

京都大学	博士（工学）	氏名	大倉 裕貴
論文題目	Trajectory Design Based on Robust Optimal Control and Path Following Control (ロバスト最適制御と経路追従制御に基づく軌道設計)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、制御系の軌道計画とその追従制御のための制御方策に関する研究をまとめたものである。基礎的な経路計画の最適化の問題から、人をアシストするための経路設計及びそのフィードバック制御問題までを扱っており、8章から構成されている。</p> <p>第1章は序論であり、本論文の全体の構成および使用する表記などをまとめている。論文全体は主に3つのに分けられることが述べられている。1つ目のパートはロバスト最適制御を用いた軌道計画に関するもので論文の第2章と第3章に対応している。2つ目のパートは経路追従制御則の設計に関するもので論文の第4章と第5章に対応している。最後のパートは人と機械の協調制御に関するもので論文の第6章と第7章に対応するものである。</p> <p>第2章は、非線形制御系に対するロバスト最適軌道計画手法に関するものである。提案手法のアイデアは、変動する物理パラメータに関する状態方程式の偏微分を計算し、状態変数の変動パラメータに関する偏微分（これを変分状態と呼ぶ）を新たな状態変数とした変分系と呼ばれる状態方程式を作成し、その制御問題を考えることである。このようにして作成された系の変分状態が十分小さくなるように制御することで、パラメータ変動の影響を小さくすることができる。しかし、上記のように導出した変分系は、元の制御対象の状態とパラメータ変動の影響を表す変分状態の状態方程式となっており、元の系よりも高次の制御系となり、一般に可制御である保証はなく制御は難しい。本研究では、この変分系の局所可制御性をリー括弧積などの微分幾何のツールを用いて調べ、パラメータ変動が抑制可能となるための条件を導いている。さらに、2次元の非線形モデルを例にとり、実際にパラメータ変動の影響を抑制できることを示し、提案手法の有効性を確認している。</p> <p>第3章は、第2章の内容において、制御対象を線形系に限定したケースを詳しく考察している。線形系のパラメータ変動に関する変分系は、線形時不変系となり、可制御性や安定性の解析が容易となる。これらの解析の際に、非線形制御系の場合に必要な近似が不要となることから、精度の良い解析が可能となる。特に可制御性の解析においては、可制御性行列を用いた可制御性の解析が可能となり、変動するパラメータが可制御性に及ぼす影響を評価しやすくなる。またカルマンの正準分解を直接利用できることから、抑制可能な変動のクラスやパラメータ変動が生じにくい初期状態の特徴づけを行うことが可能となる。これらの理論的な成果を振り子-台車系の制御問題に適用し、その有効性を検証している。変動抑制が可能なケースでは、パラメータ変動の影響を小さくできることが確認でき、そうでないケースでは、パラメータ変動の抑制の難しさを立証するシミュレーション結果を導いている。</p>			

京都大学	博士 (工 学)	氏名	大倉 裕貴
------	------------	----	-------

第 4 章では、以降の章の準備のために、ポート・ハミルトン系と呼ばれる制御系のモデルと受動性に基づく制御手法を説明している。ポート・ハミルトン系とは、古典力学におけるハミルトンの正準方程式を一般化したもので、メカトロニクス系を広く表現でき、力学的エネルギー保存則や受動性を陽に表現したモデルとして知られている。この章では、このモデルに対して、ハミルトン系の構造を保存するフィードバック変換である一般化正準変換を導入し、それを用いた軌道追従制御手法に関する手法を概説している。次章以降では、この一般化正準変換を用いて新たな制御手法を提案する。

第 5 章では、ポート・ハミルトン系に対する経路追従制御の新しい手法を提案している。通常、制御対象に所望の軌道を追従させる制御問題は軌道追従制御と呼ばれ、時間とともに変化する状態変数の目標値を追従するように制御を行う。これに対して時不変の制御器で同様の目標を達成するのが経路追従制御である。経路追従制御では目標点は時間とともに変化せず、経路と呼ばれる 1 次元の部分空間に状態変数を安定化させる問題となる。軌道追従制御では初期状態や初期時刻に依存して挙動が変化することに対し、経路追従制御では変化しない。そのため、車両系の移動や溶接ロボットの制御など時刻とは無関係に経路の形状のみが重要な制御に用いられる。これまでの経路追従制御手法は主に単純な機械系に対して考案されてきたが、本研究ではメカトロニクス系等を含むポート・ハミルトン系を対象とする。本章ではこの問題に対して、従来法よりも簡単な線形の偏微分方程式を解くことで経路追従制御則を設計する手法を提案している。この偏微分方程式はハミルトン系の形式を保存する一般化正準変換を利用しており、力学的な特性を利用した制御手法になっている。さらに簡単な非線形モデルに対して本手法を適用し、数値シミュレーションにおいてその有効性を確認している。

第 6 章では、第 5 章の制御則を利用して、人をアシストするための制御系の設計法を与えている。人が機械に力を加えて操作し、一定のタスクを繰り返し実行する状況を考える。ここでの目的は、そのような環境のもとで制御により機械に適切な力を加えることで、人のタスクを手助けすることである。ただしこの目的に対して、数式モデルに基づく設計を行うのではなく、同じタスクに対して熟練者が機械を動かした過去の操作経路の履歴データから、最適なアシスト制御系を設計するという問題を扱っている。その概要は以下の通りである。熟練者の経路データをベイズ推定により統計処理し、経路の確率分布を求める。得られた分布の確からしさを表す尤度を目的関数として、尤度を増大させる方向に制御を行うことで、過去のデータにおいて頻出する経路に状態を追従させる制御系を構成できる。この制御手法はベイズ推定による統計的データ学習と数式に基づく非線形制御を結びつけるものであり、特に経路の統計モデルを最も標準的な正規分布とした際に、経路追従制御のリアプノフ関数が制御工学においてやはり標準的な 2 次関数になることから、自然な制御則を導く枠組みとなっている。本章では提案法を実際の人の操作データを利用したアシスト制御系設計問題に応用している。その結果、経路データのばらつきの小さい部分ではアシスト力を強くして経路に強制的に追従させ、ばらつきの大きな部分ではアシスト力を小さくして

京都大学

博士（工学）

氏名

大倉 裕貴

自由に操作が可能となるようなアシスト制御を実現している。

第7章では、第5章の制御則を拡張して、人・機械協調のためのインピーダンス制御手法を提案している。インピーダンスとは電気回路の抵抗の概念を一般化したものであり、機械系を電気回路と見立ててそのインピーダンスを変更することで、制御対象に所望の制御特性を持たせようとするものである。本研究では、速度に線形な非ホロノーム拘束を有する制御対象、特に車輪機構を有する車両系に対して、その質量特性を自由に変更するインピーダンス制御手法を開発した。この手法を用いることで、重量の重い機械系を操作する際にも、重量の軽い対象を扱うように軽々とした操作が可能となる。本章の成果についても、車両系をモデル化したシミュレーションを用いてその有効性を検証している。

第8章は結論であり、本論文で得られた成果を要約している。

氏名	大倉 裕貴
----	-------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、非線形制御系に対する軌道計画とその追従制御に関する研究をまとめたものであり、得られた成果は次の通りである。論文は大きく分けて3つの部分に分かれており、第1部の第2～3章ではパラメータ変動にロバストな最適軌道計画について述べ、第2部の第4～5章ではハミルトン系の経路追従制御設計法に関する研究を与え、第3部の第6～7章では第2部の内容を応用して人間をアシストする機械の設計法を与えている。

第1部では、有限時間の最適軌道設計問題において、制御対象のパラメータ変動にロバストな軌道の設計法を与えている。変動するパラメータに関する状態変数の変分を考え、パラメータ変動に対する感度をあらわす状態方程式を、変分系と呼ばれる新たな拡大状態方程式として定式化している。この拡大系に対する最適軌道設計問題を解くことで、変動に強い軌道を設計する方法を提案している。特に、非線形系に対する局所可制御性解析、線形系に対する正準分解を用いた可制御部分空間の特徴づけなどを行うことで、抑制可能な変動の特徴づけを行い、実用的な設計手順を導いている。

第2部では、ポート・ハミルトン系と呼ばれるメカトロニクス系の非線形モデルに対して、経路追従制御則の設計法を与えている。従来法では単純な機械系を対象としていたのに対して、提案法ではより一般的なメカトロニクス系を表現できる手法を提案している。またこの問題は複数の偏微分方程式を同時に満たす解を求める必要があり、従来法では設計が難しかったが、本論文では線形の簡潔な偏微分方程式を解くことで設計する手順により、実用的な設計法を導いている。また、得られた閉ループ系は制御対象と同様な力学的な特徴を保存しているため、第3部で与えるような力学的なインタラクションの特性を考慮した設計を可能にする手法となっている。

第3部では、第2部の経路追従制御系を、人をアシストするための制御系の設計に応用している。この経路追従制御では経路上で最小値を取るポテンシャル関数を設計パラメータとして設計を行うが、熟練作業員の作業データをベイズ推定により統計処理することで、上記のポテンシャル関数を設計する手法を提案している。これにより、人とのインタラクションの力学的特性を考慮し、なおかつ人の作業データを利用したアシスト制御系の設計が可能となった。さらに重量の大きな機械の操作をアシストするために、そのインピーダンス特性を変更することにより、見かけの重量を変えるインピーダンス制御の手法も開発している。これらの手法を、人・機械協働システムをモデル化した数値シミュレーションに適用し、その有効性を確認している。

本論文は、非線形制御系に対する軌道設計・追従制御系設計に関する独自性ある研究成果であり、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30年2月18日、論文内容と

氏名	大倉 裕貴
----	-------

それに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。