

論文の内容の要旨

氏名：増 田 開

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：位相空間内における超平面を用いたロバストモデル予測制御

本論文は、新しい制御理論の提案と提案した制御理論の有効性の確認を目的とする。制御器に求められる性能の一つとしてロバスト性は非常に重要な性能の一つであることが知られており、代表的なロバスト制御理論である H_{∞} 制御は、その優れたロバスト性から自動車のアクティブサスペンションやハードディスクドライブ (HDD) などの製品に応用されている。しかし、 H_{∞} 制御は優れたロバスト性を有する一方で、誤差を含んだプラントの設計や周波数重み関数を用いて構成される一般化プラントを構築する必要があるなど設計手順が非常に複雑なため、設計や調整が難しいといった問題があった。これらの問題は航空機等の多次元なシステムにおいては更なるシステムの複雑さを招き、設計が複雑で難解となるため、自動車等のアクティブサスペンションや HDD のシークアーム制御などの低次元の制御対象に応用が限られている。加えて、過渡応答の整形が困難なため、HDD のシークアーム制御のようなサーボシステムにおいては、さらに 2 自由度制御器を適用し過渡応答の改善を図ることが多い。よって、 H_{∞} 制御を用いた実用的な制御システムの設計は複雑となることがわかる。また、2 自由度制御器による過渡応答の改善は、フィードフォワード (FF) 項により、制御入力が増大となることが多く、制御入力の飽和により H_{∞} 制御によるフィードバック制御器が不安定になる懸念もある。 H_{∞} 制御は周波数重み関数を用いて、相対的に制御入力の制約を考慮することができるため、設計者が FF 項の大きさを確認しながら、 H_{∞} 制御の制御入力を抑えるといった調整を行うことはできる。しかしながら、それらの調整は、数値シミュレーションや実験による調整が必要で、もとより、初期値と目標値の関係に制御入力が大きく依存するというフィードバック制御の欠点を解消するものではない。以上を踏まえると、従来のロバスト制御器は「制御理論/調整方法が複雑」「過渡応答の整形が難しい」「制御入力の制約が考慮できない」等の課題がある。これらの性能を満たす制御器としてモデル予測制御 (MPC) が知られているが、内部モデルを用いて応答を予測し、入力を決定するという制御構造のため、モデル化誤差や外乱などに対するロバスト性が低いといった欠点があった。そこで我々は、スライディングモード制御 (SMC) のように状態量を位相空間上の切換超平面に拘束することで、複雑さを抑えつつも MPC のロバスト性を飛躍的に向上させる新しい制御手法、EMPC を新たに考案した。

提案した制御器の EMPC は、質量・バネ・ダンパシステムを用いた数値シミュレーションにより有効性を検証した。結果として、提案する EMPC は「制御理論/調整方法が複雑」「過渡応答の整形が難しい」「制御入力の制約が考慮できない」等の従来のロバスト制御器の問題を解決するとともに、従来制御器と同等以上のロバスト性を有することを示した。

また、クワッドコプター無人機 (QTW-UAV) に提案する EMPC を適用し、数値シミュレーションによって有効性を確認した。

本論文は全 7 章で構成され、第 2 章から第 4 章では提案した新しい制御理論について解説し、第 5 章から第 6 章に QTW-UAV への適用手法と数値シミュレーションによる有効性の検証を行った。以下に各章の概要を示す。

第 1 章 序論

第 1 章では、産業における制御器の適用状況や近年の無人航空機の動向についてまとめ、本論文の目的を述べた。

第 2 章 従来のロバスト制御手法

第 2 章では、従来の代表的なロバスト制御手法である H_{∞} 制御理論をはじめとし、 H_{∞} 制御理論から発展した μ 設計法、位相空間を用いたロバスト制御手法である SMC、SMC 理論から発展したインテグラルスライディングモード制御 (ISMC) について解説した。まず、第 2.1 章において、 H_{∞} 制御理論の外乱抑

圧問題, ロバスト安定化問題に関する手法及び定理について述べた. また, 対象のシステムから一般化プラントを構築し, 混合感度問題及び修正混合感度問題を適用し設計する手法について述べた.

第 2.2 章では, μ 設計法における構造的変動や構造化特異値 μ 等の基本的な定理について解説し, ロバスト安定化問題及びロバスト性能問題の適用手法について述べた. 以上によって, H_∞ 制御理論や μ 設計法が優れてロバスト性を有する一方で, 制御理論が複雑で設計や調整が難しい等の問題を示した.

また, 第 2.3 章では, SMC の基本的な特徴, 構造について述べ, 位相空間内における超平面に状態量を拘束する特殊なアプローチを用いた制御理論であることを示した. SMC は単純な構造で優れたロバスト性を有する一方で, 制御構造に符号関数等を有するために入力が激しく振動するチャタリングという現象が生じることや, 位相空間を用いるために過渡応答の設計が直観的に難しい等の問題があることを示した.

最後に第 2.4 章で, ISMC に関して, 特徴, 構造について述べた. ISMC においても SMC と同様に位相空間内における超平面に状態量を拘束する構造を有する. しかし, ISMC は, 超平面に拘束するための切換関数に, 理想状態のシステムの積分項が加味されていることが SMC と大きく異なる. この違いにより, 対象のシステムの状態量が超平面に拘束されていれば, マッチング条件を満足する外乱が印加されても理想的なシステムに近づけることが可能である. しかし, 切換関数に符号関数等を用いる構造は, SMC と同等であるため, チャタリング等の問題も有している.

以上のように優れたロバスト性を有するや ISMC も SMC と同様にチャタリングや過渡応答の設計が難しいといった問題を有しており, 従来のロバスト制御理論である H_∞ 制御理論, μ 設計法, SMC, ISMC には, それぞれ優れた特徴を有している一方で, 解決すべき具体的な問題があることについて明確にした.

第 3 章 新しいロバスト制御手法の提案

第 3 章では, 本論文で提案する EMPC について述べた. 提案する EMPC は MPC を基にしているため, まず, 第 3.1 章で MPC の特徴, 構造について解説した. MPC は内部モデルを用いて応答を予測する制御器であり, 過渡応答を時間の関数で設計することができる. 大きなモデル化誤差を含むシステムや外乱が含まれる状況において制御性能が劣化するという欠点がある一方で, 設計や調整性に優れており, 状態量や入力の変動を考慮することも可能な優れた制御器である. よって, MPC のロバスト性を改善した新しい制御器を提案した.

第 3.2 章では, 提案した EMPC の特徴, 構造についてまとめ, ロバスト性の向上方法について詳細な解説をした. EMPC は, 従来の MPC のように内部モデルによる予測から入力を決定することに加え, 切換関数の未来値を予測して位相空間内の超平面に状態量の拘束する入力の決定を同時に行う. 理想状態のシステムの積分項が切換関数には含まれるため, システムの状態量が超平面に拘束されていれば, 対象のシステムにモデル化誤差や外乱が含まれていても理想的なシステムに近づけることができ, 優れたロバスト性を有することを示した.

第 4 章 数値シミュレーションによる提案手法の有効性確認

第 4 章では, 提案した EMPC の有効性を数値シミュレーションで確認した. 数値シミュレーションでは, 1 入力 1 出力の質量・バネ・ダンパシステムを制御対象とし, 提案する EMPC に加えて従来の制御手法である PID 制御, H_∞ 制御, SMC, ISMC, MPC の応答をそれぞれ比較した.

第 4.1 章では, 質量・バネ・ダンパシステムを制御対象とし, 質量, バネ定数, ダンパ定数にそれぞれ $\pm 50\%$ の範囲でランダムにパラメータ誤差を与えた 100 パターンのシステムに対し, 一定の目標値に対する過渡応答を確認した. PID 制御, MPC では, パラメータの変動によって過渡応答が大きく変動したが, H_∞ 制御, SMC, ISMC, EMPC では, パラメータの変動による過渡応答の変化が非常に小さいことを示した. ただし, H_∞ 制御は設計が難しく, SMC や ISMC では, チャタリングの問題が発生した.

第 4.2 章では, システムの固有振動数と同等の周期外乱を印可して過渡応答を確認した. PID 制御, MPC では, 過渡応答が大きく変化したのに対して, H_∞ 制御, SMC, ISMC, EMPC は, 過渡応答の変化が非常に小さいことを確認した.

第 4.3 章では, 白色雑音外乱を印可して過渡応答を確認した. PID 制御, MPC では, 過渡応答が大きく変化したのに対して, H_∞ 制御, SMC, ISMC, EMPC は, 過渡応答の変化が非常に小さいことを確認した.

以上により, EMPC は, 従来のロバスト制御理論である H_{∞} 制御, SMC, ISMC と同等のロバスト性を有しており, かつそれらの制御器が持つ設計調整の複雑さやチャタリング等の問題が発生しない有効な制御手段であることを示した.

第 5 章 QTW-UAV の飛行制御システムの設計

第 5 章では, QTW-UAV に提案する EMPC を適用手法について述べた. 本章ではまず, QTW-UAV の運動モデルについて解説し, 飛行制御システムとして H_{∞} 制御, μ 設計法を用いた飛行制御システムと提案する EMPC を用いた飛行制御システムの設計方法について述べた.

第 6 章 QTW-UAV の制御システムの性能確認

第 6 章では, μ 設計法と EMPC によるそれぞれの飛行制御システムの制御性能の違いを数値シミュレーションによって検証した. 数値シミュレーションでは, 風外乱影響下における単一目標に対する応答と任意軌道に対する追従制御に関して比較を行った. 単一目標に対する応答においては, μ 設計法を用いたシステムと EMPC によるシステムの目標に対する誤差の指標は同等であり, 両制御システムが優れたロバスト性を有することを確認した. 軌道追従では, EMPC によるシステムの誤差の指標が, μ 設計法を用いた制御器によるシステムよりも小さく, EMPC の軌道の追従性が高いことが確認できた.

第 7 章 結論

第 7 章では本論文の結論をまとめた. 本論文では MPC の優れた調整性と実装性, SMC の優れたロバスト性を両立した新しい制御器, EMPC を提案し, その有効性を数値シミュレーションによって確認した.

以上