

## 審査の結果の要旨

氏名 汪 曉柯

本論文は、**Frequency response data-driven disturbance observer design by convex optimization -Experimental verification with a non-minimum phase motion stage**（外乱オブザーバの凸最適化を用いた周波数応答データ駆動設計法の研究-非最小位相系の位置決めステージによる実験検証）と題し、運動制御における外乱の影響を軽減するために重要な外乱推定器の設計を、プラント同定のために測定した制御対象の周波数特性の数値データを直接用いて、プラントモデルと推定器の最適化を同時に行いつつ進める方法論を理論的に系統化し、その性能を数値計算と実験で評価した結果を英文で記述したもので、以下の8章からなる。

第1章は **Introduction** (序論) として、先行研究を引用しつつ、本論文の目的と外乱推定器の産業応用における重要性と従来の設計法の問題点を述べ、論文の構成を説明している。

第2章は **Mathematical preliminaries** (数学的基礎)として、以後の数学的な定式化に必要な、凸最適化、錐最適化、線形近似に関するシュールの補題などの数学的基礎について解説をし、以後の章で用いる数学的記号の定義を記している。

第3章は **Convex optimization problem formulation of low pass filter design**（低域通過形フィルタの凸最適化問題としての定式化）として、外乱推定器の一般的な構成を説明し、ロバスト性を保証し、またフィルタの因果律を守るために必要な低域通過形フィルタの連続系および離散系としての設計法を述べている。これは、制御対象の周波数特性測定データに基づきその周波数帯域が最大化するようなパラメータ調整を自動的に行う方法論を提示したものである。またこの設計法は、制御対象が最小位相系の場合にも非最小位相系の場合にも適用できる。

第4章は **Convex optimization problem of plant model and low pass filter design**（低域通過形フィルタとプラントモデルの凸最適化問題としての定式化）として、前章で述べた方法を更に発展させ、制御対象の周波数特性測定データに基づく直接設計の特長を真に活かす方法として、制御対象の公称モデルの調整と外乱推定器の低域通過形フィルタの帯域最大化自動設計を同時に最適化問題として解く方法論を導き、詳述している。

第5章は Numerical case study results of FRD-base DOB design for a minimum phase plant (最小位相特性を持つプラントの周波数特性測定データに基づく外乱推定器設計法の数値的ケーススタディ) として、第3, 4章で述べた自動設計法を、最小位相系の制御対象に適用する例を数値計算している。従来の設計法と比較し、最適化計算を通じ系統化された所定の設計手順が適用可能であり、有効な周波数帯域の広い外乱推定器が実際に設計できることをこの数値計算で確認している。

第6章は Numerical case study results of FRD-base DOB design for a non- minimum phase plant (非最小位相特性を持つプラントの周波数特性測定データに基づく外乱推定器設計法の数値的ケーススタディ) として、第3, 4章で述べた自動設計法を、非最小位相系の制御対象に適用する例を数値計算で示し、先行研究で提唱されてきた零位相誤差近似法, 零振幅誤差近似法という制御対象の公称モデルを近似的な最小位相系に代替する設計法や  $H_{\infty}$ 法に基づく設計法と比較している。提案法が周波数帯域の広い外乱推定器の自動設計として優れたものであることを、これらの数値計算結果の比較で確かめている。

第7章は Experimental verification with a non-minimum phase motion stage (非最小位相特性を持つステージを用いた実験検証)として、これまで述べてきた外乱推定器の設計法の問題点と優位性を、非最小位相特性を持ち駆動系と負荷側が柔軟構造で接続されているために、駆動開始直後に負荷側逆振れを起こすようなリニアモータ駆動の試験機で評価している。すなわち、駆動実験で、従来法および本論文で提案した方法に基づき設計をした外乱推定器とそれを用いた駆動側外乱力補償制御の応答を測定し、従来法との性能比較を行っている。これにより、実際の機械の周波数特性測定データを取得する際の注意点と、提案する周波数帯域の広い外乱推定器の自動設計法の優位性が実証された。

第8章は Conclusions(結論)として、上記の成果を要約し、今後の課題を整理している。

以上要するに、本論文は、産業界における精密工作機械などの運動制御における外乱力の影響を軽減するため応用上重要な外乱推定器の設計を、近似的に数式化されたプラントモデルを用いるのではなく、プラント同定のために測定した制御対象の周波数特性の数値データを直接用いて、プラントモデルと推定器の最適化を同時に行いつつ進める方法論を理論的に系統化し、それによる設計手順の省力化と推定器周波数帯域最大化の有用性を、主要な数値計算例比較と、推定器・制御器の設計が困難とされる非最小位相系を含むリニアモータ駆動試験機への実験的適用例を通じて実証したもので、電気工学および制御工学に対する貢献が少なくない。

よって本論文は学位論文(工学)として合格と認められる。