

論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査） 教授 内 山 賢 治

（副査） 教授 奥 山 圭 一 准教授 安 部 明 雄

元教授 佐 々 修 一 横浜国立大学教授 上 野 誠 也

任意のプラントに対して制御系を設計する際、外乱やノイズに対するロバスト性や燃料消費最少などの最適性が考慮される。さらに、実モデルへの適用には、制御器の実装性やゲイン調整のし易さ、アクチュエータ等の制約条件を考慮することも重要な要素の一つと考えられる。ロバスト性については、 H_{∞} 制御やスライディングモード制御等のロバスト制御理論が提案され、PID制御や最適レギュレータ等に代表される従来の制御器よりも、外乱やノイズに対してロバストな結果が得られている。しかし、従来のロバスト制御は、制御器の保守性や複雑化により実モデルへの実装に大きな課題があり、社会的に普及しているとは言えない。一方、最適性やアクチュエータ等の制約条件を同時に考慮できるモデル予測制御が、近年、脚光を浴びており、その有用性については多くの研究者により示されてきた。この理論の大きな欠点は、ロバスト性を有していない点であり、モデル予測制御にロバスト性を持たせるための研究も活発に行われているが、いずれの手法も実装性やゲインの調整性に難があり、実モデルに適用可能なロバストモデル予測制御は提案されていない。

本論文では、ロバスト性を有した新たなモデル予測制御理論を提案している。提案する御理論は、スライディングモード制御理論の概念を導入することで、従来のモデル予測制御にロバスト性を付加し、さらに最適性やアクチュエータの制約条件などを考慮することが可能なものとなっている。基本モデルである mass-spring-damper システムに対して、 H_{∞} 制御やスライディングモード等を適用し、数値シミュレーション結果を比較することで、提案手法であるロバストモデル予測制御が、極めて優れたロバスト性を有していることを検証している。また、制御理論の実装性やゲイン調整のし易さを検証するために、多入力多出力（MIMO）系の複雑なモデルに対しても提案手法を適用している。MIMO系として、QTW（Quad Tilt Wing）-UAV(Unmanned Aerial Vehicle)を選び、ダイナミクスの非線形性やノンパラメトリックなオブザーバを導入した制御系設計手法を併せて提案し、ロバスト性だけでなく制御理論の実装性についても確認している。Dryden モデルの風外乱を QTW-UAV に印加した数値シミュレーションでは、本制御手法の優れた制御性能が示されている。

本論文は7章で構成されている。審査の結果、次のように考えられる。

第1章「序論」では、システム制御において、一般的に要求される性能についてまとめている。とくに現代の制御では、「ロバスト性」、「最適性」、「実装・調整性」、「制約条件の考慮」についての要求が高まっていることを明確にしている。さらに、従来の制御手法の特徴を説明するとともに、この4点の要求の観点から、それぞれの制御手法の利点欠点を明らかにしている。これらを踏まえ、本論文で提案する制御手法の位置付けと論文の概要について言及している。

第2章「従来のロバスト制御手法」では、ロバスト制御理論の代表とされる H_{∞} 制御及び μ 設計法について概説している。 H_{∞} 制御問題は、外乱に対するロバスト性を考慮した「感度低減化問題」、外乱に対する安定を考えている「ロバスト安定化問題」、これらを同時に考慮する「混合感度問題」があり、それぞれの問題における制御器の設計法について簡潔にまとめている。また、パラメトリックな変動に対するロバスト制御である μ 設計法についても言及し、 ∞ ノルムを利用した制御器の特徴を示している。一方、ロバスト制御理論として周知されているスライディングモード制御について説明するとともに、チャタリング問題を低減化するインテグラルスライディングモード制御について説明し、従来のロバスト制御の利点欠点について詳説している。本章により、従来のロバスト制御の特徴を整理し、提案するロバスト制御理論との関連性について触れている。

第3章「新しいロバスト制御手法の提案」では、提案するロバストモデル予測制御について詳しく説明している。まず、「最適性」、「実装・調整性」、「制約条件の考慮」の点で優れているモデル予測制御について説明している。モデル予測制御は、化学プラントなどにおいて広く用いられている制御器で、PID制御を始めとした従来のフィードバック制御器と異なり、MIMO系を容易に取り扱う事が可能となっている。また、入力などの制約を考慮できるなど、実際のシステムに適用するにあたって現実的な性能を有し、かつ「最適性」の概念も導入されており、制御理論としては多くの利点を有している。モデル予測制御は逐次最適化計算を行う必要があるため、コンピュータへの計算負荷が大きく、応答時間の極めて長い対象でない限り、実時間での制御は困難とされていた。これに対し、計算負荷を軽減する計算方法も提案されていたが、コンピュータの飛躍的な進歩により、この問題はほぼ解決されている。モデル予測制御において最も大きな問題は、外乱等に対するロバスト性を有していない点にある。そのため、航空機や宇宙機など様々な外乱を受ける制御対象には適用が困難であるとされている。そこで本論文では、この点に注目しロバスト性を有するモデル予測制御を提案し、これを拡張モデル予測制御と呼称している。拡張モデル予測制御では、ロバスト性をを持たせるために、スライディングモード制御の概念を導入している。具体的には、モデル予測制御において、評価関数を設定する際に、位相空間内における切換超平面を加えている。また、インテグラルスライディングモード制御の概念も導入することで、チャタリング問題を解決している。これにより、制御器は無限大の帯域を必要とせず、十分なロバスト性を保持することが可能となる。提案手法に酷似した手法に、スライディングモデル予測制御がある。この手法は、切換関数の最適化のみを目的としており、目標値に対する時間応答を明確に設計することは原理的に難しい。スライディングモデル予測制御の場合、スライディングモードが生じている状態のシステムは、低次元化され切換超平面に依存した運動方程式となり、このことから、時間応答に対する最適な入力を保証することが可能な拡張モデル予測制御とは大きく異なることがわかる。本章では、このように、提案手法の特徴を理論的に解説するとともに、従来手法との違いを明確にし、拡張モデル予測制御の独創性について詳しく述べている。以上により、提案手法である拡張モデル予測制御は、「ロバスト性」、「最適性」、「実装・調整性」、「制約条件の考慮」を併せ持つ優れた制御理論であり、従来にない制御理論として高く評価できる。

第4章「数値シミュレーションによる提案手法有効性の確認」では、拡張モデル予測制御の基本特性及び有効性を確認するために、mass-spring-damperシステムに対して提案手法を適用している。基本的に、実システムの運動を線形運動とみなした場合は、mass-spring-damperで表現された線形システムの運動に帰着される。このシステムに対して、PID制御、 H_{∞} 制御、スライディングモード制御、PID制御+インテグラルスライディングモード制御、モデル予測制御及び拡張モデル予測制御の6つの制御器について比較を行っている。まず、各制御手法に対して、システムのパラメータ変動に対するロバスト性について検証している。数値シミュレーションでは、質量、バネ定数、減衰係数にそれぞれ50%のパラメータ変動を与え、ロバスト性について比較している。数値シミュレーションで与えたパラメータ変動に対し、PID制御やモデル予測制御は制御性能の劣化が見られたものの、他の4つの制御手法においては制御性能の大きな劣化は見られていない。しかし、スライディングモード制御、PID制御+インテグラルスライディングモード制御及びモデル予測制御は、制御入力の帯域や制約、理論の実装・調整性に問題がある。これに対し、拡張モデル予測制御は、「ロバスト性」、「制御入力の制約」、「実装・調整性」に優れた結果が示されている。また、周期外乱に対するロバスト性についても検証している。数値シミュレーションでは、システムの固有角周波数と同じ周波数を有する周期外乱をシステムに印加している。前述の6つの制御手法に対して、外乱に対するロバスト性を数値シミュレーションにより検証した結果、提案手法である拡張モデル予測制御以外の5つの制御手法では、周期外乱の影響が見られるものの、拡張モデル予測制御は、周期外乱の影響がシステムの応答に与える影響を極めて小さくする働きがあることが明らかにされている。本章では、本論文で提案した拡張モデル予測制御の特性を明確にし、その有効性を示した点は高く評価される。

第5章「QTW-UAVの飛行制御システムの設計」では、拡張モデル予測制御をより複雑なシステムに対して適用するための制御系設計について説明している。拡張モデル予測制御は、マッチング条件を満足する外乱であれば、パラメータ変動や外乱入力に対して優れたロバスト性を有している。しかし、前章までは、理論的な考察と1入力1出力システムの安定系に対して有効性が確認されたのみで、十分な

有効性を証明できてはいない。拡張モデル予測制御は、モデル予測制御を基にし、基本的な特徴は踏襲しているため、モデル予測制御の他入力多出力システムに対しても設計が容易に行えるといった特徴を踏襲している。そこで、他入力多出力システムとして、QW-UAV (Quad-Tilt-Wing UAV) を選び、その複雑なシステムの運動方程式を導出するとともに、飛行制御系設計について詳しく説明している。QW-UAV は、主翼の向きを大きく変更することで、ヘリコプタのようなホバリングや固定翼航空機のような長距離の巡航を可能にしたが、運動が大きく変化するため従来の制御器では設計が難しいといった課題があった。本論文では、この課題に対して、ダイナミックインバージョン法を用いた線形化を導入した制御系設計手法を提案している。ダイナミックインバージョン法では非線形項を補償する際、入力が過大になる傾向があり、また、誤差により非線形項を正確に補償することができないなどの問題点も挙げられている。これに対し、拡張モデル予測制御では、モデル化誤差に対するロバスト性を有している点や入力の制約条件を考慮できることから、QW-UAV の飛行制御系設計においても有効であることを示している。

第 6 章「QW-UAV の飛行制御システムの性能確認」では、第 5 章で設計した飛行制御系を用いて、数値シミュレーションにより提案手法の拡張モデル予測制御の有効性について検証している。比較のために、第 4 章の結果を踏まえ、 H_∞ 制御理論や μ 設計法を QW-UAV に適用している。なお、数値シミュレーションでは、突風外乱の影響を確認するために、Dryden モデルによる風外乱を QW-UAV の運動モデルに印加している。数値シミュレーションの結果では、全ての制御器は風外乱の影響下においても最終的に目標値に収束しているものの、 H_∞ 制御器を用いたシステムが μ 設計法や拡張モデル予測制御と比較して応答が遅いことを示している。これにより、 H_∞ 制御理論の保守性が制御性能に与える影響を明確にしている。 μ 設計法と拡張モデル予測制御を比較すると、過渡応答の特性に大きな違いがみられた。とくに、 μ 設計法を用いるとオーバーシュート発生の傾向が強くなり、かつ H_∞ ノルムと過渡応答に明確な関係性がないことから、過渡応答の整形は非常に難しく、制御性能の改善が困難であることを指し示す。一方、拡張モデル予測制御はオーバーシュート無く目標値に収束しており、かつ時間領域で応答を整形できるため、非常に調整が容易であることを示している。本章では、単純なシステムだけでなく、多入力多出力システムに対しても拡張モデル予測制御が有効に働くことを示しており、適用範囲の広さを示した点は高く評価される。

第 7 章「結論」では、本研究で得られた結果を総括している。従来のロバスト制御器では、「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」といった性能を満足できない、といった課題が挙げられている。本論文では、「ロバスト性」、「最適性」、「実装・調整性」、「制約条件の考慮」という特徴を全て満足する新しいロバスト制御手法を提案し、その特徴を整理するとともに、拡張モデル予測制御の課題及び今後の展望について示している。

以上のように、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以上

令和 3 年 2 月 1 8 日