

2017年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関名 (大学、大学院、研究所名)	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

超高速・精密サーボシステムの適応型制御に資する短インターバル過渡応答信号を用いた高精度 FRA 法

2. 研究目的

各種産業サーボシステムにおいて、高速・高精度位置決め制御は生産性や加工品質向上に直結する重要な要素技術の一つである。本研究で制御対象として扱うプリント基板レーザ加工機用ガルバノスキャナは、『kHz オーダの高速応答、 μm オーダの精密精度』という高度な制御性能を、短インターバル連続位置決め動作という厳しい条件下で要求される。その際、周囲温度変化や自己発熱によりモータのトルク定数や共振モードパラメータが変動し、高精度位置決めを阻害する。このようなパラメータ変動の問題に対して『パラメータ同定』と『制御器更新』に基づく適応型制御は有効な制御アプローチの一つであり、高精度位置決め性能を獲得するためには高精度なプラント周波数応答関数 (FRF) の同定が鍵になる。そこでは、最小二乗法に基づく時間領域ベースの周波数応答解析 (FRA) 法⁽¹⁾が広く知られているが、短インターバル動作時のプラント入出力信号を用いて高精度な FRA 結果を得ることが困難であることを、筆者らの先行研究で確認している。

(1) S. Hashimoto et al., "Derivation of modal parameters of a flexible structure based on the multi-decimation identification method," in Proc. 2002 IEEE Int. Symp. Ind. Electron., pp. 436-440, 2002.

本研究では、短インターバル連続位置決め動作中の適応型制御を可能とするために、短インターバル過渡応答信号を用いた高精度 FRA 法を提案する。提案法は、離散フーリエ変換 (DFT) を用いた周波数領域ベースの手法であり、新しい時間信号生成コンセプトに基づいて、短インターバル過渡応答信号から高精度なプラント FRF 同定の実現を目指す。

3. 研究内容及び成果

1) 短インターバル過渡応答信号を用いた周期的な時間信号生成法の確立

提案する周期的時間信号生成のコンセプトは、データ長 N の過渡応答信号（元信号）と、それを上下反転させた信号とを結合して、新たにデータ長 $2N$ の周期的時間信号を生成するものである（図1）。このデータ長 $2N$ の時間信号をDFTすることで、point-to-point (PTP) 位置決めデータのような非周期的時間信号をDFTした際に生じる周波数歪みの抑制が可能となった。ただし、図2, 3中に赤破線で示すように、時間信号のDFTに周期的不感帯が現れ、FRF 同定結果の同周波数帯において真のプラントFRF（黒点線）に対してスパイク状の誤差が生じることを確認した。

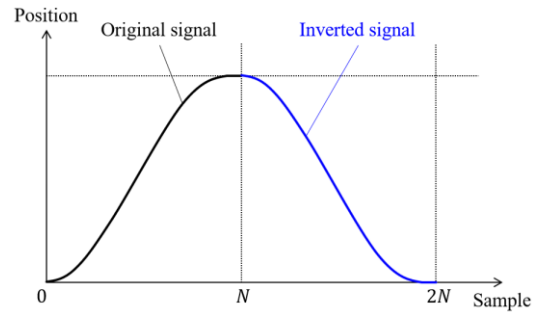


図1. 周期的時間信号生成のコンセプト

2) FRF 同定結果における周期的不感帯の発生要因の明確化と抑制手法の確立

1)で確認された周期的不感帯の発生要因を理論的に考察した。その結果、周期的不感帯はDFT対象信号のデータ長 N とサンプル周期に依存するものであり、入出力信号のDFTの比で定義されるプラントFRFにおいて理論的にはスパイク状の誤差は発生しないが、DFTを実行する計算機の有限数値演算精度の影響で現れることを明らかにした。それを踏まえ、入出力信号のDFTの数式表現を工夫し、周期的不感帯が理論的・現実的に生じない新しいFRA法を見出した。それは、元信号となる過渡応答信号を差分フィルタに通し、出力である差分信号（データ長 N ）をDFTするという極めてシンプルな方法である。加えて、その差分信号をDFTすることは図1のコンセプトと理論的に等価という、非常に興味深い関係性を明らかにした。

3) ガルバノスキャナを用いた提案法の実験検証

提案法を高速計算機上に実装し、ガルバノスキャナが短インターバルで連続PTP位置決め動作中の一組のプラント入出力信号を用いてFRAを行った。図2, 3中の青線は提案法を適用した場合の実験結果であり、時間信号のDFTにおける周期的な不感帯とFRF同定結果におけるスパイク状誤差を抑制できている。また、紙面の都合上図示は割愛するが、先行研究による周波数領域ベースのFRA法⁽²⁾との比較、提案法を用いた適応型フィードフォワード制御実験等も実施しており、提案法の有効性を多角的に明らかにした。

- (2) 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 Tech., pp. 1-6, 2014.

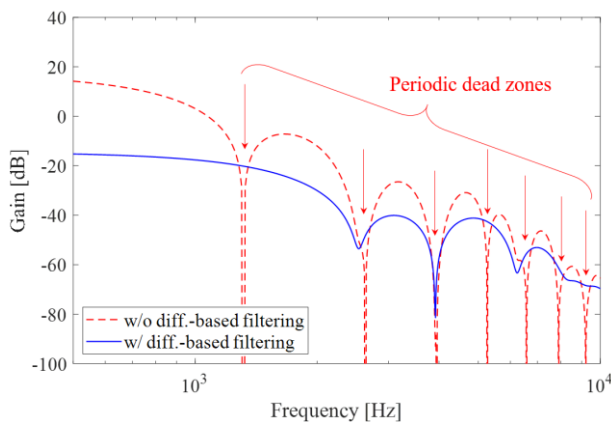


図2. 時間信号(位置)のDFT

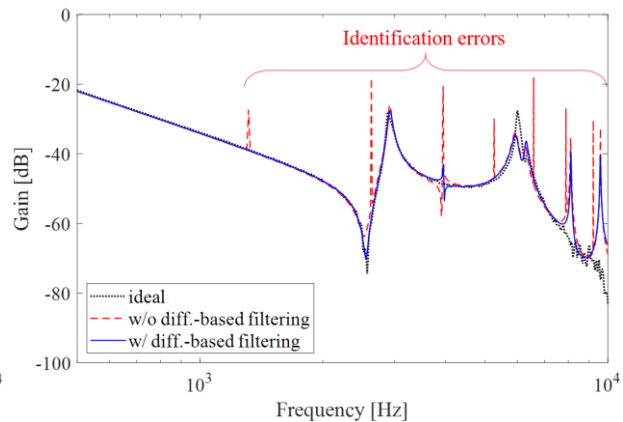


図3. ガルバノスキャナのFRF同定結果

4. 今後の研究の見通し

本研究では、主に短インターバル過渡応答信号の FRA 結果における周期的不感帯に着目し、理論的考察に基づいてその抑制法を提案したが、ガルバノスキャナの場合、高精度なプラント FRF 同定が可能な周波数帯域は主共振周波数付近（約 3 kHz）までであった。同定帯域の上限は時間信号の DFT に残存する“非周期的”な周波数で発生する周波数歪みによって制限されており、適応型 FF 制御の適用範囲の拡大、さらにはフィードバック制御設計への応用を見据えると、提案 FRA 法の更なる同定帯域拡大が課題である。継続研究では“非周期的”な周波数歪みに対する理論的な発生要因の考察と、それに対する効果的な抑制法について検討を行っていく。

5. 助成研究による主な発表論文, 著書名

<ジャーナル論文（査読有）>

[1] 提案法に基づく適応型 FF 制御についてまとめたものを海外ジャーナルに投稿予定。

<国際会議論文（査読有）>

[2] Y. Maeda, H. Tachibana, and M. Iwasaki, "Comparative evaluations of frequency response analysis methods for fast and precise point-to-point position control," in Proc. 15th IEEE Int. Workshop Advanced Motion Control (AMC), pp. 437-442, 2018.

[3] Y. Maeda, H. Tachibana, N. Tanaka, 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), 2019 (under review).

<国内発表論文（査読無）>

[4] 立花 弘貴, 前田 佳弘, 岩崎 誠, 「プラント同定における周期的周波数不感帯を考慮した FRA 法」, 電気学会全国大会, 4-227, pp. 393-394, 2017

[5] 立花 弘貴, 前田 佳弘, 岩崎 誠, 「短インターバル高速・高精度位置決め制御における過渡応答信号を用いた周波数応答解析法」, 電気学会産業応用部門大会, 2-27, pp. 163-168, 2017

[6] 立花 弘貴, 前田 佳弘, 岩崎 誠, 「過渡応答信号を用いた周波数応答解析法の適応型制御への応用」, 電気学会全国大会, 4-164, 2018

[7] 立花 弘貴, 前田 佳弘, 岩崎 誠, 「単一位置決めデータを用いた周波数応答関数同定における量子化の影響」, 高速信号処理応用技術学会研究会, p. 32, 2018