

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Characterizing chaos in large systems by time series analysis and machine learning
著者(和文)	清水太朗
Author(English)	Taro Shimizu
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11875号, 授与年月日:2021年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:大熊 哲,笹本 智弘,西田 祐介,久世 正弘,谷津 陽一,西森 秀稔,竹内 一将
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11875号, Conferred date:2021/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第		号	学位申請者氏名		清水 太郎	
論文審査 審査員		氏 名	職 名		氏 名	職 名	
	主査	大熊 哲	教授	審査員	谷津 陽一	准教授	
	審査員	笹本 智弘	教授		西森 秀稔	特任教授	
		久世 正弘	教授		竹内 一将	特定准教授	
		西田 祐介	准教授				

論文審査の要旨 (2000 字程度)

非線形性が本質的な物理現象は、気象などの流体现象、化学反応動力学、重力多体系など、物理学の諸分野に散見されるほか、近年は心電図や脳波といった生命現象等でも非線形物理学の知見が応用されるなど、学際的な重要性も高まっている。こうした系の多くでは、現象を記述する時間発展方程式が既知なことは稀であり、時系列データから発展方程式や特徴的物理量を推定する手法が必要となる。そのような非線形時系列解析手法は、非線形物理学の発展とともに開発されてきたが、従来の手法は少数自由度の系にしか使えない。大自由度系に対しては、最近提案された機械学習に基づく方法が唯一であったが、決定指針が明確でないパラメータが多いなどの難点があり、計測可能な量も限られている。このような背景のもと、本論文では、大自由度系に適用可能な時系列解析手法の開発・拡張を行い、既存の方法では扱えなかった対象を計測する手法を2つ提案して、それぞれに対してその有効性を数値的に検証した。本論文は以下の4章からなる。

第1章は、序論として、本論文の前提となる非線形かつ決定論的な力学系に関する基礎事項の解説と、時系列解析手法についての最近の展開を中心とするレビューがなされている。非線形力学系については、特にカオスとその不安定性に関する解説がされ、不安定性の強さが Lyapunov 指数で特徴づけられること、各 Lyapunov 指数に対する固有の摂動方向として共変 Lyapunov ベクトルが定義できること、時空カオスの実効自由度を決定する慣性多様体という存在が知られていることなどが記述されている。時系列解析については、Koopman 演算子法、スパースモデリング法、近年研究が活発な機械学習手法の一種であるリザーコンピューティングなど、様々なアプローチが紹介されている。そのうえで、大自由度系の Lyapunov 指数や慣性多様体などを時系列解析から計測する満足な手法がない現状が述べられ、既存手法の問題点と、その解決策が提示される。

第2章では、非線形力学系の標準的な時系列解析手法である再帰ベースの手法を、単純でありながら比較的広いクラスの大自由度系に拡張した研究成果が報告される。既存手法の問題点は、軌道の再帰頻度が、自由度の数に対して指数関数的に減少してしまうことにあった。本研究は、局所結合系や大域結合系では局所的な時間発展が少数の変数で記述できる事実に着目して、相空間ではなく、局所時間発展を記述する縮約空間において再帰を検出・解析する方法を提案した。提案手法の有効性検証のため、大域結合写像系、大域結合振動子系、結合写像格子系の3つの系において、数値的に生成した時系列データを提案手法で解析し、Lyapunov 指数スペクトルを正しく推定できることが示された。また、推定精度の改善方法も提案され、実証された。さらに、本研究結果を踏まえた展望として、偏微分方程式系でも適用可能性について展望が述べられているほか、開発手法の適用を試みるべき実験系が複数具体的に提案されている。さらに広い実験系への適用に向けた未解決問題の言及もある。

第3章では、時空カオス系の時系列データから慣性多様体を検出する手法提案と、その実証結果が報告されている。近年、Edward Ott らのグループは、リザーコンピューティングで時空カオスの未来予測や Lyapunov 指数計測ができることを報告し、注目を浴びている。それに対し、本研究では、リザーコンピューティングで共変 Lyapunov ベクトルも計測可能なこと、それにより慣性多様体の局所構造を検出する数値計算手法が実装できることを見出して、それを実現した。具体的には、代表的な時空カオス系である蔵本-Sivashinsky 方程式において、時系列データを学習させたリザーで Lyapunov 指数と共変 Lyapunov ベクトルを計測し、共変 Lyapunov ベクトルの双曲性から、慣性多様体の局所構造を与える物理多様体の検出に成功した。また、Ott グループの先行研究では、中立モード(ゼロ値の Lyapunov 指数)の一部が検出されない問題があったが、本研究では先行研究より多くの中立モード検出に成功しただけでなく、それが紐づく対称性を明らかにし、検出の可否の決定因子を論じたほか、未検出のモードの検出に向けた提案も行った。本章でも、開発手法の適用意義の大きい具体的

な実験系が提案されているほか、Navier-Stokes 方程式における慣性多様体の存在問題という大きな未解決問題に実験的立場から貢献できる可能性についても言及されている。

第4章は、まとめとして各章の成果が要約され、2つの手法の相補性についての言及や、今後の展望も述べられている。

以上のように、本論文では、従来手法では困難であった大自由度カオス系の不安定性や慣性多様体を計測する時系列解析手法が開発提案された。再帰ベースの手法は、力学系分野の標準的手法を大自由度系に初めて適用可能とした仕事であり、近年提案された機械学習の手法と相補的な役割をなす意義ある貢献と認められる。慣性多様体の計測手法は、それが時系列から検出可能だと明確に示した初めての成果であり、実験系での慣性多様体検出に向け道を開いた意義は大きい。なお、本論文は共同研究に基づいているが、いずれも本人が主体的な寄与を行ったと認められる。よって、論文審査委員会は全員一致で博士（理学）の学位授与が適当であると結論した。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。