

氏名	ばん とう ま い 坂 東 麻 衣
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2923 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 航 空 宇 宙 工 学 専 攻
学位論文題目	Nonlinear Adaptive Control and Its Applications (非線形適応制御とその応用)

論文調査委員 (主査) 教授 市川 朗 教授 榎木 哲夫 教授 松久 寛

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、非線形システムに対する実用的な自律適応制御系設計法の提案とエアロロボット自律飛行制御系への適用および線形適応制御システムならびに複数の線形モデルにより記述される非線形システムの適応制御系についての理論的考察を行った研究であり、6章からなっている。

第1章は序論であり、モデル規範型適応制御、ロバスト適応制御など適応制御の歴史を紹介するとともに、本論分に関連する強化学習、非線形適応制御、出力レギュレーション、研究の背景・動機および論文の構成について述べている。

第2章は、モジュール型制御系の学習法およびリッカチ方程式の解とリアプノフの安定定理に基く制御系設計法を紹介し、エアロロボットの自律飛行実験結果について述べている。始めに無人ヘリコプターの自律飛行の最近の歴史を概観し、近年注目されている強化学習の観点からモジュール型学習、特に複数モデルに基づくモジュール型制御系の学習法を紹介している。また、複数システムの重みである責任信号の代表的計算法を述べている。次に、適応則とその誤差の減少を保証するリアプノフ関数を導入し、追従制御のシミュレーションによりこの適応制御系の有用性を検証している。また、複数のモジュールが制御領域に応じて役割分担を行う現象をシミュレーションにより示している。これらの結果をもとに、エアロボットの昇降、ホバリング、下降の自律飛行実験を行い、良好な実験結果を得ている。

第3章は数学的準備である。適応制御系のフィードバック制御則の設計法は複数あるが、物理的意味が明確であることおよび性能調整に自由パラメータが利用できることから、最適レギュレータ理論のリッカチ方程式に基づく制御則が4章以下で採用されている。この章では適応制御系の解析に必要なリッカチ方程式の解のシステムパラメータに関する連続性および微分可能性を数学的に証明している。また、追従制御に必要なレギュレータ方程式に関しての可解性および解の上記の性質を示している。さらに、第4章で必要となる線形時変システムの漸近安定性の十分条件および種々の不等式を補題としてあげている。

第4章は、線形システムに関する適応制御系の考察である。初めに、状態の推定誤差に基づく通常の適応則により状態の推定誤差およびシステム行列の推定誤差が減少することを示し、リッカチ方程式に基づく制御則を用いて、適応制御系の安定化の実用的な十分条件を与えている。さらにシステム行列の推定値に対して、第3章で保証されたレギュレータ方程式の解を用いて、出力レギュレーションが可能であることを示している。次に改良型適応則に対し、対応する正規化誤差およびシステム行列の推定誤差が減少することおよびリッカチ方程式に基づく制御則の漸近安定性を示し、適応システム全体の安定性を証明している。さらに、出力レギュレーションの証明を行い、追従制御のシミュレーションによりこの制御法の有効性を確認している。

第5章は、複数の線形システムを状態依存の重みで凸結合した非線形システムの適応安定化および出力レギュレーションに関する考察である。この系がファジィシステムを含み、近年の研究対象の一つであることを述べ、最近の関連の研究を概観している。次に、不確かさのない可制御正準形構造を持つアフィン非線形システムに関して、状態依存のリッカチ方程式

の解により局所安定化が可能であることを示している。さらに、レギュレータ方程式の解の前半部が定数であることを証明し、局所的出力レギュレーションが可能であることを示し、数値シミュレーションにより検証を行っている。複数の線形システムにより表される非線形システムの適応制御に関しては、第4章の状態の推定誤差に基づく適応則に重みを付けたものとし、制御則は状態依存のリッカチ方程式を用いることにより、系全体の局所安定性を示している。また、レギュレータ方程式の解の性質を用いて、局所的出力レギュレーションの証明を与えている。制御則の有効性は、ステップ入力および正弦波入力への追従制御により検証されている。非線形システムは、複数の線形システムの凸結合であることを仮定しているが、状態空間の有限領域に限定すればこの条件を緩和できることをファン・デル・ポール方程式のシミュレーション例を用いて示している。最後に系の状態が観測できない場合、1入力1出力の仮定の下で、オブザーバーに基づく適応制御の考察を行っている。出力誤差の式にフィルターを導入することにより、伝達関数を強正実化することにより、適応則とパラメータ推定のリアプノフ関数を求めている。制御則は、状態依存のリッカチ方程式の解を用いることにより制御系の有界性を示している。

第6章は結論であり、本論文で得られた第2章から第5章の成果を要約している。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、非線形動的システムに対して、学習により複数の線形予測モデルを構築し実用的な制御系設計法を提案し、エアロロボットの自律飛行制御系への適用を行うとともに、線形システムおよび複数の線形モデルにより記述される非線形システムの適応制御系についての理論的考察を行った研究である。本論文で得られた主な成果は次のとおりである。

1. 既存の複数モデル型学習法は、観測が困難である制御対象の加速度を必要とすることから、あまり実用的ではない。本研究では、モジュール型制御系の学習法およびリッカチ方程式の解とリアプノフの安定定理に基づいた制御系設計法を提案し、エアロロボットの自律飛行制御系に適用し良好な実験結果を得ている。
2. 最適レギュレータ理論は、リッカチ方程式を解くことによりフィードバック則を与えるが、適応制御では、システム行列の推定値に対応して制御則が変化する。そのため解析に必要となる、解のシステムパラメータに関する連続性および微分可能性を示している。また、追従制御に必要なレギュレータ方程式の解の同様の性質も示している。
3. 未知パラメータを含む線形システムに対して、パラメータ推定と安定化を同時に行う適応制御系の設計法を提案し、その有用性をシミュレーションにより確認している。初めに、状態の推定誤差およびシステム行列の推定誤差を減少させる適応則とリッカチ方程式に基づく制御則を用いて、実用的な安定化の十分条件を与え、さらに改良型適応則を用いることによりシステム全体が安定化されることを示している。また、レギュレータ方程式をシステム行列の推定値に対して解くことにより、外乱や目標信号を含むシステムの出力レギュレーションを保証している。最後に、追従制御のシミュレーションによりこの制御法の有効性を確認している。
4. 上の適応制御系設計法を、複数の線形システムを状態依存の重みで結合した非線形システムに拡張し、状態依存のリッカチ方程式の解を用いることにより、安定化および出力レギュレーションを局所的に保証している。

以上のように本論文は、実用的な自律適応制御系設計法の提案と実験による検証および適応制御系の安定化および出力レギュレーション理論の構築とシミュレーションによる検証をおこなったものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成20年2月27日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。