



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	位置決め制御系における Adaptive Feedforward Cancellation の理論的検証と系統的設計法に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	藪井, 将太
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11504号
Issue Date	2014-06-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/56703
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Shota_Yabui_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 藪井 将太

学 位 論 文 題 名

位置決め制御系における Adaptive Feedforward Cancellation の理論的検証と系統的設計法に関する
研究

(A Study of Adaptive Feedforward Cancellation in a Positioning System for Theoretical Analysis and
Systematic Design)

本研究では、位置決め制御系における外乱補償手である adaptive feed-forward cancellation (以下、AFC) の体系化を目的として、AFC の理論的検証と系統的設計法に関する研究を行った。産業応用分野で位置決め制御系の果たす役割は大きい。それらの位置決め制御系において、高精度な位置決めの阻害要因となる外乱を補償する制御手法は非常に重要である。そのため、高精度の位置決めを達成するために様々な外乱補償手法が提案されてきた。その代表的な外乱補償手法として挙げられるのが AFC である。AFC は適応アルゴリズムに基づいた外乱補償手法であり、補償する外乱をリアルタイムで推定し、その推定結果に基づいて外乱を補償する制御手法である。AFC については産業製品に適用した研究が報告されており、特に磁気ディスク装置の周期外乱の補償に非常に有効であることが確認されている。周期外乱補償については、内部モデル原理に基づいた理論的な検証結果も報告されている。しかしながら、非周期の外乱補償に AFC を適用した研究は報告されていない。位置決め制御系においては、非周期的外乱が高精度位置決めの阻害要因になることも多いため、そのような外乱を補償する制御手法が要求される。また、位置決め制御系に AFC を適用する場合、事前に設計が必要となるパラメータが存在するが、その系統的な設計法は確立されていない。従来までの研究では、主に時間応答で AFC の性能評価を行っており、解析的設計法に近く、試行錯誤を伴うような設計が行われてきた。つまり、位置決め制御系において AFC は周期外乱という限定的な外乱に対してのみ、有効性の確認と理論的検証が行われてきた。AFC のパラメータ設計は主に解析的設計法によって行われ、系統的な設計法は確立されていない。以上のことから、AFC は外乱補償制御としての有効性は実証されているものの、未だ外乱補償手法として体系化されていない制御理論といえる。

AFC の体系化を行うために、AFC による非周期外乱の補償に関する理論的検証と、試行錯誤を伴わない系統的な AFC のパラメータ設計法の確立を行った。具体的には、まず内部モデル原理に基づく理論的検証結果を用いて、外乱を推定する学習アルゴリズムの拡張した拡張型 AFC を提案した。その拡張型 AFC の学習アルゴリズムに対し、内部モデル原理に基づく検証を行った結果、非周期外乱の伝達関数モデルと一致することが分かった。つまり、拡張型 AFC により非周期外乱の補償が可能であることが理論的に示された。併せて、拡張型 AFC の学習アルゴリズムを伝達関数表現した場合、フィードバック制御の一つである共振フィルタと一致することが明らかになった。共振フィルタは AFC と同様に位置決め制御系における外乱補償手法の一つであり、外乱が存在する周波数において制御系の感度を下げることによって外乱の補償を実現している。適応アルゴリズムに基づく拡張型 AFC とフィードバック制御に基づく共振フィルタの伝達関数表現が一致することは、制御理論における新たな知見である。その理論的検証結果に基づいて、系統的な AFC のパラ

メータ設計法を確立した。拡張型 AFC の伝達関数表現が共振フィルタと同じである知見を活かし、共振フィルタで用いられるベクトル軌跡を用いた設計法を AFC に適用した。この設計法は AFC の特性を周波数応答上で評価し、周波数応答上で最適なパラメータを決定する。周波数応答上では、最適なパラメータは一意に求められるため、この設計法は系統的な設計法であるといえる。以上の結果から、本研究で提案する拡張型 AFC により非周期的外乱の補償が可能であり、ベクトル軌跡を用いた設計法により周波数応答上で AFC パラメータを系統的に設計することができる。

次に、AFC の性能を改善するために 2 つの設計法を提案した。一つは、位置決め制御系のロバスト性を考慮した AFC の設計法である。実際の位置決め制御系において、制御系の安定性は非常に重要であり、制御対象の特性に変動が生じても制御系が発振することはあってはならない。そこで、本研究ではベクトル軌跡を用いた設計法をベースとして、周波数応答上で制御対象の変動を考慮した AFC の設計法を提案した。本手法により位置決め制御系においてロバストな AFC の設計を行うことができる。もう一つは、AFC の学習パラメータの収束性を改善する可変ゲイン付きの AFC の設計法である。AFC は学習アルゴリズムに基づいて外乱の補償を行うが、学習パラメータが収束するまでに時間を要する。特に、AFC により補償する外乱が変化した場合、パラメータを再学習する必要があるため、パラメータが収束するまでの過渡応答において、位置決め精度が悪化するという問題がある。特に、位置決め制御系に速応性が求められる場合、素早く外乱を補償する必要があるため、AFC の収束性の改善が求められる。そこで、本研究では可変ゲイン付き AFC の設計法を提案した。可変ゲインを用いることにより AFC の収束性を改善し、過渡応答を改善することができる。また、提案する可変ゲインは定常応答時の特性に影響を与えないため、制御系の安定性が悪化することはない。

さらに、外乱補償手法としての AFC の位置付けを明確にするため、他の代表的な二種類の外乱補償手法に対して、位置決め制御系への実装まで考慮した比較を行った。一つは、理論的検証時にも用いた共振フィルタである。もう一つは、繰り返し制御と呼ばれる制御手法である。繰り返し制御は、一周期前の時間信号を記憶し、その時間信号をフィードバックすることで外乱の補償を行う。三種類の手法を用いて外乱補償を行ったときの結果を比較したところ、AFC の特徴として、共振フィルタと同等の外乱補償性能でありながら、繰り返し制御で記憶される信号を用いた場合よりも精度良く外乱の推定ができることが挙げられる。産業製品の位置決め制御系においては、外乱の補償だけでなく、補償する外乱の情報が必要になることもあるため、そのような制御系には、AFC は非常に有用な制御法であるといえる。ただし、適応アルゴリズムの演算に正弦波のテーブルを用意する必要があるため、必要なメモリサイズには注意する必要がある。

本研究によって、周期外乱だけでなく非周期外乱に対する AFC の特性が理論的検証で明らかとなり、周波数応答上での AFC の系統的な設計法を確立された。さらに、AFC の安定性と過渡応答を改善する二種類の設計法も併せて確立された。また、代表的な外乱手法である共振フィルタと、繰り返し制御との比較により、外乱補償手法としての AFC の位置付けが明らかになった。以上の結果から、本研究は、位置決め制御系における外乱補償手法としての AFC について、制御理論としての体系化に大きく貢献した。