

京都大学	博士（工学）	氏名	別府 啓史
論文題目	Studies on Nonlinear Optimal Control Systems Design Based on Data-Intensive Approach (データ集約的方法に基づく非線形最適制御系設計法の研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>制御工学の分野において理論上も応用上も重要な制御手法の一つに最適制御がある。この方法は、設計者が指定した制御指標を表す評価関数を最小にする制御入力を与えるもので、多くの制御問題で利用されている。例えば宇宙工学におけるロケットの軌道計算や宇宙機の姿勢制御則を設計する際に用いられる。この最適制御は、線形の有限次元の制御対象に対しては実用的な設計手法が得られているが、制御対象が非線形の場合や無限次元である場合には、求解の難しい偏微分方程式を解く必要があり、実用性の面で課題があった。本論文では、この課題を解決するために、近年注目されているデータ集約的方法、すなわちビッグデータを扱う機械学習のツールを用いることで実用的な制御系設計手法を導く。データ集約的方法の多くは、未知関数の入出力データからその関数を推定するものである。一方、最適制御は偏微分方程式を解く問題であるため、データ集約的方法はそのままでは適用できない。本論文では様々な工夫を行うことで、偏微分方程式を解く問題を、未知関数の推定問題に変換する手法を開発し、データ集約的方法を用いた最適制御問題の解法を提案している。また、データ集約的方法では得られた解の性質を保証することは一般に難しくなるが、一定の制御性能やアルゴリズムの収束性を保証した制御法を提案している点も本論文の特徴である。本論文ではこれらの成果を、以下の7章にまとめている。</p> <p>第1章は緒言であり、本論文の背景と概要を説明している。非線形系に対する最適制御問題に関する研究背景について述べたあと、最適制御問題の多くがハミルトン・ヤコビ方程式と呼ばれる非線形の偏微分方程式を解くことに帰着されることを説明している。この偏微分方程式は解くことが難しいため、これまで非線形最適制御は実用性に難があった。この問題を、機械学習等に代表されるデータ集約的手法を用いて解くことが本論文の目的である。データ集約的手法としては、特にガウス過程回帰およびニューラルネットワークの2つを取り上げ、それらの技術の研究背景、適用範囲や利点などを解説している。さらに、これらの技術を非線形制御に適用する際の課題と解決方針をまとめている。</p> <p>第2章は数値ガウス過程と呼ばれる偏微分方程式の数値解を統計的に計算する方法を用いて、非線形系の有限時間最適制御問題を解く方法を提案している。数値ガウス過程とは、例えば流体现象のような偏微分方程式で表される時間発展の方程式を数値計算する手法である。一方、有限時間最適制御問題では、偏微分方程式で表される時間発展の方程式を逆時間で解く必要があるが、この問題において各時刻の値関数の推定値がガウス性を保存するように問題を適切に近似することで、解の統計的信頼度も含めた最適軌道を計算する方法を導いている。</p> <p>第3章では、非線形系のロバスト最適制御問題を解くのに必要な偏微分不等式を、ガウス過程回帰を用いて解く方法を提案している。ロバスト最適制御問題は、先に述</p>			

べたハミルトン・ヤコビ方程式の代わりに、偏微分不等式を解くことでも得られる。本章では、この不等式を満たす解が取りうる値を人工的に生成し、そのデータをガウス過程回帰により学習することで偏微分不等式の解を推定する方法を提案している。このアイデアを用いれば、様々な回帰手法を利用することができ、柔軟性・拡張性の高い方法であるといえる。

第 4 章では、3 章の方法にさらにサポートベクターマシンと呼ばれる分類器を組み合わせ、解の精度を上げる方法を導いている。サポートベクターマシンは、データ集合を効率的に 2 つのグループに分割する手法であるが、これによって学習データをうまく選択することで精度の高い解を導いている。さらに数値例によってその効果を示している。

第 5 章では、最適制御問題を解く際に最適制御則と評価関数値を反復して求める方法である価値反復法にガウス過程回帰を組み合わせ、効率的に解を求める手法を提案している。価値反復法は最適制御問題をデータから近似的に解く機械学習の分野で発展した方法で、汎用性が高い反面、計算時間を要することで知られている。本論文では、この問題にガウス過程回帰を組み合わせた価値関数の反復計算方法を提案している。ガウス過程回帰はノンパラメトリックな回帰手法であることから、従来の関数近似器を用いる手法に比べて計算量を低減し、効率的に妥当な解を得ることができる。

第 6 章では、5 章で扱った価値反復法にニューラルネットワークを組み合わせた解法を提案し、複雑な制御問題を扱えることを実証している。ガウス過程回帰はシンプルな機構でノンパラメトリックな回帰が行える一方、データサイズの行列の逆行列計算を伴うため、データ数が多くなると計算が困難になるという問題があった。そこでガウス過程回帰の代わりにニューラルネットワークを用いて価値関数および制御入力関数を回帰することにより、より多くのデータを用いた複雑な回帰を短時間で計算できる方法を提案している。

第 7 章では、方策反復法と呼ばれる最適制御解法にニューラルネットワークを組み合わせた方法を提案し、従来法に比べアルゴリズムの実行可能性を高める工夫を行っている。近年提案された Neural Lyapunov Control と呼ばれる技術を援用し、方策勾配法の価値関数および制御入力関数をニューラルネットワークで近似する手法を導いている。最適制御の評価関数を工夫することにより、反復計算毎のアルゴリズムの実行可能性を損なうことなく最適解が得られるアルゴリズムとなっており、実用性も高い。

最後に第 8 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。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、通常偏微分方程式を解く必要のある非線形最適制御問題に対して、ビッグデータを扱うツールであるデータ集約的方法を援用して、その解を効率的に計算する方法を与えるものである。データ集約的方法は、計算機的能力進化に伴い近年様々な分野で利用されるようになっており、数多くの派生手法が開発されている。与えられたデータから、そのデータを生成する未知の関数を推定するのがデータ集約的方法の役割であり、偏微分方程式を解くには必ずしも適していないが、本論文では最適制御問題をうまく変換・近似することで適用を可能にしている。またデータ集約的方法を用いると、得られた解の性質を保証することは一般に難しいが、一定の制御性能やアルゴリズムの実効性を保証した制御法を提案している点も本論文の特徴である。特に、非線形関数の回帰問題を扱える手法であるガウス過程回帰とニューラルネットワークの2つのツールを利用した最適制御手法を提案している。

ガウス過程回帰とは、非線形の回帰問題を扱うことができるノンパラメトリックな手法であり、シンプルな機構で統計情報も含めた推定値を効率的に計算できる。本論文では、この手法を有限時間最適制御問題、ハミルトン・ヤコビ不等式に基づく非線形最適制御問題、価値反復法に基づく非線形最適制御問題に応用し、効率的な制御則設計法を導いている。これらいずれにおいても、ガウス過程回帰の新技术を活かせるよう、最適制御問題をうまく近似・変換し、見通しよく解を計算する手法を導いている。これらは計算量を抑えつつ精度の良い解を得る方法となっており、理論的にも実用的にも価値の高い成果といえる。

またニューラルネットワークは、複雑な非線形関数を効率的に推定できる手法である。設計パラメータの設定にはやや試行錯誤が必要であるものの、関数近似能力が高い推定手法である。本論文ではこの方法を、価値反復法に基づく最適制御、および方策反復法に基づく最適制御に応用している。ニューラルネットワークの適用の仕方や評価関数を工夫することで、アルゴリズムの収束性や実行可能性を向上させた設計法を導いている。数値例においても複雑で高性能な制御則を計算できることを確認しており、実用性の高い方法であるといえる。

以上要するに、本論文は非線形最適制御問題に対して、理論的にも実用的にも有用な制御系設計法を与えたものであり、その成果は学術上、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、令和4年2月21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。

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。