

審査の結果の要旨

氏名 武石 直也

修士（工学）武石直也提出の論文は「Data-Driven Analysis of Dynamical Systems Based on the Koopman Operator: A Machine Learning Perspective（クープマン作用素に基づく力学系のデータによる解析：機械学習の視点から）」と題し、英文で書かれ、6章から構成されている。

近年、複雑な自然現象や大規模人工システムなどの力学系を大量の時系列データに基づいて分析するための技術が発展し普及している。本研究は、その流れの中で、特にクープマン作用素に基づくモード分解手法に焦点を当てている。クープマン作用素は、一定の条件のもとで非線形力学系を線形領域に変換して解析することができるため、流体力学などの分野では従来から利用されている。しかし、クープマン作用素の適用妥当性が理論的に保障される範囲は非常に限定的であり、他分野への応用が難しいという問題があった。そこで本研究は、機械学習の方法論に基づいてクープマン作用素の理論や計算手法を拡張することによって、多様な力学系および時系列データへの適用を可能にすることを目的としている。

第1章は序論であり、時系列データ、力学系、およびクープマン作用素に関する定義や数学的背景を説明するとともに、クープマン作用素に基づくモード分解の考え方、既存の計算手法およびその特徴を紹介している。特に、動的モード分解（dynamic mode decomposition）と呼ばれる計算手法を詳細に考察した上で、その問題点を整理している。

第2章では、動的モード分解の拡張として、スパース非負値動的モード分解を提案している。これは、動画像やスペクトログラムなど、非負値性を本質とするデータに対して適用可能な動的モード分解を実現するものであり、動的モード分解をブロック凸最適化問題として再定式化することによって、非負制約およびスパース正則化の導入を可能にしている。また、提案手法がノイズに対

して頑健であることや、動画像の背景・前景分離問題へ適用した場合に解釈性の高い結果が得られることを実験により示している。

第 3 章では、動的モード分解にベイズ推論の枠組みを適用する方法を提案している。これにより、ノイズや有限データ等に起因する推定の不確かさを取り扱うことができるとともに、ベイズ推論に基づく様々な拡張を容易に実現することができる。実際に、本章では、動的モード数の自動決定方法などの拡張を示し、それらの有効性を実験によって確認している。

第 4 章では、確率的力学系に対してクープマン作用素に基づくモード分解を適切に計算する方法を提案している。従来の動的モード分解は、観測ノイズが存在する場合には正しいモードを計算できないという問題があった。本章では、制御分野で発展してきた部分空間同定法の理論に基づいた動的モード分解を新たに提案し、観測ノイズが存在する場合の確率的力学系に対してもクープマン作用素に基づくモード分解の一致推定量が得られることを示している。

第 5 章では、与えられた時系列データに対する動的モード分解が、対応する力学系についてのクープマン作用素に基づくモード分解と一致するようなデータ変換を自動的に学習する方法を提案している。本来、動的モード分解がクープマン作用素によるモード分解を実現するには、データがクープマン作用素の不変空間を構成する関数から生成される必要があるが、一般にこの条件が満たされる保証は無い。本章では、力学系が未知な場合でもそのような条件を満たすデータ変換を学習する方法を提案している。また、人工ニューラルネットワークを用いて実装した例を示し、数値実験によって有効性を確認している。

第 6 章は結論であり、本研究の成果をまとめ、今後の課題を議論している。

以上要するに、本論文は、多様な力学系と時系列データに対して適用可能なクープマン作用素理論に基づく解析方法を機械学習的な視点から明らかにしたものであり、その成果は航空宇宙工学上貢献するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。