

京都大学	博士 (工学)	氏名	濱田 聖司
論文題目	Studies on sparse optimal control and passivity-based control for nonlinear mechanical systems (非線形機械系を対象としたスパース最適制御と受動性に基づく制御に関する研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>制御工学は実世界において様々な問題に利用されているが、非線形のシステムを対象とした制御手法はいまだ実用化には至っておらず、その発展が望まれている。本論文は、この非線形システムのうち実用上重要なクラスである非線形機械システムを対象として、新たな制御手法を提案するものである。一般に制御の方法は大きく 2 つに分類され、それぞれフィードフォワード制御とフィードバック制御と呼ばれる。前者は主に望ましい軌道を事前に計画するものであり、宇宙機や車両の軌道設計等に用いられる。後者はセンサの観測情報からリアルタイムで制御入力を決定するもので、例えばロケットの姿勢を安定化する制御器の設計に用いられる。これらの 2 つの制御問題に対して、本論文はスパース最適制御および受動性に基づく制御の枠組みで新しい制御手法を開発している。前者のフィードフォワード制御に関しては、非線形最適制御の新たな数値計算法、スパース最適制御を応用した実用的な軌道生成法、そしてスパースな制御入力を有する軌道を生成するスパースニュートン法の開発を行なっている。また後者のフィードバック制御に関しては、性能のチューニングが容易な非線形安定化フィードバック制御則の開発を行なっている。これらの成果は以下の全 7 章にまとめられている。</p> <p>第 1 章は緒言であり、本論文の目的と背景を説明している。上で述べたフィードフォワード制御とフィードバック制御の分類にはじまり、それぞれの分野の背景と望まれている技術に関する説明を行なっている。フィードフォワード制御に関する部分では、近年研究が始まったスパース最適制御を含めた非線形最適制御に関する論文のサーベイを行なったのち、提案するスパース最適制御の理論と応用の両面の重要性を説明している。フィードバック制御に関する部分では、受動性に基づく制御に関するこれまでの研究を説明したのち、チューニング可能な制御器設計法の重要性と課題をまとめている。</p> <p>第 2 章は、最適制御を用いた軌道計画における連続変形法の数値的計算安定性を向上させる方法を提案している。非線形最適制御問題は無限次元の非線形最適化問題であり、一般に解くことが難しい。この問題解決のため、連続変形法と呼ばれる方法が知られている。この方法では、すでに解が得られている簡単な問題を徐々に変形し、本来解きたい最適制御問題にまで変形させ、その際に変化する解を追跡することで、解きたい問題の解を得る。ところがこの問題の変形のさせ方には大きな自由度があり、どのような変形が数値的に安定なアルゴリズムを導くのかは明確ではなかった。本研究では、局所連続変形法と呼ばれる特殊な連続変形法を用いることで、連続変形の際の解の追跡を数値的に安定に行える手法を導いている。</p> <p>第 3 章では、スパース最適制御の主流である ℓ_1 最適制御問題に対して、従来は難しかった収束性を保証した解法を提案している。非線形系に対する ℓ_1 最適制御問題は、</p>			

京都大学	博士 (工 学)	氏名	濱田 聖司
<p>無限次元かつ滑らかでない評価関数を最小化する問題であり、一般には解くことが難しい。この問題を直接扱うことは難しいため、代わりにやや簡単化した問題を解く手法がスパースニュートン法としてこれまでに提案されている。本研究では、このスパースニュートン法を改良し、比較的容易な線形計画問題を繰り返し解くことで、本来解くべき l_1 最適化問題を漸近的に解く手法を開発している。また提案法の収束性能についても解析を行い、2次収束性が保証されることを示している。さらに提案法を宇宙機の軌道計画問題に適用し、その有効性を数値シミュレーションによって確認している。</p> <p>第 4 章では、スパース最適制御法を援用し車両系が追従しやすい軌道である円軌道やクロソイド軌道を設計するための手法を導いている。クロソイド曲線とは曲率の変化率が一定となる曲線のことで、車輪を有する車両系の軌道に適しており、高速道路設計によく用いられている。しかしこれまでクロソイド曲線を含む軌道は、設計者がアドホックにクロソイド曲線を繋ぎ合わせて設計することが一般的で、最適制御のような最適化によって自動生成することは難しかった。このような問題に対して、クロソイド曲線を含む軌道を最適制御により自動生成できる手法を提案しており、実用性の高い成果を導いている。</p> <p>第 5 章では、受動性に基づくフィードバック制御法として、ポート・ハミルトン系モデルで表現された機械システムに対する非線形位相遅れ補償器を提案している。ポート・ハミルトン系モデルとは、力学でよく用いられるハミルトンの正準方程式を一般化したもので、機械システムや電気システムなどの物理システムの制御モデルを表現できる。受動性とはこれらの系の物理的エネルギー保存則を表す性質で、この性質を利用した制御手法を受動性に基づく制御と呼ぶ。本研究では、線形制御でよく用いられる位相遅れ制御を元にした安定化非線形制御則を導出し、非線形の閉ループ系の安定性を保証しつつ、制御器の性能をチューニングできる手法を提案している。本手法を実機のロボットマニピュレータの制御に適用し、チューニングにより制御性能を改善して、その有効性を実証している。</p> <p>第 6 章では、さらに 5 章の結果をさらに発展させ、高次のフィードバック制御器の設計法を与えている。複数の位相進み遅れ補償器を組み合わせた高次の非線形制御器を用いた場合に閉ループ系の安定性を保証する条件を導いている。この条件を満たす範囲で制御器のパラメータの選定を行うことで、5 章の結果と同様に閉ループ系の安定性を確保しつつ制御器の性能をチューニングできる。</p> <p>最後に第 7 章では、結論として本論文の内容をまとめたあと、今後の展望について述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、実用上重要なクラスである機械システムを対象とした非線形制御手法を提案している。制御の問題は大きくフィードフォワード制御とフィードバック制御に分類できるが、前者のための制御則として非線形性も扱えるスパース最適制御の新たな枠組みを、後者のための制御則としてチューニングが容易な受動性に基づく非線形制御則を導いている。得られた成果の具体的な内容は以下の通りである。

フィードフォワード制御の代表的な用途は軌道計画問題で、例えば宇宙機や車両の軌道を設計する問題である。設計者が決めた評価関数を最小化する軌道を求める方法である最適制御手法が用いられることが多いが、その計算は一般に難しく、特に制御対象が非線形である場合には導出が困難であった。このような制御問題に対して本論文では、三つの制御手法を導いている。一つ目の手法では、非線形最適制御問題をより簡単な問題の解を変形することによって解く局所連続変形法を開発し、数値的に安定した計算法を与えている。また二つ目の研究としては、近年機械学習分野で使われるようになったスパース最適制御法を用いて、クロソイド曲線を自動生成する最適制御手法を導いており、実用上有用な軌道生成法を与えている。さらに三つ目の研究として、入力信号が多くの時刻でゼロの値をとるようなスパース入力を持つ軌道を生成するための修正スパースニュートン法を開発した。上記で得られた一連の制御法は、非線形最適制御に新しい理論的枠組みを与えるものであり、今後の発展が期待できる。またスパース最適制御は、例えば宇宙機や車両系の制御において消費燃料を最小化するのに利用でき応用上も重要な技術であるが、提案法はこれらの問題を効率良く解くことができる。このように提案手法は、理論的にも新しく応用上の有用性も高いものである。

一方、フィードバック制御はシステムの時々刻々の状態を観測してそのデータから入力をリアルタイムに決定する技術である。非線形のフィードバック制御則はこれまでも多く提案されているが、その多くは設計の際に偏微分方程式を解く必要があり、実用的に利用するには難があった。本論文では、従来から機械システムを制御するのによく用いられる位相進み遅れ補償を非線形に一般化した制御器を提案し、非線形制御系の安定性を保証しつつ性能をチューニングできる実用性の高い設計手法を導いている。本手法は、実機実験においても高い効果を示す方法となっており、理論と応用の両面の貢献を有している。

以上要するに、本論文は実用上重要な非線形機械システムに対して、理論的にも実用的にも有用な制御則設計法を与えたものであり、その成果は学術上、実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、令和4年1月26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、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。