

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03287

研究課題名（和文）データからの潜在ダイナミクス抽出のための統計的機械学習とその応用

研究課題名（英文）Machine learning for extracting latent dynamics from data

研究代表者

河原 吉伸（Kawahara, Yoshinobu）

九州大学・マス・フォア・インダストリ研究所・教授

研究者番号：00514796

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,900,000円

研究成果の概要（和文）：計測技術・情報インフラの発展を背景に、観測/計測データを用いたデータ駆動による科学的知識の抽出は、近年様々な領域において重要な課題として認識されている。本研究では、複雑な現象が従う動的特性（ダイナミクス）をデータから抽出するための機械学習アルゴリズムの構築に取り組んだ。特に、物理分野で注目を集めるクープマン解析を中心とした作用素論的解析を、機械学習の枠組みに基づき融合的に拡張し、複雑な系の情報抽出とその信頼性評価を行う方法を開発した。また、抽出情報を予測に用いるための学習アルゴリズムの開発も行った。最終的には、複数科学領域における研究者との共同による応用的研究を行いその有用性の検証を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

データ駆動による科学的知識の抽出は、近年様々な領域においてますます重要となっている。本研究では、データ駆動により複雑現象に関する動的特性の情報抽出を行い、そしてそれを更に予測へ用いるための新たな機械学習に基づく理論・アルゴリズムの構築を進めた。また、脳波解析や集団運動をはじめとしたいくつかの科学領域におけるデータ解析に対して適用し、その有用性を確認した。このような課題は広く科学領域において重要なものであり、本研究で得られた成果は、本研究でも取り組んだ分野に限らず今後広く他分野へと波及する技術的要素となることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：With the development of measurement technology and information infrastructure, the extraction of scientific knowledge by data-driven approaches using observation / measurement data has been recognized as an important issue in various fields. In this study, we worked on the development of machine learning algorithms for extracting from data dynamic characteristics (dynamics) that complicated phenomena follow. In particular, we have developed methods for extracting information on complex systems and evaluating their validities by expanding the operator-theoretic analysis, including Koopman analysis, which is attracting attention in the field of physics recently, based on the framework of machine learning. We also developed machine learning algorithms to use extracted information for prediction. Finally, we conducted applied research in collaboration with researchers in multiple scientific fields to verify its usefulness.

研究分野：機械学習、データ科学

キーワード：非線形ダイナミクス 作用素論的解析 機械学習

1. 研究開始当初の背景

飛躍的な計測技術・情報インフラの発展を背景に、観測/計測データを用いたデータ駆動による科学的知識の抽出は、近年様々な科学分野において重要な課題としてその認識への浸透が進んでいる。高度な知能情報処理を実現する理論・アルゴリズム体系である統計的機械学習は、データ駆動科学においてキーとなる情報技術として、ますますその重要性を増す研究領域の一つである。しかし一方で、このような領域で報告される成功例は、データの静的な統計的関係を見出すものが中心で、多くの科学/工学領域において重要となる、動的な現象(プロセス)に内在する物理的な法則(ダイナミクス)のデータからの抽出に関する研究は今後の発展が期待される領域であった。動的なプロセスを対象とするデータ駆動科学のこれまでの進展が遅留してきた原因としては、主に次の2点が考えられる。(1)静的データに比べ、科学/工学的に興味がある規模の時空間現象を観測する高次元時系列データの高精度での取得が昨今まで計測技術的に困難であった。ひいては情報科学者が扱う機会が遅れた。(2)カオス分野で知られる非線形系の予測不可能性などからも推察できるように、複雑な動的現象の予測は数理的に困難な問題の一つである。汎化(予測)を元来の目的とする機械学習においては、このような事情からも有効な決定的な方法論が確立されていないという状況であった。

一方で、一部の物理分野(特に流体力学分野)では研究開始当時から最近においても、クーブマン作用素を用いた一連のダイナミクス解析法が注目されている[1,2]。この方法は、系の時間発展を作用素表現して(無限次元の)線形領域で扱う事により、数理的に直接計算する事が困難である非線形性を回避してダイナミクス解析を行う。これら分野では、この方法によりダイナミクスを固有なものへと分解して解析することが興味を中心であるが、このような作用素表現によるアプローチは汎用性が高く、データ駆動による解析の観点から見ると機械学習で議論される方法論との数理的な親和性・拡張性も高いと課題推進者は考えた。

2. 研究の目的

本研究では、対象となる複雑な現象が従う物理的な法則(ダイナミクス)をデータから抽出するための統計的機械学習に関する理論体系とアルゴリズムの構築に取り組む。特に、物理分野で最近高い注目を集めるクーブマン解析を中心とした作用素論的解析を機械学習の枠組みに基づき融合的に発展・拡張させ、非線形性やマルチスケール性を伴う複雑な系の情報抽出を実現する枠組みを確立する。また、抽出される情報を統計的予測に用いるための学習アルゴリズムの開発も行う。これにより、データ駆動により複雑現象を理解するに資する科学的知識抽出、そしてそれを更に予測へ用いるための新たな理論・アルゴリズム体系の創出を目的とする。また最終的には、手法評価に加え、複数ドメインにおける研究者との共同による応用的研究を行いその有用性を検証する。

3. 研究の方法

本研究では、上記のような目的の達成のため、(課題1)作用素論的ダイナミクス抽出法の機械学習に基づく定式化、(課題2)主要なダイナミクスの特定や拡張的状況のための原理的拡張、そして(課題3)抽出情報に基づくダイナミクス予測のための学習アルゴリズムの構築、の3つの課題について取り組んだ。

まず(課題1)では、クーブマン解析などの作用素論的解析の確率的定式化や、カーネル法や深層学習を用いた基底推定法の確立、そして得られた理論・アルゴリズムの周辺情報領域や科学分野への適用による検証を進めた。(課題2)では、前課題で得られた枠組みを中心に、主要なダイナミクスを特定するための統計推測手法の開発や、要素間の相互作用のダイナミクスの抽出など、原理的な拡張やそれに基づく手法開発について進めた。そして(課題3)では、作用素論的解析に基づき抽出された情報に基づき、ダイナミクスの類似度評価や将来予測を行うための学習アルゴリズムの構築を行う。

4. 研究成果

まず(課題1)に関連して、作用素論的解析において重要となる確率的定式化として、確率的力学系に対する作用素表現の推定法を導出した(Hashimoto et al., *Journal of Machine Learning Research*

(2020)). 特に, 従来手法の数値的不安定性を改良した, 本問題へ適用可能な Shift-invert Arnoldi 法を導出し大幅な精度向上を実現することを確認した. また作用素論的解析においては, 観測量の設計, または学習をどのように行うかが重要となる. この問題について, 特に動画に対する動的モード分解の拡張について取り組み, 観測量を画像における辞書学習を用いて自動的に最適化しながら動的モード分解を実行する方法 (Ul-Haq et al., *Computer Vision and Image Understanding* (2020)) や, 畳み込みオートエンコーダを用いて学習しながら動的モード分解を実行する方法 (Ul-Haq et al., *Computer Vision and Image Understanding* (2022)) などを導出し, その数値的向上について確認した.

次に (課題 2) に関連して, 過去に課題推進者により提案された正定値カーネルを用いた動的モード分解 [3] を, ベクトル値カーネルを用いた定式化へと拡張することで, 要素間の相互作用に関するダイナミクスを抽出可能とする方法を導出し, 数値計算によりその妥当性について確認した (Fujii and Kawahara, *Neural Networks* (2019)). また, 一般的な動的モード分解は教師情報 (ラベルなど) を利用する手段はないが, 教師情報を持つ時系列データの集合がある際に, 教師情報を用いてその際を与える動的モードを有効に取り出すための手法についてグループ正則化を用いた定式化を行い, これを数値的に検証した (Fujii and Kawahara, *Pattern Recognition Letters* (2019)). この問題についてはさらに, 判別分析と統合的な指標により動的モード分解を実行する方法についても定式化を行い, より効果的に判別的な動的モードを抽出できることを実験的にも確認した (Takeishi et al., *SIAM Journal of Applied Dynamical Systems* (2022)). また導出した方法を中心にこれら手法を, 複雑な動的特性の抽出が重要であると考えられるいくつかの領域に対して適用し, 科学的知見獲得に資する応用的研究も遂行した. 例えば, ヒトの歩行運動における主要な周期性の抽出 (Fujii et al., *Scientific Reports* (2019)) や, スポーツや生物群のような集団運動における相互作用の主要ダイナミクスの抽出 (Fujii et al., *PLOS Computational Biology* (2018)), (Fujii et al., *Scientific Reports* (2020)) などにおいて, その有用性を確認した.

そして (課題 3) に関連して, 部分空間角に基づく正定値カーネル [4] に基づき過去に課題推進者らが提案した動的モードの類似性評価方法 [5] を, いくつかの領域における予測 (教師あり/なし学習) において有効であることを確認した. 例えば, 脳波から対応する動作を推定する問題 (ブレイン・マシン・インターフェース (BCI)) では, 動的モード分解により脳科学的に解釈可能な脳波のコヒーレンスを反映した特徴量が抽出可能であることを確認すると同時に, これを用いた上記予測により, 既存の主要な方法 (Temporal ICA) よりも大幅な予測精度の向上が得られることを実験的にも確認した (Shiraishi et al., *Journal of Neural Engineering* (2020)). 一方で, ダイナミクスの作用素表現で抽出される位相的特性 (安定性) を取り入れたニューラルネットに基づく (将来) 予測モデルを提案し, 複雑な現象の長期 (将来) 予測が既存手法より大幅に高精度に可能であることを実験的にも確認した (Takeishi and Kawahara, *AAAI'21*).

< 引用文献 >

- [1] C.W. Rowley, I. Mezić, S. Bagheri, P. Schlatter, and D.S. Henningson, "Spectral analysis of nonlinear flows," *Journal of Fluid Mechanics*, 641: 115-127, 2009.
- [2] M. Budišić, R.M. Mohr, and I. Mezić, "Applied Koopmanism," *Journal of Nonlinear Science*, 22(4): 047510, 2012.
- [3] Y. Kawahara, "Dynamic Mode Decomposition with Reproducing Kernels for Koopman Spectral Analysis," *Advances in Neural Information Processing Systems 29 (Proc. of NIPS'16)*, pp.911-919, 2016.
- [4] J. Ham and D. Lee, "Grassmann discriminant analysis: a unifying view on subspace-based learning," *Proc. of the 25th Int'l Conf. on Machine learning (ICML'08)*, pp.376-383, 2008.
- [5] K. Fujii, Y. Inaba, and Y. Kawahara, "Koopman spectral kernels for comparing complex dynamics with application to multiagent in sports," *Proc. of the 2017 European Conf. on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (ECML-PKDD'17)*, pp.127-139, 2017.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 K. Fujii, N. Takeishi, M. Hojo, Y. Inaba & Y. Kawahara	4. 巻 10
2. 論文標題 Physically-interpretable classification of network dynamics in complex collective motions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 3005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-58064-w	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 Y. Shiraishi, Y. Kawahara, O. Yamashita, R. Fukuma, S. Yamamoto, Y. Saitoh, H. Kishima & T. Yanagisawa	4. 巻 17
2. 論文標題 Neural decoding of ECoG signals using dynamic mode decomposition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Neural Engineering	6. 最初と最後の頁 36009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-2552/ab8910	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 I. Ul Haq, K. Fujii, & Y. Kawahara	4. 巻 199
2. 論文標題 Dynamic mode decomposition via dictionary learning for foreground modeling in videos	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computer Vision and Image Understanding	6. 最初と最後の頁 103022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cviu.2020.103022	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 N. Takeishi, & Y. Kawahara	4. 巻 --
2. 論文標題 Learning Multiple Nonlinear Dynamical Systems with Side Information	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of the 59th IEEE Conf. on Decision and Control (CDC'20)	6. 最初と最後の頁 3206-3211
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CDC42340.2020.9304482	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. Hashimoto, I. Ishikawa, M. Ikeda, Y. Matsuo, & Y. Kawahara	4. 巻 21
2. 論文標題 Krylov Subspace Method for Nonlinear Dynamical Systems with Random Noise	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Machine Learning Research	6. 最初と最後の頁 1-29
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 -

1. 著者名 Keisuke Fujii, and Yoshinobu Kawahara	4. 巻 117
2. 論文標題 Dynamic mode decomposition in vector-valued reproducing kernel Hilbert spaces for extracting dynamical structure among observables.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Neural networks	6. 最初と最後の頁 94-103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2019.04.020	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 Keisuke Fujii, Naoya Takeishi, Benio Kibushi, Motoki Kouzaki, and Yoshinobu Kawahara	4. 巻 9
2. 論文標題 Data-driven spectral analysis for coordinative structures in periodic human locomotion.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific reports	6. 最初と最後の頁 16755
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-53187-1	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. Bito, M. Hiraoka, and Y. Kawahara	4. 巻 -
2. 論文標題 Learning with coherence patterns in multivariate time-series data via dynamic mode decomposition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of the 2019 Int'l Joint Conf. on Neural Networks (IJCNN'19)	6. 最初と最後の頁 19278
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IJCNN.2019.8852177	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 K. Fujii, and Y. Kawahara	4. 巻 122
2. 論文標題 Supervised dynamic mode decomposition via multitask learning	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Pattern Recognition Letters	6. 最初と最後の頁 7-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.patrec.2019.02.010	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 N. Takeishi, T. Yairi and Y. Kawahara	4. 巻 --
2. 論文標題 Factorially Switching Dynamic Mode Decomposition for Koopman Analysis of Time-Variant Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC'18)	6. 最初と最後の頁 6402-6408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CDC.2018.8619846	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 I. Ishikawa, K. Fujii, M. Ikeda, Y. Hashimoto and Y. Kawahara	4. 巻 --
2. 論文標題 Metric on Nonlinear Dynamical Systems with Perron-Frobenius Operators	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advances in Neural Information Processing Systems 31 (Proc. of NeurIPS'18)	6. 最初と最後の頁 2856-2866
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 -

1. 著者名 K. Fujii, T. Kawasaki, Y. Inaba and Y. Kawahara	4. 巻 14
2. 論文標題 Prediction and classification in equation-free collective motion dynamics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PLOS Computational Biology	6. 最初と最後の頁 e1006545
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pcbi.1006545	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 I. Ul-Haq, T. Iwata, and Y. Kawahara	4. 巻 216
2. 論文標題 Dynamic mode decomposition via convolutional encoders for dynamics modeling in videos	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computer Vision and Image Understanding	6. 最初と最後の頁 103355
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cviu.2021.103355	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 S. Ikeda, K. Kawano, S. Watanabe, O. Yamashita, and Y. Kawahara	4. 巻 247
2. 論文標題 Predicting behavior through dynamic modes in resting-state fMRI data	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 NeuroImage	6. 最初と最後の頁 118801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neuroimage.2021.118801	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 N. Takeishi, K. Takeuchi, K. Fujii, and Y. Kawahara	4. 巻 21
2. 論文標題 Discriminant Dynamic Mode Decomposition for Labeled Spatio-Temporal Data Collections	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 SIAM Journal on Applied Dynamical Systems	6. 最初と最後の頁 1030-1058
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1137/21M1399907	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 Keisuke Taga, Yuzuru Kato, Yoshinobu Kawahara, Yoshihiro Yamazaki, and Hiroya Nakao	4. 巻 31
2. 論文標題 Koopman spectral analysis of elementary cellular automata	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science	6. 最初と最後の頁 103121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0059202	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28件（うち招待講演 13件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 武石直也, 河原吉伸
2. 発表標題 安定不変集合をもつ力学系の学習
3. 学会等名 第23回 情報論的学習理論ワークショップ (IBIS 2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井慶輔, 武石直也, 河原吉伸, 武田一哉
2. 発表標題 複数人のモデリングのための部分観測と力学的制約を伴う分散型政策学習
3. 学会等名 第23回 情報論的学習理論ワークショップ (IBIS 2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 橋本悠香, 石川勲, 池田正弘, 紅村冬大, 勝良健史, 河原吉伸
2. 発表標題 Reproducing kernel Hilbert C^* -moduleによる多変量データの解析
3. 学会等名 第23回 情報論的学習理論ワークショップ (IBIS 2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河原吉伸
2. 発表標題 非線形ダイナミクスの作用素論的データ解析とその応用
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会「超スマート社会のシステムデザインのための理論と応用」研究部会 第9回研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河原吉伸
2. 発表標題 動的モード分解の最近の発展と応用の広がり
3. 学会等名 第36回 プラズマ・核融合学会 年会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河原吉伸
2. 発表標題 非線形力学系の作用素論的データ解析：クープマン解析、動的モード分解の基礎から最近の話題まで
3. 学会等名 RIMS共同研究 (公開型) 諸科学分野を結ぶ基礎学問としての数値解析学の研究集会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kawahara
2. 発表標題 Data-driven Analysis of Dynamical Systems: An Operator-theoretic Approach
3. 学会等名 2019 International Joint Conference on AI and Data Science: Mathematics and Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河原吉伸
2. 発表標題 非線形ダイナミクスの作用素論的データ解析とその応用
3. 学会等名 SICE九州フォーラム「モデリングと制御における学習と最適化理論と実践」 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kawahara
2. 発表標題 Operator Theoretic Analysis of Dynamical Systems and Dynamic Mode Decomposition
3. 学会等名 JSPS A3 Workshop on Soft Matter 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河原吉伸
2. 発表標題 データ駆動によるダイナミクス解析と機械学習
3. 学会等名 第24回情報・統計科学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Fujii, N. Takeishi & Y. Kawahara
2. 発表標題 Interpretable classification of complex collective motions using graph dynamic mode decomposition
3. 学会等名 11th Asian Conference on Machine Learning (ACML2019) Workshop on Machine Learning for Trajectory, Activity, and Behavior (ACML-TAB) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋本悠香, 石川勲, 池田正弘, 松尾洋一, 河原吉伸
2. 発表標題 ノイズ付き非線形力学系のためのKrylov部分空間法
3. 学会等名 第22回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS 2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井慶輔, 武石直也, 河原吉伸
2. 発表標題 観測量間の動的構造を抽出するグラフ動的モード分解と集団スポーツデータへの応用
3. 学会等名 第22回情報論的学習理論ワークショップ(IBIS 2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kawahara
2. 発表標題 Data-driven Analysis of Nonlinear Dynamical Systems Based on Operator-theoretic Methods
3. 学会等名 Mini Symposia: Towards integration of neuroscience and machine intelligence, NEURO 2019, 1S06a-6
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井 慶輔, 武石直也, 稲葉優希, 木伏紅緒, 神崎素樹, 河原吉伸
2. 発表標題 Data-driven spectral analysis for social biomechanics
3. 学会等名 第1回慧ひろば(バイオメカニクス研究会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kawahara
2. 発表標題 Data-Driven Analysis of Koopman Spectra with Reproducing Kernels
3. 学会等名 Advanced Data-Driven Techniques and Numerical Methods in Koopman Operator Theory, SIAM Conf. On Applications of Dynamical Systems (DS'19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kawahara
2. 発表標題 Kernel Koopman spectral analysis for nonlinear dynamical systems
3. 学会等名 Structure-exploiting techniques for approximation, inference and control of complex systems (MS361), 2019 SIAM Conf. on Computational Science and Engineering (CSE'19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kawahara
2. 発表標題 Operator-theoretic data analysis for dynamic processes
3. 学会等名 I2CNER-IMI International Workshop
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Kawahara
2. 発表標題 Koopman spectral analysis with reproducing kernels for nonlinear dynamical systems
3. 学会等名 MC03: Data-Driven Methods for Dynamical Systems, 2018 INFORMS Int'l Conf. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 河原吉伸
2. 発表標題 動的モード分解による時空間データ解析
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Kawahara
2. 発表標題 Kernel Koopman spectral analysis for nonlinear dynamical systems
3. 学会等名 Structure-exploiting techniques for approximation, inference and control of complex systems (MS361), 2019 SIAM Conf. on Computational Science and Engineering (CSE19) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kawahara
2. 発表標題 Data-Driven Analysis of Dynamical Systems: From the Operator-Theoretic Perspective
3. 学会等名 Perspectives on Artificial Intelligence and Machine Learning in Materials Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河原吉伸
2. 発表標題 非線形力学の作用素論的解析とニューラルネット
3. 学会等名 非線形力学に基づく次世代AIと基盤技術に関するシンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河原吉伸
2. 発表標題 複雑ダイナミクスの理解へのデータ駆動によるアプローチと機械学習
3. 学会等名 2021年度 人工知能学会全国大会 (第35回), 企画セッション KS-04 「人工知能と数学-数学の強み-」 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河原吉伸
2. 発表標題 非線形ダイナミクスの作用素論的データ解析とその応用
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会「超スマート社会のシステムデザインのための理論と応用」研究部会 第9回研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 児島歩武, 河原吉伸
2. 発表標題 残差の独立性に基づく動的モード間の因果構造の探索
3. 学会等名 第24回 情報論的学習理論ワークショップ (IBIS 2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Ikeda, K. Kawano, S. Watanabe, O. Yamashita, and Y. Kawahara
2. 発表標題 Human behavior can be predicted from resting-state brain dynamic modes
3. 学会等名 第44回日本神経科学大会/第1回 CJK 国際会議
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Ikeda, K. Kawano, S. Watanabe, O. Yamashita, and Y. Kawahara
2. 発表標題 Resting-state brain dynamic modes predict behavioral traits
3. 学会等名 2021 Annual Meeting of Organization for Human Brain Mapping (OHBM-21)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 評価装置、評価方法、プログラム、ならびに、情報記録媒体	発明者 藤井慶輔，河原吉伸	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2018/019838	出願年 2018年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔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
研究 分担者	中尾 裕也 (Nakao Hiroya) (40344048)	東京工業大学・工学院・教授 (12608)	

	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
研究 協力者	山下 宙人 (Yamashita Okito) (80418516)	株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報通信総合研 究所・室長 (94301)	
研究 協力者	藤井 慶輔 (Fujii Keisuke) (70747401)	名古屋大学・大学院情報学研究所・准教授 (13901)	

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
---------	---------