

令和 4 年 5 月 18 日現在

機関番号：62603

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12111

研究課題名（和文）複雑時系列からの決定論的支配方程式の抽出手法に関する研究

研究課題名（英文）A Study on Methods for Extracting Deterministic Governing Equations from Complex Time Series

研究代表者

日野 英逸（Hino, Hideitsu）

統計数理研究所・モデリング研究系・教授

研究者番号：10580079

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：数値流体力学分野を中心に広く用いられている動的モード分解のベイズモデルとしての再定式化を行った。また、多次元非線形時系列の背後に非線形力学系を想定し、その特徴付けを行う方法論を開発した。既存の代表的なアプローチとして、Koopmanモード分解（KMD）と呼ばれる方法論が盛んに研究されている。ガウス過程潜在モデリングにより抽出される低次元特徴空間とKoopmanモード分解により抽出される低次元非線形力学系を結びつけるという発想に基づき、既存の決定論的なKMDを自然にベイズ的な枠組みとして定式化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

観測データから系の支配方程式を抽出することは、多くの科学・工学領域において中心的な課題である。しかし、例えば生物学、神経科学のように、明確な物理現象・化学プロセスに基づくモデルが明らかにされていない分野も多い。本研究では、潜在構造が明らかでない複雑時系列データから、系の時間遷移を記述する力学系を同定する方法論を開発した。本研究の成果は基礎方程式が十分に確立していない分野の大幅な発展に結びつく可能性を有しており、また、開発する数理的手法そのものが観測時系列の背後の潜在構造を解析する有用な方法論となりうる。

研究成果の概要（英文）：We reformulated the Bayesian model of dynamical mode decomposition, which is widely used mainly in the field of numerical fluid dynamics. We also developed a methodology for characterizing the nonlinear dynamical system behind a multidimensional nonlinear time series by assuming a nonlinear dynamical system. As a representative existing approach, a methodology called Koopman mode decomposition (KMD) has been actively studied. Based on the idea of linking the low-dimensional feature space extracted by Gaussian process latent modeling and the low-dimensional nonlinear dynamical system extracted by Koopman mode decomposition, we naturally formulated the existing deterministic KMD as a Bayesian framework.

研究分野：統計科学

キーワード：作用素論的データ解析 動的モード分解 ベイズ推論

1. 研究開始当初の背景

精緻な実験により収集した複雑な観測データから直観と洞察力によってシステムの挙動を支配する簡潔な法則を見出す営みは、ニュートンの運動方程式やマクスウェルの方程式といった科学の基礎を築く支配方程式をもたらした。これに対して、生物学や神経科学、あるいは地球科学のような分野では、少数の例外を除いて支配方程式に立脚した系の理解は十分に進んでいない。一方で、生物学、地球科学においても近年の計測技術の向上は大量の観測データを生み続けている。

時系列データに基づき系の時間発展法則を抽出する方法論として、特に流体解析などの分野を中心として Proper Orthogonal Decomposition(POD)や Dynamic Mode Decomposition(DMD)と呼ばれる手法が盛んに研究されている[P. Schmid, J. Fluid Mech., 2010]。POD や DMD は高次元時系列データからモードと呼ばれる低次元基底を抽出し、各モードの時間的な変動と周期性を分析するために用いられる。理論解析と実応用の両面で研究が進んでいるが、これらは次元削減を行う手法であるため、低次元な観測時系列の背後にある(場合によっては観測信号の次元より高次元の)潜在変数の挙動を捉えることは難しい。また、これらの手法は本質的には線形近似手法であり、複雑な時系列の分析への適用可能性は現状では限定的である。

2. 研究の目的

本研究では、潜在構造が明らかでない複雑時系列データから、系の時間遷移を記述する力学系を同定する方法論の開発を目的とする。本研究で期待される成果は基礎方程式が十分に確立していない分野の大幅な発展に結びつく可能性を有しており、また、開発する数的手法そのものが観測時系列の背後の潜在構造を解析する有用な方法論となりうる。

3. 研究の方法

既存の高次元かつ複雑な時系列の解析手法として、数値流体力学の分野を中心に広く用いられている動的モード分解(DMD)に着目する。この手法は決定論的であることから、データの欠測に対応できない、ノイズに弱い、予測の不確実性の表現ができないという問題がある。そこで、DMDをベイズモデルとして捉え直すことで、欠損、ノイズ、不確実性の表現という3つの問題の解決をはかる。

4. 研究成果

多次元時系列データのモード分解の代表的なアルゴリズムは、動的モード分解(DMD)と呼ばれるものであり数値流体力学を中心に広く用いられている。しかし、この手法は決定論的であることから、データの欠測に対応できない、ノイズに弱い、予測の不確実性の表現ができないという問題があった。本研究では、DMDのベイズモデルとしての再定式化を行った。ベイズモデルでは推論の不確実性を確率分布として表現できるため、決定論的手法の限界を克服したロバストな作用素論的データ解析が実現可能となる。ベイズ的動的モード分解には分解する要素の事前分布の設定が必要となる。本研究では変分行列分解を用いることで、観測データの特徴を活かした事前分布を設定した(図1)。

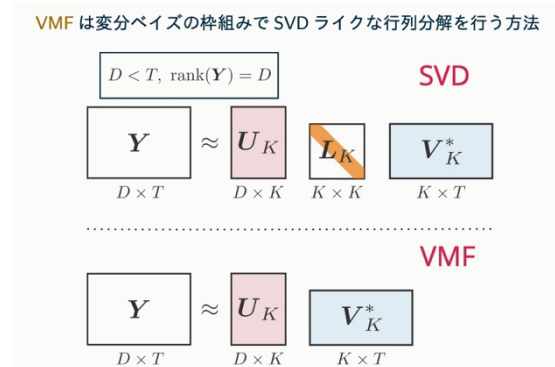


図1: 変分行列分解

さらに欠測のあるデータを数理的に正しく取り扱えることも大きな特長である。欠測データの適切な扱いは統計的方法論がしばしば直面する難しい問題のひとつであり、これまでDMDは前処理として何らかの方法で欠測値を補完することでしか欠測データに対応できなかったところを、欠測値を欠測値として保持したまま、それに起因する不確実性を考慮してダイナミクスを推定することを可能とした(図2)。

また、多次元非線形時系列の背後に非線形力学系を想定し、その特徴付けを行う方法論を開発した。既存の代表的なアプローチとして、Koopman モード分解 (KMD) と呼ばれる方法論が盛んに研究されている。ガウス過程潜在モデリングにより抽出される低次元特徴空間と Koopman モード分解により抽出される低次元非線形力学系を結びつけるという発想に基づき、既存の決定論的な KMD を自然にベイズ的な枠組みとして定式化した。さらに、ベイズ的手法において多くの場合問題となる計算コストの問題に関しても、ガウス過程の構造を巧みに利用することで解決する方法を提案した。

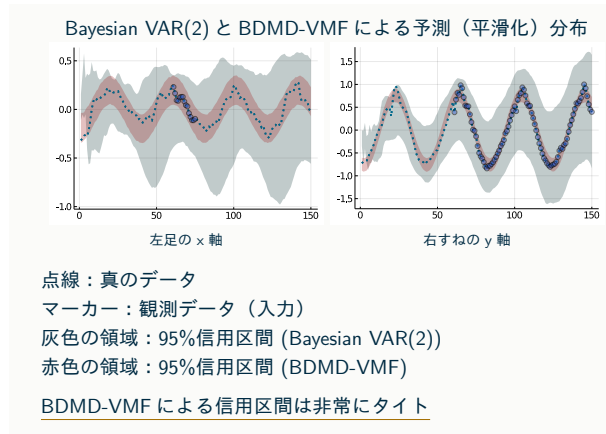


図 2：欠測データへの適用結果と信用区間

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sando Keishi, Hino Hideitsu	4. 巻 32
2. 論文標題 Modal Principal Component Analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Neural Computation	6. 最初と最後の頁 1901 ~ 1935
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1162/neco_a_01308	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takehiro Miyazaki, Takeshi Kanda, Natsuko Tsujino, Ryo Ishii, Daiki Nakatsuka, Mariko Kizuka, Yasuhiro Kasagi, Hideitsu Hino, Masashi Yanagisawa	4. 巻 online
2. 論文標題 Dynamics of Cortical Local Connectivity during Sleep-Wake States and the Homeostatic Process	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Cerebral Cortex	6. 最初と最後の頁 14pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/cercor/bhaa012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nagayama Mizuo, Aritake Toshimitsu, Hino Hideitsu, Kanda Takeshi, Miyazaki Takehiro, Yanagisawa Masashi, Akaho Shotaro, Murata Noboru	4. 巻 149
2. 論文標題 Detecting cell assemblies by NMF-based clustering from calcium imaging data	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 29 ~ 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2022.01.023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nagayama Mizuo, Aritake Toshimitsu, Hino Hideitsu, Kanda Takeshi, Miyazaki Takehiro, Yanagisawa Masashi, Akaho Shotaro, Murata Noboru	4. 巻 11727
2. 論文標題 Sleep State Analysis Using Calcium Imaging Data by Non-negative Matrix Factorization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 LNCS	6. 最初と最後の頁 102 ~ 113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-30487-4_8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Takahiro Kawashima, Hayaru Shouno, Hideitsu Hino
2. 発表標題 Bayesian Dynamic Mode Decomposition with Variational Matrix Factorization
3. 学会等名 The Thirty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shotaro Akaho, Hideitsu Hino, Noboru Murata
2. 発表標題 On a Convergence Property of a Geometrical Algorithm for Statistical Manifolds
3. 学会等名 International Conference on Neural Information Processing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川島貴大, 日野英逸
2. 発表標題 確率的動的モード分解における情報量基準による潜在的モード数推定
3. 学会等名 第22回情報論的学習理論ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上田壮志, 宮崎峻弘, 坂本航太郎, 日野英逸, 柳沢正史
2. 発表標題 一次運動野機能的ネットワーク構造が示唆する休息と徐波睡眠の類似性
3. 学会等名 Neuro2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上田壮志, 宮崎峻弘, 坂本航太郎, 日野英逸, 柳沢正史
2. 発表標題 Distinct network structures emerge in the primary motor cortex during active and quiet wake
3. 学会等名 第99回 日本生理学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上田壮志, 宮崎峻弘, 坂本航太郎, 日野英逸, 柳沢正史
2. 発表標題 安静時とノンレム睡眠時の大脳皮質局所ネットワーク構造は類似である
3. 学会等名 第31回 日本神経回路学会全国大会 (JNNS2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田壮志, 宮崎峻弘, 坂本航太郎, 日野英逸, 柳沢正史
2. 発表標題 一次運動野の機能的ネットワークはquiet wakeとnon-REM睡眠時で類似の構造をもつ
3. 学会等名 第15回Motor Control研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川島貴大, 日野英逸
2. 発表標題 ガウス過程Koopmanモード分解
3. 学会等名 第24回情報論的学習理論 (IBIS) ワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 日野英逸
2. 発表標題 ベイズ的動的モード分解
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関