正弦波掃引法が広く用いられるが、加振周波数を順次変化させながら周波数応答解析を行うため同定時間が長大となる。これに対し、**単一の位置決め動作における入出力時間信号のみを用いた FRF 同定法**<sup>[1]</sup>は、同定時間の大幅な短縮が可能であるため自動制御設計の高速化に有効と考えられる。しかし、高周波数領域における同定誤差が大きく、例えばフィードバック (FB) 制御器の自動設計問題においては高性能 FB 制御器の設計を困難とする。従って、制御器を短時間で・高性能に自動設計するという先進的制御設計を実現する上で、**FRF 同定帯域の拡大**は重要な研究課題の一つである。

- [1] Y. Matsui et al., “Parametric plant modeling using one-shot closed-loop transient response data,” in Proc. 11th Int. Conf. Electrical Eng./Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, pp. 1–6, 2014.

本申請研究では、単一の位置決め動作時の入出力時間信号のみを用いた FRF 同定法の枠組みにおいて、同定帯域拡大に向けて課題となる**高周波数領域の周波数応答歪みを抑制可能な FRF 同定法**を構築する。具体的には、時間信号検出用のセンサ分解能に起因する量子化誤差の統計的性質に着目し、それと周波数応答歪みの関係を実験的・理論的に考察すると共に、周波数応答歪みを抑制可能な FRF 同定法を見出す。そして、レーザ穴明け加工機で供される高速・高精度サーボ機構であるガルバノスキャナに提案 FRF 同定法を適用し、実機実験により有効性を明らかにする。

### 3. 研究内容及び成果

#### 3.1 確率的量子化誤差と周波数応答歪みの関係の実験的・理論的考察

量子化は時間信号振幅に対する非線形な処理であるため、量子化誤差の影響は位置決め動作条件によって変化すると考えられる。そこで、位置決め振幅、位置決め時間を変化させた場合の入出力時間信号に対して従来法<sup>[2]</sup>によるプラント FRF 同定を実施し、量子化誤差が周波数応答歪みに与える影響をシミュレーションと実験で確認した。その結果、**周波数応答歪みが発生する周波数は位置決め時間に強い相関を有する**という新たな知見を得た(図 1)。

一方、理論考察として、量子化誤差を白色雑音として表現し、位置決め入出力信号を用いた従来 FRF 同定法における周波数応答歪みの発生原理について考察した。その結果、**周波数応答歪みが発生する周波数は入力信号の周波数特性に依存し**、位置決め時間の変化に入力信号の周波数特性が変化することで図 1 のような同定誤差が生じることを明らかにした。

- [2] Y. Maeda et al., “Comparative evaluations of frequency response analysis methods for fast and precise point-to-point position control,” in Proc. 15th IEEE Int. Workshop Adv. Motion Control, pp. 437-442, 2018.

#### 3.2 周波数応答歪みを抑制する FRF 同定法の構築

確率的性質を持つ量子化誤差による FRF 同定誤差を抑制するために、1)雑音モデルとデジタルフィルタリングを組み合わせた確率的アプローチに基づく方法と、2)**プラント FRF の連続性に着目した FRF 整形による方法(提案法)**を構築した。1)は原理的に FRF 同定帯域を制限するしかなく、同定精度の向上は困難であった。一方、2)の提案法は**周波数応答歪みの発生周波数を入力信号から推定できることを利用して、付近の周波数帯の FRF 同定結果の情報を用いて効果的に周波数応答歪みを低減**することが可能となった(図 2)。

#### 3.3 ガルバノスキャナを用いた提案 FRF 同定法の実験評価

提案 FRF 同定法を高速計算機上に Matlab/Simulink を用いて実装し、ガルバノスキャナ位置決め制御システムと連携するオンライン FRF 同定実験システムを構築した。本実験システムを用いて提案法と従来法による FRF 同定実験を複数の位置決め条件で実施したところ、**提案法は図 2 に示すように周波数応答歪みを低減し、従来法よりも FRF 同定帯域の拡大を実現した。**

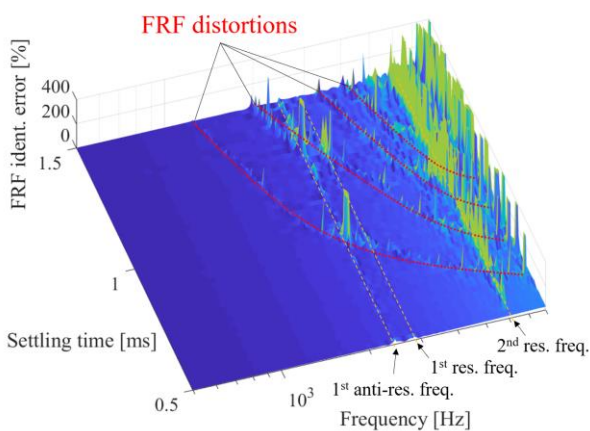


図 1. 位置決め時間変化時の FRF 同定誤差 (シミュレーション)

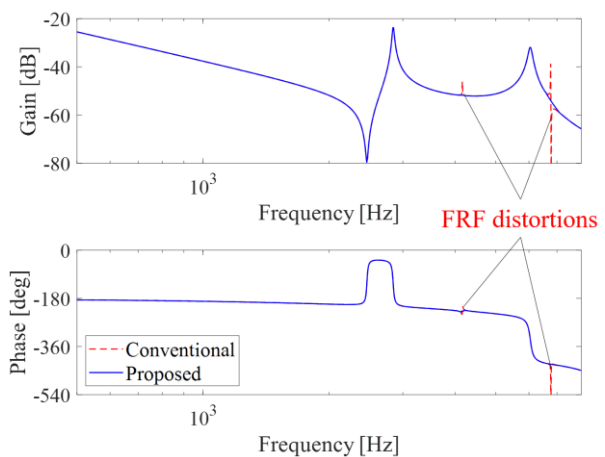


図 2. FRF 同定精度の比較(シミュレーション)

#### 4. 今後の研究の見通し

---

2017～2018年度の2年間に渡る助成研究の遂行により、一回の位置決め動作時の入出力信号からプラント FRF を同定する際に生じる周期的・非周期的な周波数応答歪みの発生原理とその抑制法を明らかにし、広帯域で高精度な FRF 同定が可能となった。2019年度の助成研究では、2018年度までの FRF 同定に関する研究成果と申請者の先行研究である数理最適化に基づく FB 制御器設計法を基調として、「位置決め動作」・「FRF 同定」・「FB 制御器設計」という3つのプロセスを数回繰り返すことで広帯域 FB 制御器を自動設計することを試みる。そこでは、2018年度の助成研究で得た“周波数応答歪みの発生周波数は入力信号に依存する”という知見を利用して、「FRF 同定」においては上記プロセスの繰り返し性を利用して確率的な量子化誤差の影響を繰り返し回数の増加と共に低減する方法を新たに開発する。一方、「FB 制御器設計」においては、プロセスを繰り返す毎に FB 制御帯域を広帯域化すべく、繰り返し回数が少ない段階で多分に含まれることが予想される FRF 同定誤差のロバスト安定化と広帯域化を両立する最適化問題の構成法について検討していく。

#### 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

---

##### <国際会議論文（査読有）>

- [1] H. Tachibana, N. Tanaka, Y. Maeda, and M. Iwasaki, “Comparisons of frequency response function identification methods using one-shot motion data: Time- and frequency-domain approaches,” in Proc. 2019 IEEE Int. Conf. Mechatron. (ICM), pp. 498-503, 2019 (Best Student Paper Award).
- [2] 周波数応答歪みを抑制する FRF 同定法についてまとめたものを、IEEE の国際会議に投稿予定。

##### <国内発表論文（査読無）>

- [3] 田中 直紀, 前田 佳弘, 岩崎 誠, 「単一位置決め動作データを用いた周波数応答関数同定法の比較」, 電気学会 産業応用部門大会, 2-23, pp. 141-144, 2019
- [4] 周波数応答歪みの発生原理についてまとめたものを、2020年電気学会産業応用部門大会にて発表予定。