

氏名	種村 昌也
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	甲 第 691 号
学位授与の日付	平成 30 年 3 月 20 日
学位授与の要件	信州大学学位規程第 5 条第 1 項該当
学位論文題目	外乱推定問題における並列フィードフォワード補償器の設計に関する研究
論文審査委員	主査 教授 千田 有一 副査 教授 深田 茂生 副査 准教授 酒井 悟 副査 准教授 高山 潤也 副査 准教授 水本 郁朗 (熊本大学)

論文内容の要旨

工業分野の位置決め制御において外乱が加わる場合は多く存在し、その外乱によって制御性能の劣化、あるいは、機械の故障といった問題が起こる可能性がある。これに対して、外乱を推定・補償するための外乱推定器が提案されている。外乱推定器の中でも、最小位相系に対して適用可能な手法は数多く提案されているが、非最小位相系に対するものは比較的少ない。また、非最小位相系はその位相遅れが原因で推定性能の向上が難しいといった問題がある。この問題に対して、並列フィードフォワード補償器 (PFC: Parallel Feed-forward Compensator) を用いる方法が提案されている。この方法は、非最小位相系の制御対象に PFC と呼ばれる伝達関数を並列結合した拡大系を考え、その拡大系を最小位相化して外乱オブザーバを設計する方法である。PFC によって拡大系が最小位相化されているため、最小位相性を条件としたすべての外乱オブザーバを適用することができる。さらに、PFC を適切に設定することで従来の方法と比べ、推定性能の向上が図れる可能性がある。

そこで、本論文では PFC を導入することにより非最小位相系に対する外乱推定性能の向上を目指す。ただし、PFC により拡大系を最小位相化し外乱を推定する場合、その推定値は拡大系に対する外乱の推定値となっており、本来の制御対象に対する外乱の推定値とは異なるという問題がある。本論文では、外乱の周波数帯域において適切に PFC を設計することで、拡大系に対する外乱推定値から制御対象に対する外乱を推定可能であることを示した。これにより、拡大系を最小位相化し、かつ、周波数領域において適切に PFC を設計することが設計要求となる。従前の PFC 設計方法において、本論文の設計要求を考慮できる設計方法は少なく、考慮できる設計方法においても設計される PFC がプロパーとなる保証がないといった問題がある。本論文では、この設計要求を満たす PFC のシステムティックな設計方法の構築を目指す。

本論文では、線形時不変・連続時間・一入出力系の非最小位相系の制御対象に対して、PFC 設計問題を最適化問題に定式化する。ここで、一般的に制御器は安定であることが望ましいため、本論文では PFC が安定となることを設計要求に加える。つまり、拡大系を最小位相化し、安定となる PFC を周波数領域によりシステムティックに設計する方法を構築することを目的とし、具体的には以下の二つの方法を提案した。

- ・ KYP 補題を用いた凸最適化問題への定式化
- ・ ディスクリプタシステムに対する H_{∞} 制御理論を用いた凸最適化問題への定式化

「KYP 補題を用いる方法」では、拡大系の最小位相性と PFC の安定性を KYP 補題を用いて凸制約である線形行列不等式 (LMI: Linear Matrix Inequality) 制約で表す。そして、周波数領域に関する評価関数を定義し、LMI 制約条件の下での凸最適化問題を解くことにより

PFCを得る。一方、「ディスクリプタシステムに対する H_{∞} 制御理論を用いる方法」では、制御対象の逆関数に注目し、閉ループ系を安定化するプロパーな制御器を PFC として設計する。ただし、制御対象の逆関数は一般に非プロパーとなるため、ディスクリプタ表現を導入する。そして、ディスクリプタシステムに対する H_{∞} 制御理論を用いることでプロパーな PFC を設計し、設計された PFC が拡大系を最小位相化することを示した。次に設計した PFC が安定か否かを判別し、不安定であった場合は全域通過フィルタを導入することで安定な PFC に変換し、設計要求を満たす PFC を得る方法を述べた。提案した PFC 設計方法は数値例および実験機に対して適用し、その有効性を検証した。その結果、提案した方法により設計した PFC を導入することにより、外乱推定性能の向上を図れることが確認できた。

また、多入出力系の制御対象に対しても PFC の設計方法を構築することは重要である。その一つの可能性として、制約付きのシステム同定法の考え方を応用して多入出力系における PFC の設計を行うアプローチが考えられる。制約付きのシステム同定問題とは推定するパラメータに制約を設けて最適化問題を解き、制約を満たす範囲内で、制御対象の応答を近似するパラメータを得る手法であり、これらの手法は多入出力系の制御対象に対して適用可能である。そこで、拡大系を最小位相とする制約の範囲内で理想的な周波数特性となる PFC を設計する、という PFC 設計問題を制約付きのシステム同定問題と捉え定式化することで多入出力系の PFC の設計が可能となると考えられる。本論文では、そのはじめの取り組みとして、双線形行列不等式 (BMI: Bilinear Matrix Inequality) 制約のもとでの 2 次評価関数最小化問題の解法に関する方法を検討した。BMI 制約のもとでの 2 次評価関数最小化問題は非凸最適化問題のため扱いにくい問題である。そこで、十分条件を用いた LMI 化手法を提案した。本論文で提案する BMI 制約のもとでの 2 次評価関数最小化問題の解法を応用することで制約付きのシステム同定問題にも適用が可能となる。提案した LMI 化法の有効性は数値例により検証し、その効果を確認した。