

氏 名 井 村 順 一  
 学位(専攻分野) 博 士 (工 学)  
 学位記番号 論 工 博 第 2943 号  
 学位授与の日付 平 成 7 年 1 月 23 日  
 学位授与の要件 学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当  
 学位論文題目 STUDIES ON ROBUST CONTROL OF NONLINEAR SYSTEMS INCLUDING ROBOT MANIPULATORS  
 (ロボットマニピュレータを含む非線形システムのロバスト制御に関する研究)  
 (主 査)  
 論文調査委員 教 授 吉 川 恒 夫 教 授 足 立 紀 彦 教 授 片 山 徹

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、ロボットマニピュレータを含む非線形系のロバスト制御問題について論じた研究成果をまとめたもので、大きく2つに分けられる。2章から6章まではロボットマニピュレータのロバスト制御に関するもの、7章から9章まではより一般的な非線形系のロバスト制御に関するものであり、全体は10章より構成される。

第1章は、序論であり、ロバスト制御に関する研究の現状を述べるとともに、本論文の研究目的および内容を概説している。

第2章では、質量などの物理パラメータに不確かさが存在する場合のロボットマニピュレータのロバスト制御問題について論じている。マニピュレータが有する機構的特徴を利用することによって、指定した制御精度を達成するロバスト制御法を簡明な定式化のもとで導出している。つぎにこの制御法をもとにして、不確かさの評価の保守性をさらに緩和するために、指定した制御精度を達成するフィードバックゲインを適応的に調節する適応ロバスト制御法を提案している。また2自由度DDアームを用いた基礎実験により、提案する制御法の有効性を確認している。

第3章では、第2章のロバスト制御法が位置と速度のみの情報を用いた制御法であるのに対して、加速度情報を用いた場合のマニピュレータのロバスト制御法について論じている。まず従来の加速度情報を用いたマニピュレータの制御法に対する問題点を指摘し、それらの問題点を克服した加速度情報を用いたロバスト制御系設計法を提案している。そして加速度情報まで利用できる場合の利点を、ロバスト制御におけるフィードバックゲインの観点から論じている。

第4章では、関節トルクセンサ情報が利用できる場合のマニピュレータのロバスト制御系設計法を提案している。まず関節トルクセンサを備えたマニピュレータの運動方程式を制御系設計に適した形で導出している。ついで導出した運動方程式をもとに、駆動系に不確かさが存在するにも拘らず指定された誤差精

度を達成するロバスト制御法を提案している。また関節トルクセンサ情報を用いる場合の利点を、制御則の計算量という観点から論じている。

第5章は、第2章で提案したマニピュレータのロバスト制御則をデジタル化した場合に対する制御誤差への影響を考慮したロバスト制御系について論じたものである。任意に与えられたサンプリング周期のもとで、指定した制御精度を達成するためのデジタルロバスト制御系の設計法を提案している。

第6章では、第2章で提案したロバスト制御則の特徴に基づいて、低周期で演算を行う上位ループと高周期で演算を行う下位ループの2つに階層化したロバスト制御系の設計法を提案している。下位ループは連続量であるという仮定のもとに、上位ループのサンプリング周期と不確実要素による制御誤差への影響を定量的に評価している。また階層化構造にすることによる利点を制御則の計算量の観点から論じている。

第7章では、消散システムの考え方に基づいて、線形システムの有界実条件を非線形システムの場合に拡張し、非線形システムが内部安定で、かつ与えられた大きさの $L_2$ ゲインを局所的にもつための必要十分条件を、ハミルトン・ヤコビ方程式の安定化解を用いる場合とハミルトン・ヤコビ不等式の正定解を用いる場合の二つの方法により導出している。さらにこの結果を用いて、状態フィードバックや出力フィードバックによる非線形 $H_\infty$ 制御問題の可解条件を与えている。

第8章では、非線形システムと構造的不確実要素から構成されるフィードバック系のロバスト安定条件を導出している。ついでこのロバスト安定条件をもとに、状態フィードバックによる非線形系のロバスト安定化問題の一解法を与えている。

第9章では、マッチング条件を満たさない不確実さを含む非線形カスケード系に対して、状態フィードバックによる大域的ロバスト安定化のための十分条件を導出している。またカスケード系が一定の条件を満たす場合に、このロバスト安定化条件がより簡明な形で導出できることを示している。

第10章は結言であり、本論文の研究成果を要約している。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、ロボットマニピュレータのロバストな軌道制御系の設計法の確立、およびより一般的な非線形システムのロバスト制御法の確立を目的として行った研究をまとめたもので、主な結果は以下のとおりである。

1. マニピュレータの質量などの動的パラメータに不確実さが存在する場合に、その機構的特徴に注目して、指定された誤差精度を達成するためのフィードバックゲインを自動的に得る新しい適応ロバスト制御法を提案した。また実験によりこの制御法の有効性を確認した。
2. 関節加速度センサや関節トルクセンサからの情報が利用可能な場合の、マニピュレータのロバスト制御法を提案し、これらの情報を用いることによる利点を明らかにした。
3. マニピュレータは通常デジタルコンピュータで制御されることを考慮し、指定した誤差精度を達成するデジタルロバスト制御系設計法を提案した。また制御則の特徴に注目し、フィードバック系を階層化した場合のロバスト制御設計法を提案した。

4. 非線形  $H_\infty$  制御の基礎をなす非線形システムの有界実条件を導出した。また得られた有界実条件をもとに、状態フィードバックや出力フィードバックによる  $H_\infty$  制御問題の可解条件を与えた。
5. 非構造的不確かさが存在する場合の非線形システムのロバスト安定化条件を導出した。さらに 4. で展開した結果を用いることにより、状態フィードバックによるロバスト安定化問題の解法を与えた。
6. 非線形カスケードシステムが大域的なロバスト安定化可能であるための十分条件を導出した。

以上要するに、本論文は、ロボットマニピュレータのいくつかの機構上の特徴を考慮したロバスト制御法を提案し、またより一般的な非線形システムに対する非線形  $H_\infty$  制御の可解条件やロバスト安定化条件などを導出したもので、学術上、実用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 6 年 11 月 11 日に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。