

令和 6 年 9 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K20220

研究課題名（和文）多様な時系列データに潜む振動現象の統計解析

研究課題名（英文）Statistical analysis of oscillation phenomenon in time series data

研究代表者

松田 孟留（Matsuda, Takeru）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号：50808475

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：状態空間モデルを用いて時系列データに潜む振動成分をデータ駆動的に抽出する振動子分解について、さまざまな実データへの応用およびモデル・アルゴリズムの改良を行った。乳児fNIRSデータへの応用では、脳活動に由来する振動子、脈波に対応する振動子、ミラーリングノイズに対応する振動子の3種類の振動子への分解が得られた。地震波データへの応用では、火山性長周期微動イベントに対応する約11秒周期の振動子が検出された。また、振動子分解プログラムのMATLABからpythonへの移植も行い、githubでコードを公開した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

振動現象は自然界に遍在しており、その理解は分野を越えて重要である。本研究では、時系列データに潜む振動現象の理解・予測・制御を行うための統計手法を開発し、多様なデータに応用した。本手法によって、データ駆動的に振動現象の定量的理解が得られ、さらに不確実性を考慮した予測・制御を行うことが可能となる。

研究成果の概要（英文）：We worked on the application and improvement of the oscillator decomposition, which uses a state-space model to extract oscillator components latent in time series data in a data-driven manner. In the application to infant fNIRS data, we obtained three types of oscillator decomposition: oscillators derived from brain activity, those corresponding to pulse waves, and those corresponding to mirrored noise. In the application to seismic wave data, oscillators with a period of about 11 seconds corresponding to volcanic long-period microtremor events were detected. We also ported the oscillator decomposition program from MATLAB to python and published the code on github.

研究分野：統計学

キーワード：時系列解析 状態空間モデル 振動子

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

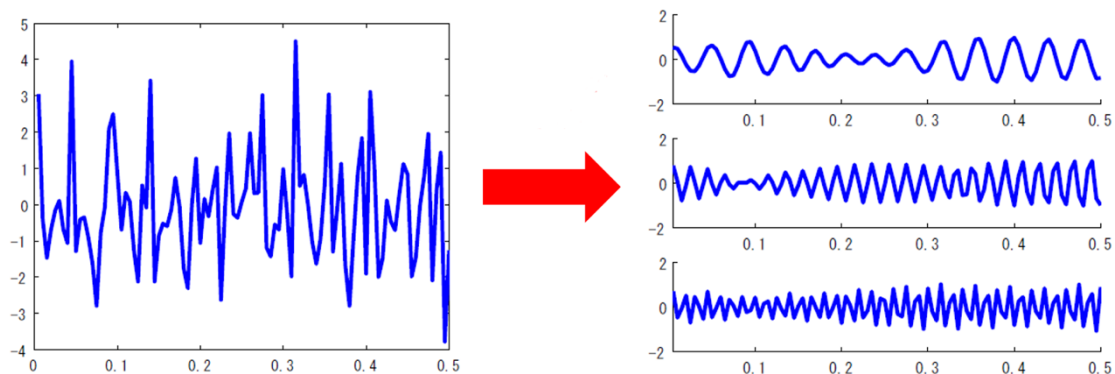
振動現象は自然界に遍在しており、その理解は分野を越えて重要である。振動現象に対する従来の研究では、現象を定性的に再現する物理モデルの構築が主眼であった。一方、実データを用いた定量的な解析のためには統計モデルが不可欠である。データに立脚した振動現象の理解・予測・制御を必要とする課題は数多い。

2. 研究の目的

本研究では、多様な時系列データに潜む振動現象を解析するための統計手法を開発し、脳神経科学や地震学などで現れる実データの解析に取り組む。データ駆動的に振動現象の定量的理解を得るとともに、不確実性を考慮した予測・制御を行うことを目指す。

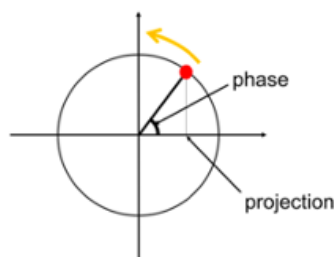
3. 研究の方法

状態空間モデルを用いて時系列データに潜む振動成分をデータ駆動的に抽出する振動子分解について、モデル・アルゴリズムの改良および脳神経科学や地震学などで現れる実データへの応用に取り組む。



$$\begin{pmatrix} x_{t+1,1}^{(k)} \\ x_{t+1,2}^{(k)} \end{pmatrix} \sim N \left(a_k \begin{pmatrix} \cos(2\pi f_k \Delta t) & -\sin(2\pi f_k \Delta t) \\ \sin(2\pi f_k \Delta t) & \cos(2\pi f_k \Delta t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{t,1}^{(k)} \\ x_{t,2}^{(k)} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \sigma_k^2 & 0 \\ 0 & \sigma_k^2 \end{pmatrix} \right) \quad (k = 1, \dots, K)$$

$$y_t \sim N \left(\sum_{k=1}^K x_{t,1}^{(k)}, \tau^2 \right)$$



4. 研究成果

(1) 振動子分解の改良

振動子分解の MATLAB プログラムの整理・改良および python への移植を行い github で公開した (https://github.com/takeru-matsuda/osc_decomp)。パラメータ推定について複数の最適化アルゴリズムの性能を比較し、最も安定しているものを採用するようにした。これに合わせて最適化の初期値の設定方法も改良した。カルマンフィルタの拡張によって勾配・ヘッシアンを逐次計算することで、パラメータの信頼区間を出力できるようにした。分解結果を周波数領域 (スペクトル・ピリオドグラム) で可視化できるようにした。Whittle 尤度にサブサンプリングを組み合わせた推定アルゴリズムによって、従来のカルマンフィルタによる対数尤度の逐次計算よりも計算時間を削減した。また、脳内双極子から電極への順モデルを用いることで、複数電極の脳波データの振動子分解においてパラメータを削減して推定を安定化する手法を開発した。

(2) 脳神経科学への応用

乳児 fNIRS データに潜む振動現象の解析を行った。状態空間モデルを用いた振動子分解によって、脳活動に由来する振動子、脈波に対応する振動子、ミラーリングノイズに対応する振動子の 3 種類の振動子への分解が得られた。このうち 2 つ目と 3 つ目の振動子は周波数帯域が大きく重なっており、バンドパスフィルタによる解析では分離が困難であると考えられる。これに対して振動子分解では、2 種類の振動子の oxy-Hb・deoxy-Hb に対する射影パターンの違いをデータ駆動的に捉えることで適切に分離することができた。

ヒト脳波の振動成分の解析を行った。ヒト脳波はアルファ波やガンマ波など特有の振動成分をもち、各成分が脳内情報処理で重要な役割を担っている。振動子分解モデルを拡張することで、頭皮上の複数電極で測定された脳波データから脳内振動子の位置や周波数を推定する手法を開発した。

(3) 地震学への応用

2014年の阿蘇山近辺の地震波データに振動子分解を適用したところ、約11秒周期の振動子が検出された。この結果は、Sandambata et al. (2015)による0.05-0.1Hzのバンドパスフィルタを用いた火山性長周期微動イベントの検出に対するデータ駆動的な裏付けを与えたといえる。

(4) その他

規格化定数の計算が困難なモデルに対する統計手法（データに欠測があるときのパラメータ推定、有効推定量、球面上のデータに対する適合度検定）、Wasserstein 距離に基づいた推定・予測、行列優調和性および行列二乗損失に基づいた行列推定、作用素スケーリング問題に対するSinkhorn アルゴリズムのもつ量子情報幾何構造に関する研究を行い、それぞれ論文が採択された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Matsuda Takeru, Soma Tasuku	4. 巻 649
2. 論文標題 Information geometry of operator scaling	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Linear Algebra and its Applications	6. 最初と最後の頁 240 ~ 267
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.laa.2022.04.022	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 該当する
1. 著者名 Mai Lingling, Inada Hitoshi, Kimura Ryuichi, Kanno Kouta, Matsuda Takeru, Tachibana Ryosuke O., Tucci Valter, Komaki Fumiyasu, Hiroi Noboru, Osumi Noriko	4. 巻 25
2. 論文標題 Advanced paternal age diversifies individual trajectories of vocalization patterns in neonatal mice	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 iScience	6. 最初と最後の頁 104834 ~ 104834
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.isci.2022.104834	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 該当する
1. 著者名 Ito Shin-ichi, Matsuda Takeru, Miyatake Yuto	4. 巻 61
2. 論文標題 Adjoint-based exact Hessian computation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 BIT Numerical Mathematics	6. 最初と最後の頁 503 ~ 522
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10543-020-00833-0	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 T. Matsuda, M. Uehara and A. Hyvarinen.	4. 巻 22(158)
2. 論文標題 Information criteria for non-normalized models.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Machine Learning Research	6. 最初と最後の頁 1-33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する

1. 著者名 Amari Shun-ichi, Matsuda Takeru	4. 巻 74
2. 論文標題 Wasserstein statistics in one-dimensional location scale models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Annals of the Institute of Statistical Mathematics	6. 最初と最後の頁 33~47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10463-021-00788-1	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 Matsuda Takeru, Homae Fumitaka, Watanabe Hama, Taga Gentaro, Komaki Fumiyasu	4. 巻 18
2. 論文標題 Oscillator decomposition of infant fNIRS data	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PLOS Computational Biology	6. 最初と最後の頁 e1009985
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pcbi.1009985	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 松田 孟留	4. 巻 31
2. 論文標題 縮小推定と優調和性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 応用数理	6. 最初と最後の頁 7~14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11540/bjsiam.31.4_7	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 T. Matsuda and Y. Miyatake	4. 巻 9
2. 論文標題 Estimation of ordinary differential equation models with discretization error quantification	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SIAM/ASA Journal on Uncertainty Quantification	6. 最初と最後の頁 302--331
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1137/19M1278405	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 T. Matsuda and Y. Miyatake	4. 巻 388
2. 論文標題 Generalization of partitioned Runge--Kutta methods for adjoint systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Computational and Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 113308
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cam.2020.113308	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 Predictive density estimation under the Wasserstein loss	4. 巻 210
2. 論文標題 T. Matsuda and W. E. Strawderman	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Planning and Inference	6. 最初と最後の頁 53--63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jspi.2020.05.005	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 該当する

1. 著者名 松田 孟留	4. 巻 49
2. 論文標題 競技かるたの決まり字に関する統計的解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 応用統計学	6. 最初と最後の頁 1--11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5023/jappstat.49.1	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 T. Matsuda and A. Takemura	4. 巻 37
2. 論文標題 Game-theoretic derivation of upper hedging prices of multivariate contingent claims and submodularity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 213--248
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s13160-019-00394-y	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 Y. Maruyama, T. Matsuda and T. Onishi	4. 巻 65
2. 論文標題 Harmonic Bayesian prediction under alpha-divergence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Information Theory	6. 最初と最後の頁 5352--5366
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIT.2019.2915245	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34件 (うち招待講演 18件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 T. Matsuda, S. Baba and A. Kato
2. 発表標題 Data-driven decomposition of slow-to-fast earthquakes
3. 学会等名 International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 城田 慎一郎, 松田 孟留
2. 発表標題 脳波時系列データにおける状態空間モデルのベイズ推定
3. 学会等名 2022年度統計関連学会連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松田 孟留
2. 発表標題 行列の縮小推定
3. 学会等名 確率・統計・行列ワークショップ松本2022. (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松田 孟留
2. 発表標題 行列のベイズ縮小推定
3. 学会等名 科研費シンポジウム「ベイズ統計学の最近の展開」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松田 孟留
2. 発表標題 行列の縮小推定
3. 学会等名 日本数学会2023年度年会(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Wenkai Xu and Takeru Matsuda
2. 発表標題 Interpretable Stein Goodness-of-fit Tests on Riemannian Manifolds
3. 学会等名 Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning (ICML 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeru Matsuda
2. 発表標題 Estimation under matrix quadratic loss and matrix superharmonicity
3. 学会等名 EcoSta 2021(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wenkai Xu and Takeru Matsuda
2. 発表標題 On Geometry of Stein Goodness-of-fit Testing
3. 学会等名 5th conference on Geometric Science of Information (GSI 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shun-ichi Amari and Takeru Matsuda
2. 発表標題 Wasserstein statistics in one-dimensional location-scale models
3. 学会等名 5th conference on Geometric Science of Information (GSI 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeru Matsuda
2. 発表標題 Estimation under matrix quadratic loss and matrix superharmonic priors
3. 学会等名 EAC-ISBA 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松田 孟留, 宮武 勇登
2. 発表標題 一般化近単調回帰と常微分方程式の数値計算の誤差推定
3. 学会等名 日本応用数理学会2021年度年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 伸一, 松田 孟留, 宮武 勇登
2. 発表標題 シンプレクティックアジョイント法に基づく高精度不確実性定量化法
3. 学会等名 2021年度統計関連学会連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松田 孟留
2. 発表標題 競技かるたの決まり字に関する統計的解析
3. 学会等名 2021年度統計関連学会連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松田 孟留
2. 発表標題 データ駆動型研究のためのモデリング・アルゴリズム・数理
3. 学会等名 CBI学会2021年大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 郡山 拓也, 松田 孟留, 駒木 文保
2. 発表標題 イーエンス・ピットマン分割のパラメータ推定の漸近理論
3. 学会等名 2021年度日本統計学会春季集会
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 M. Uehara, T. Matsuda and J. K. Kim
2 . 発表標題 Imputation estimators for unnormalized models with missing data
3 . 学会等名 23rd International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 W. Xu and T. Matsuda
2 . 発表標題 A Stein goodness-of-fit test for directional distributions
3 . 学会等名 23rd International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 M. Uehara, T. Kanamori, T. Takenouchi and T. Matsuda
2 . 発表標題 A unified statistically efficient estimation framework for unnormalized models
3 . 学会等名 23rd International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 松田 孟留
2 . 発表標題 Extracting non-sinusoidal oscillators from neural time series data
3 . 学会等名 第43回日本神経科学大会 (招待講演)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 松田 孟留, 相馬 輔
2. 発表標題 作用素スケーリングの情報幾何
3. 学会等名 日本応用数理学会2020年度年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤 伸一, 松田 孟留, 宮武 勇登
2. 発表標題 Second-order adjoint方程式に基づくヘッセ行列の計算について
3. 学会等名 日本応用数理学会2020年度年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松田 孟留, William Strawderman
2. 発表標題 Matrix superharmonic priors for Bayes estimation under matrix quadratic loss
3. 学会等名 2020年度統計関連学会連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Matsuda and A. Hyvarinen
2. 発表標題 Estimation of Non-Normalized Mixture Models
3. 学会等名 22nd International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Matsuda
2. 発表標題 Singular value shrinkage priors and empirical Bayes matrix completion
3. 学会等名 New and Evolving Roles of Shrinkage in Large-Scale Prediction and Inference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Matsuda
2. 発表標題 Singular value shrinkage prior: a matrix version of Stein's prior
3. 学会等名 Symposium in Memory of Charles Stein (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Matsuda
2. 発表標題 Singular value shrinkage priors for Bayesian prediction
3. 学会等名 EAC-ISBA 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Matsuda and Y. Miyatake
2. 発表標題 Estimation of ODE models with quantifying discretization error
3. 学会等名 SciCADE 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田 孟留, 加藤 愛太郎, 駒木 文保
2. 発表標題 ベイズ振動子分解による地震波データの解析
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会.
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田 孟留, Aapo Hyvarinen
2. 発表標題 Estimation of non-normalized mixture models
3. 学会等名 2019年度統計関連学会連合大会.
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田 孟留
2. 発表標題 脳神経データの振動子分解
3. 学会等名 生理研研究会「脳神経ダイナミクスの可視化と制御」.(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田 孟留
2. 発表標題 Oscillator decomposition of time series data
3. 学会等名 理研CBSワークショップ「脳・心・機械の理論に向けて」.
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田 孟留
2. 発表標題 特異値縮小型事前分布と経験ベイズ行列補完
3. 学会等名 大阪大学データ科学特別セミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田 孟留
2. 発表標題 離散化誤差を考慮した常微分方程式モデルのパラメータ推定
3. 学会等名 東京大学数値解析セミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田 孟留, 宮武 勇登
2. 発表標題 離散化誤差を考慮した常微分方程式モデルのパラメータ推定
3. 学会等名 RIMS研究集会「諸科学分野を結ぶ基礎学問としての数値解析学」（招待講演）
4. 発表年 2019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
---------	---------