

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

氏 名 SUN Qiwen

論 文 題 目

Forecast and control of dynamical systems with data assimilation:
Applications to COVID-19 epidemic and to Lorenz models

(データ同化を用いた力学系の予測と制御:COVID-19 流行モデルと Lorenz
モデルへの応用)

論文審査担当者

主 査 名古屋大学大学院多元数理科学研究科 教授 Ph.D
大平 徹

委 員 名古屋大学大学院多元数理科学研究科 特任教授 Ph.D
Serge Richard

委 員 名古屋大学大学院多元数理科学研究科 教授 理学博士
木村 芳文

委 員 国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究センター
データ同化研究チーム チームリーダー Ph.D
三好 建正

論文審査の結果の要旨

この論文で申請者 Sun, Qiwen 氏はデータ同化技術を用いて、数理的な予測の研究について述べている。データ同化は、数値天気予報をはじめとして地球科学、経済学、そして最近では疫学などの分野で広く使用されている手法である。これは、理論と観察・観測を最適に組み合わせて、対象とする物理システムの正確な状態および未知のパラメータを推定し、さらにその進化を予測することを目指した技術手法である。また、この手法を用い、動的に変化するシステムのパラメータ調整を行うことで、望ましいシステム状態に向かわせるような制御が可能かどうか、という課題に対する研究が進んでいる。

申請者の Sun 氏は本博士論文において、まずデータ同化の一般的なフレームワークを紹介し、予測技術であるカルマンフィルターとアンサンブルカルマンフィルターの理論 (EnKF) についてレビューしている。特に EnKF のいくつかの特別なバージョンについても説明している。本論文の主要な意義は、このデータ同化技術を具体的なデータと課題について適用して探求を行ったところにある。これらは (1) 感染症モデルと予測、そして (2) 2つのカオス力学系の制御である。

(1) については第 2 章で、拡張 SEIR 感染症モデルを紹介し、COVID-19 の蔓延を研究するためのデータ同化技術の適用を行っている。特に独自のモデル拡張としては、その具体的な数値は観測されない無症候性および前症候性の状態を導入し分析をおこなっている。これらの状態は定性的には感染の広がりに影響があると考えられていたが、数理モデルに明示的に組み込んだことは Sun 氏の功績である。さらに、この拡張モデルによる感染再生産数の予測および、これらの未観察状態の人数の推定をアンサンブルカルマンフィルターを用いて行った。具体的なデータとして、日本の 3つの主要な都道府県と全人口をとりあげ、また、いくつかの不確実な医療負荷などのさまざまなパラメータ値に対して感度テストを行った結果、推定の精度を上げることに成功し、また非常事態宣言の繰り返しにおける感染拡大予防の効率の低下なども示唆した。社会的な側面としては、このモデルは政府の感染症対策の数理チームメンバーにも評価をされ、理化学研究所と名古屋大学の共同研究としてプレスリリースもなされた。

第 3 章では、(2) のデータ同化によるカオス力学系の制御についての研究が行われた。例えば、数値天気予報 (NWP) のようなカオス力学系では、初期条件に対する感度が非常に高く予測可能性に本質的な限界をもたらす。一方、これを逆にとり、小さな制御信号が急速に大きくなる性質を用いて、効果的な制御につながる可能性が生まれる。申請者の Sun 氏は、この方向でカオス力学系にアンサンブルカルマンフィルターを適用することで力学軌跡の予測をし、それが将来望ましい形と異なると予測を生み出す状況を検知することで、適切な摂動信号を現在の状態に加えて将来状態を制御する手法を独自に開発した。まず、3変数の非線形連立微分方程式系である Lorenz-63 モデルにこの手法を適用し、ローレンツのバタフライアトラクタの選択された翼にとどまるように系の力学を制御できるかの数値実験を行った。その結果、将来予測誤差に比べて約 3% の大きさの摂動信号を加えることで、効果的な制御を実現することに高い確率で成功した。

さらに長期的な目標として、この手法を用いて激甚的な気象災害を減らすことを目指し、より多変数の気象モデルである Lorenz-96 システムを探求した。このモデルは、同緯度上に均等に分散化された観測点により地球全体での気象状態の推定するために用いられている。このモデルの数値計算で、実相当時間として 100 年以上にわたる計算を行い、その期間での極端な気象イベントの発生を観測した。そして、この極端な気象イベントを抑えるために、すでに述べたような独自のアンサンブル予測を行い、制御のために必要な付加摂動信号を計算した。現実的に行うことは困難であるが、この制御により、数理的には激甚的な気象イベントに関しては 9 割程度おさえられるような事例も提示した。

論文審査の結果の要旨

この他にも、Sun氏は附録に添付しているように、修士論文において行った数学系論文の引用予測に関する研究を、博士後期在籍中においても、より大規模なデータを用いて探求するという分析活動も行った。

これらの研究については、国際学会や研究会などにおいて20件ほどの発表が行われ、二本の査読付き学術誌への出版と、二本の現在投稿・審査中の論文としてまとめられている。以上のように、Sun氏の論文はデータ同化技術を用いた数理的な予測に関する新しい知見を与えたものであり、学位論文としては十分な内容を持つものであると判断できる。

また、Sun, Qiwen氏は2022年8月24日に行われた学位審査公開セミナーにおいても、申請者は背景も含めた主な結果の丁寧な発表を行い、自身の研究成果と意義が非専門家にも伝わるように講演を行った。また、質問に対しても丁寧・明快に回答し、学位を授与されるに相応しい学識を示した。以上によって、学位審査委員会は申請者には博士（数理学）の学位が授与される資格があるものと判断する。