

氏名	木下 大
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	総博甲第149号
学位授与年月日	令和3年9月17日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
文部科学省報告番号	甲第725号
専攻名	総合理工学専攻
学位論文題目	入力飽和関数を利用した状態制約を持つ制御対象に対する制御系の設計 (Control system designs for plants with state constraints using input saturation functions)
論文審査委員	主査 島根大学教授 吉田 和信 島根大学教授 伊藤 文彦 島根大学教授 横田 正幸 島根大学准教授 濱口 雅史

## 論文内容の要旨

現実の機械装置において、すべてのアクチュエータや動力伝達機構には有限の動作範囲が存在する。たとえば、モータはその定格出力特性から、トルクと回転数には限界があり、モータの回転動作を直線動作に変換するラックピニオン機構は有限のラック長しか動くことができない。これらの最大値と最小値の範囲で規定されるような機械装置の動作範囲の制約の中で、制御目的を達成しようとする、状態制約を考慮した制御問題は、工学において避けられない課題として、制御理論の研究が進められてきた。

一方で、状態の動作範囲が平衡点近くに限られる場合、非線形系はオイラー近似などの近似手法を用いて線形系に近似でき、線形制御理論によって比較的簡単に安定化制御則を求めることができる。この観点で設計された制御系は、モデル誤差や外乱の影響により状態が平衡点から大きく離れたとき、制御性能が劣化し、最悪の場合不安定となるため、状態を小さな範囲で制御する方が望ましい。このような線形化近似を含んだ非線形系の制御問題に対して、入力飽和を援用し、小さな値の範囲の入力を使うことで状態を小さな値の範囲に保ち、本来無視される非線形項を大きくしないことによって大域または準大域安定性を達成する制御則が提案されている。この種の飽和制御と近似線形化を用いた制御理論は、状態制約のある非線形系を含んだ広いクラスの制御対象に対して、計算コストが低く実装も簡単な、実用的な制御則を与える。

本論文では、状態制約の中でも特にアクチュエータの移動幅に制約のある制御対象に対して、入力飽和制御を用いた制御系の設計手法を提案する。提案する設計法に共通する基礎原理は、制

御対象の線形化モデルの入力からアクチュエータ振幅までの伝達関数関係を用いて、状態制約を入力制約に変換する入力変換手法と、制御対象から不安定極をもつより低次元な不安定部分系を分離し、より低次元な部分系の安定化問題に定式化するモード分解法、そして、以上の手順で定式化された入力制約付き線形不安定系の安定化問題に対する飽和制御設計法である。

制御対象は線形化プラントが不安定ダイナミクスを持つ制御系から、制御工学上のベンチマーク問題として良く用いられる、倒立振り子の倒立安定化問題と、ボールビーム系の安定化問題を選んだ。

倒立振り子系に対しては、駆動台車の振幅制約を考慮した安定化問題について、飽和関数を用いた線形フィードバック制御則を提案した。提案法は、モード分解法で分離された負の実数極を持つ1次不安定部分系に対して、入力飽和を持つ線形状態フィードバック制御則を設計し、駆動系の時定数を0に近づけることで、安定化可能な初期値の集合で示した安定領域の広さを最大化できる。非線形モデルを用いた場合の実際の安定領域の広さは、非線形シミュレーションにより網羅的に調べ、線形化誤差によって縮小される実際の非線形吸引領域を検証した。提案法の制御性能や振り上げ制御との組み合わせは、実機実験により検証した。

ボールビーム系に対しては、ビーム角の制約を考慮した安定化問題について、制約のもとで線形化モデルの大域的漸近安定化を実現する入れ子形飽和制御則を提案した。提案法は従来法に比べてゲインが調整可能なため、応答特性の改善が可能であるというメリットをもつ。また、提案法の欠点である定常偏差の問題を改善する、誤差飽和型 IMC 構造を導入した。同構造は飽和制御系の目標値応答や外乱応答に対して、定常特性を改善し、かつリセットワインドアップ現象を抑制する有効な方法である。提案法の有効性は、他の3つの制御手法との比較を行ったシミュレーションと実機実験により検証した。さらに、同制御則について、安定な非最小位相系の直列結合を含んだより広いクラスの制御問題へと拡張した設計法を示した。むだ時間を追加したボールビーム系に対して拡張された設計法を適用し、提案法の有効性を実機実験により検証した。

## 論文審査結果の要旨

本論文は、不安定かつ劣駆動（自由度よりも制御入力の数が少ない）な系である倒立振り子系とボールビーム系を制御対象として、アクチュエータに振幅制限がある場合の制御系設計法を述べたものである。各章の内容は以下のとおりである。

第1章では、問題の工学的意義、関連する過去の研究、各章の概要を述べた。

第2章では、台車の移動幅に制限がある場合の倒立振り子系の安定化制御則とその性能を考察した。線形モデルに対して、線形制御で台車系を十分安定化した後、モード分解法により、飽和制御で台車の振幅制限を保証しつつ、振り子系の不安定極のみを安定化するという制御系設計法を提案した。そして、先行研究である Lin らの設計法（1996）と比較するため、これら二つの制御則に対して、非線形モデルによるシミュレーション及び実験装置による実験（実機実験）によって、吸引領域（安定化領域）の範囲、過渡応答特性、数学モデルのパラメータ誤差や振り子角の計測誤差の制御性能への影響を検討した。Lin らの方法では、吸引領域を大きくするために制御系の極の一つを原点近くに配置する必要があるので過渡応答に遅いモードが現れる（振り子が傾いた瞬間、台車が素早く動いて振り子を安定化するが、台車が元の位置にゆっくり戻る）。提案法には、

このモードの速さを調整できる一つのパラメータ（ゲイン）があり、そのゲインを小さくすると Lin らの制御則に近づき、ある程度まで大きくしていくと Lin らの制御則と同程度の吸引領域を保持しつつ、より速い制御系が設計できる。振子の固有振動数に同定誤差があった場合、Lin らの方法の方がややロバスト性が高かった。また、振り子角の計測誤差に対する台車の定常偏差では、より大きなゲインが使える提案法の方が優れていた。さらに、振子を垂下点から振り上げ、倒立点近くで安定化制御に切り換えるという制御問題への適用結果も示された。この問題に対して、提案法が振り上げ後の安定化制御として、吸引領域が振り上げ制御から安定化制御への切り換え基準として首尾よく利用された。

第 3 章では、ビーム（棒）の上に置かれたボール（真球）を、ビーム角を制限内で制御することによって目標値まで移動させるというボールビーム系に対する制御則とその性能を考察した。この問題の難点の一つは、制御偏差を小さくするにはコントローラに積分特性を持たせる必要があるが、ビーム角制限との組み合わせで制御系が不安定化するリセットウィンドアップが生じやすくなることである。線形モデルに対して、線形制御でビーム角駆動系を十分安定化した後、モード分解法と修正内部モデル制御（IMC）法により、入れ子型の飽和制御でビーム角の振幅制限を保証しつつ、ボールの動特性（慣性系）のみを安定化し、かつ、積分特性を有するコントローラ設計法を提案した。提案した入れ子型飽和制御則は 2 つの調整パラメータを持ち、これらを調整することによって、ノイズやモデル誤差に対してロバストでかつ良好な応答を与える制御則を設計できる。IMC 法はリセットウィンドアップを避け、目標入力に対して良好な応答を与えるが、出力外乱（ボールを手で押すなど）に対しては大きなアンダーシュートが発生するという欠点があった。これに対して、制御対象出力と内部モデル出力との誤差のフィードバック量を制限するという修正 IMC 法を考案し、外乱応答も改善できた。シミュレーション及び実機実験によって、先行研究（Teel (1992)、Hauser ら (1992)、IP 型制御系）との比較が行われ、これらに対する提案法の優位性が示された。

第 4 章では、第 3 章で扱ったボールビーム系の問題を、ビーム角速度にも制限があり、かつボールの位置の計測にむだ時間がある場合へ拡張した。むだ時間をパデ近似により有限次元近似した上で、モード分解法、入れ子型飽和制御則、IMC 法を用いた制御系設計法を提案した。ビーム角速度の制限は IMC 法を適用する安定化制御系の入力部に緩和フィルタを置くことで対処した。また、モード分解法による状態フィードバック制御が状態予測制御に対応する状態推定オブザーバの設計法も提案し、この時の安定化制御系が IMC 構造を持つことを示した。提案法の有効性はシミュレーション及び実験装置による実験によって示された。出力の計測に 0.2s のむだ時間があっても制限条件を満たす安定な制御系が設計できた。

第 5 章では、本研究の主要結果をまとめた。

上記のように本論文は、倒立振り子系、ボールビーム系に対する状態制約問題に対して、新たな制御則を提案し、先行研究による種々の制御則との比較を含むシミュレーション及び実機実験を行うことで提案法の有効性を示した。問題の意義と興味深さ、得られた結果の新規性と有効性が高く評価される。内容は関連論文 2 編（計測自動制御学会論文集 2017 年 7 月、同 2021 年 6 月掲載）と国際会議プロシーディング 1 編（2019 58th Annual Conference of SICE（計測自動制御学会））に基づき作成された。英語能力についても、国際会議プロシーディング 7 ページを英語で執筆し、口頭発表したことから、合格水準と判断される。これらに基づき、本論文は博士（工学）の学位授与に値すると判断した。