

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（特設分野研究）

研究期間：2016～2019

課題番号：16KT0019

研究課題名（和文）非カオス的なストレンジアトラクターを活用したレザバー計算機の理論と実装

研究課題名（英文）Theory and Implementation of Reservoir Computing Utilizing Non-Chaotic Strange Tractors

研究代表者

青柳 富誌生（Aoyagi, Toshio）

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：90252486

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、大自由度非線形力学系を計算資源として活用するため、適切な指導原理に基づいてより良いレザバー計算機を構築すること、また、逆に力学系自体を計算資源という新たな側面で特徴付け、力学系の基礎的研究に新たな指標を提供することを目的としている。最初に、非カオス的なストレンジアトラクターを示す力学系をレザバーとして活用する可能性を検討し、適切なタスクの設定なども含めての研究を行った。最終的に、力学系の相互作用を規定するネットワーク構造が重要である点に着目して、リカレント相互情報量最大化という指導原理で構築する事で、特にメモリータスクに関して性能の向上が見られる事を発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レザバー計算は最近注目されているトピックであり、特に、大自由度非線形力学系の複雑な振る舞いを、計算資源として工学的応用に繋げる点は、数学の基礎理論と工学的応用の絡む学際的な研究テーマである。これまで、edge of chaos しか有効なレザバー構築の指針が無かったが、今回リカレント情報量最大化という新たな指針を示せたことは、工学的応用だけでなく、力学系の新たな特徴付けという基礎科学への貢献も期待出来る。最後に、数学的に非常にマニアックな力学系の性質が、情報処理システムとして工学的応用や脳・神経系の理解に係している点は、基礎的学問の裾野の広い研究が如何に重要かを示す社会的意義も大きいといえる。

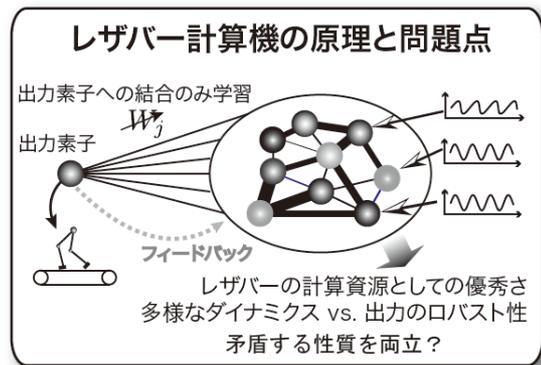
研究成果の概要（英文）：In this study, to utilize large-degree-of-freedom nonlinear dynamical systems as a computational resource, we have explored appropriate guiding principles to construct a better Reservoir Computing and, at the same time, attempted to characterize the dynamical system itself as a new aspect of computational resources. First, we have examined the possibility of using dynamical systems that exhibit non-chaotic strange tractors as reservoirs, included the setting of appropriate tasks. Finally, focusing on the importance of the network structure that defines the interaction of the dynamical systems, we found that the guiding principle of recurrent mutual information maximization improves the performance, especially for the memory task.

研究分野：非線形物理学、理論神経科学

キーワード：レザバー計算 カオス 非線形力学系

## 1. 研究開始当初の背景

知性の基盤である脳・神経系の情報処理には、学習に時間がかかるが高度な判断や識別を行う処理(最近話題の deep learning 等)と、運動学習や環境適応など素早く学習を行う処理がある。後者の素早い学習のモデルとして、近年レザバー計算(Reservoir computing)というパラダイムが注目されており、脳の運動制御信号生成のモデルなどに活用されている(Sussillo 他, Neuron, 2009; Laje 他, Nature Neurosci., 2013)。そのアイデアの骨子は以下に集約される(右図)。



- (1) 大自由度の結合力学系(例:非対称ランダム結合したリカレントニューラルネットワークなどの大自由度結合力学系)を用意する(レザバーと呼ぶ)。
- (2) レザバーの各力学系の状態の線形和を出力素子とする。
- (3) 目的の時系列を再現するように出力素子とレザバー間の線形結合の係数を学習する。

ここで、望ましいレザバーの性質

- ・時空間的に十分多様なダイナミクスを示す(多様性:カオス性)。
- ・ほぼ同じ状況下で再現性が高い(安定性)。

の2点であるが、これらは矛盾する要請でもあり、従来の研究ではカオスの縁 edge of chaos の状態が最も計算能力が高いとされている(Bertschinger 他, Neural Comp., 2004)。

一方、準周期外力を加えた非線形力学系に見られる非カオス的ストレンジアトラクター Strange non-chaotic attractor(SNA)は、リヤプノフ指数が非正値であるにも関わらずアトラクターがフラクタル等の複雑な構造をもつ。すなわち、通常は矛盾する複雑性と安定性の両立がSNAにおいて可能であり、これを活用することで、レザバー計算における安定性と多様性の狭間の最適解である edge of chaos 以外の、レザバー設計の新たな指導原理を見出す可能性があった。また、そもそも edge of chaos (と本質的に同等の echo state 条件も含め)以外のレザバー構築の設計指針は他にないのか、理論的に研究する必要性があった。

## 2. 研究の目的

本研究では、大自由度非線形力学系を計算資源として活用するため、適切な指導原理に基づいてより良いレザバー計算機を構築すること、また、逆に力学系自体を計算資源という新たな側面で特徴付け、力学系の基礎的研究に新たな指標を提供することを目的としている。最初に、非カオス的なストレンジアトラクターを示す力学系をレザバーとして活用する可能性を検討し、適切なタスクの設定なども含めて研究を進める。また、従来の性能の良い計算資源としてのレザバーを構築する設計指針である edge of chaos とは別の汎用性のある設計指針を構築することも目指す。例えば、力学系の相互作用を規定するネットワーク構造が重要である点に着目して、リカレント相互情報量最大化という指導原理でネットワークを構築することなども検討する。

## 3. 研究の方法

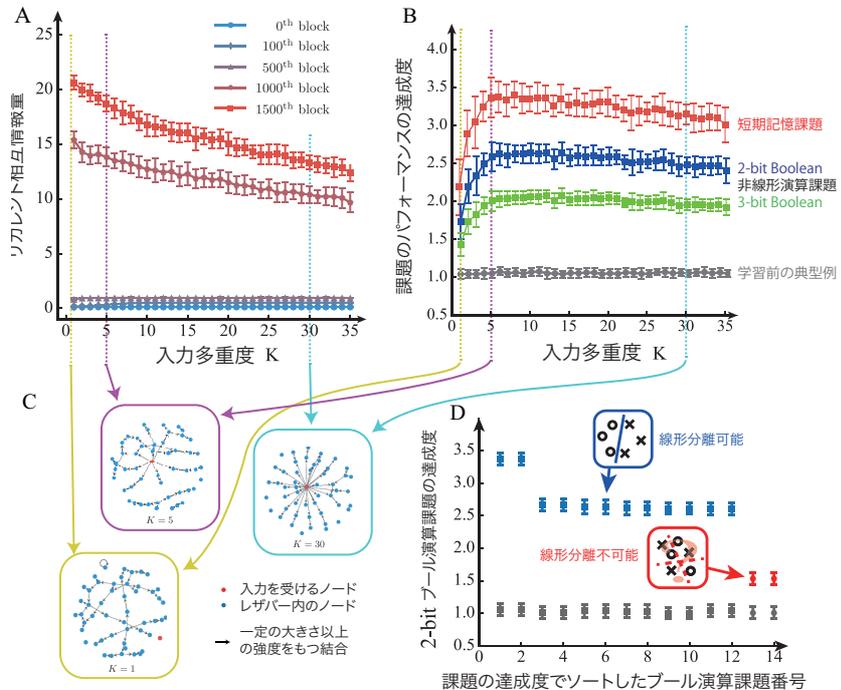
本研究では、力学系の性質を上手く利用することで、計算資源として力学系を活用し、そこから力学系自体を新たな側面で捉え直す基礎理論を構築することを目指す。最初に、非カオス的なストレンジアトラクターを示す力学系を計算資源(レザバー)として活用することで、従来の限界を超えた高い学習・適応能力をもつレザバー計算を構築可能かを検証する。また、その過程で大自由度結合力学系を新たな切り口で見直し、情報論的視点で力学系を特徴付けることも、検討する。

前述したように Reservoir Computing の手法においては、フィードバックなどの環境に応じた入力レザバーと呼ばれる大自由度非線形力学系に投射され、出力はレザバーの各要素の状態のリードアウトから線形重みを調節することで得られる。「レザバー」としての性能を決める重要な要因は、入力の影響を transient な dynamics として一定時間保持する特性(fading memory)と(Maass 他, Neural Comp., 2002)、入力を高次元の空間に非線形変換し分離可能なものにする特性(input separability)である。すなわち、レザバーの計算能力を規定しているこれら2つの特性を定量的に評価することが重要である。既にルジャンドル多項式を用いてレザバーの一種の記憶容量と非線形性の度合いを数値化する手法が提案されており(Dambre 他, Scientific Reports, 2012)、この手法を応用ならびに発展させることでシステムの計算能力を定量的に評価する。ここでは、メモリータスクと非線形タスクの分離を明確にするため、Boolean演算の一般的な能力を評価する新たな手法も導入する。

#### 4. 研究成果

当初は SNA を示す系を中心として、様々な力学系のレザバーとしての能力を多面的に評価することから研究を行った。また、望ましい結合ネットワークの構造は何か？情報理論的な視点も絡め、記憶課題や非線形性の強い課題などに対しての能力を検証した。以上の検証の過程で、必ずしも SNA 近傍だけで無く、時間遅れを含む力学系や、SNA 近傍のパラメータが分布した複数の力学系をレザバーとして考えることでも、計算能力を高める可能性があることが判明した。また、時間発展に伴う力学系の状態変数の情報の保持を最大化することで、時間的な意味での記憶容量が増加することも示された。特に、ある入力の情報に力学系が時間的にどれだけ保持しているかの指標、すなわち過去と現在の力学系の状態変数の相互情報量を最大化することで、レザバーとしての性能が向上することも判明した。そこで、指導原理としてリカレント相互情報量最大化を用いて、予め力学系の相互作用のネットワーク構造を構築してレザバーとして活用する方策の検討を行った。

結果の1例を右図に示す。図Aは学習中の相互情報量の値の変化であり、横軸は入力多重度  $K$  (入力の影響力の強さの指標) において、学習が進むにつれて相互情報量が増加する。図Bは学習後の性能指標であり、短期記憶課題は  $K=5$  付近で最も向上している。非線形演算課題も同様に上昇している。図C



は学習後のネットワーク構造を示してある(荷重の絶対値が大きいものから50個の結合を示す)。図Dは  $K=5$  における学習前(灰)、学主語(青および赤)での各ルールのブール演算課題の結果である。青が線形分離可能、赤の丸が線形分離不可能なルールを示す。性能の高い  $K=5$  の場合は入力からレザバーへの強い結合とレザバー内の結合が共存しており、入力を起点とした delay-line 構造が現れている。この delay-line 構造は、入力に依存して情報を長時間蓄えるのに望ましい構造であり、短期記憶をよく保持することが報告されている。我々の以前の研究でも、ネットワーク内の情報の保持効率を高めるとこのような delay-line 的な構造が増えることがわかっている。Delay-line 構造があれば、どのニューロンが発火しているかを見れば入力が与えられてからどれだけの時間が経過したかがわかる。しかし、あるニューロンが自分自身を興奮させる構造を持っていると、そのニューロンが発火しているという情報だけでは入力がいつ入ってきたのかわからない。これが入力から出発する delay-line 構造が出現する理由である。一方、入力の影響力が弱すぎる  $K=1$  では入力とレザバー間の強い結合が無く、入力依存の応答が難しい事を示している。つまり、入力とレザバーの相互情報量は小さいままで、レザバー内部の相互情報量だけが大きくなっていることがわかる。また、入力の影響が強すぎる  $K=30$  では、入力とレザバーの相互情報量は大きくなるものの、レザバー内部はほとんど入力の情報に支配され、結果として計算能力が低下していることが推察される。

実際の詳しい解析によると、情報の保持を最大化すると、過去の状態を記憶することが必要な課題に対しては、能力が増大するが、非線形性の強い課題の能力は必ずしも増大しない。ブーリアン関数を用いた計算結果によれば、非線形性の強い課題の学習は、必ずしも情報量最大化では向上しなかった。しかしながら、edge of chaos の他には特定のタスクによらないレザバー計算機のための力学系構築の指導原理は無かったが、リカレント相互情報量最大化も指導原理と成り得る点を示せた点は一定の成果である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計29件（うち査読付論文 29件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Ota Kaiichiro, Aihara Ikkyu, Aoyagi Toshio	4. 巻 7
2. 論文標題 Interaction mechanisms quantified from dynamical features of frog choruses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Royal Society Open Science	6. 最初と最後の頁 191693 ~ 191693
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsos.191693	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 Tanaka Takuma, Nakajima Kohei, Aoyagi Toshio	4. 巻 S0168-0102(20)
2. 論文標題 Effect of recurrent infomax on the information processing capability of input-driven recurrent neural networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Neuroscience Research	6. 最初と最後の頁 30082-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neures.2020.02.001	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 Onojima Takayuki, Goto Takahiro, Mizuhara Hiroaki, Aoyagi Toshio	4. 巻 14
2. 論文標題 A dynamical systems approach for estimating phase interactions between rhythms of different frequencies from experimental data	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PLOS Computational Biology	6. 最初と最後の頁 e1005928
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pcbi.1005928	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 Suzuki Kento, Aoyagi Toshio, Kitano Katsunori	4. 巻 11
2. 論文標題 Bayesian Estimation of Phase Dynamics Based on Partially Sampled Spikes Generated by Realistic Model Neurons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers in Computational Neuroscience	6. 最初と最後の頁 116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fncom.2017.00116	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 中嶋 浩平、田中 琢真、青柳 富誌生	4. 巻 Vol. 74, No. 5
2. 論文標題 ダイナミクスによる情報処理 レザパー計算の最近の発展	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 -
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 伊藤 浩之、青柳 富誌生	4. 巻 33(4)
2. 論文標題 非線形物理学から見たニューラルネットワークの学習 (特集 物理学とAI)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 人工知能 : 人工知能学会誌	6. 最初と最後の頁 403-411
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. Nakajima, K. Fujii, M. Negoro, K. Mitarai, M. Kitagawa	4. 巻 11
2. 論文標題 Boosting computational power through spatial multiplexing in quantum reservoir computing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 34021
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. Nakajima, T. Haruna	4. 巻 21
2. 論文標題 Spatiotemporal dynamics driven by the maximization of local information transfer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 13034
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 S. Tsunegi, T. Taniguchi, S. Miwa, K. Nakajima, K. Yakushiji, A. Fukushima, S. Yuasa, H. Kubota	4. 巻 57
2. 論文標題 Evaluation of memory capacity of spin torque oscillator for recurrent neural networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 120307
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. Furuta, K. Fujii, K. Nakajima, S. Tsunegi, H. Kubota, Y. Suzuki, S. Miwa	4. 巻 10
2. 論文標題 Macromagnetic simulation for reservoir computing utilizing spin-dynamics in magnetic tunnel junctions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 34063
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. Haruna, K. Nakajima	4. 巻 20
2. 論文標題 Maximizing Local Information Transfer in Boolean Networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 83046
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 Torres Estefany, Nakajima Kohei, Godage Isuru S.	4. 巻 non
2. 論文標題 Information Processing Capability of Soft Continuum Arms	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)	6. 最初と最後の頁 441-447
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ROBOSOFT.2019.8722777	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 Y. Yamanaka, T. Yaguchi, K. Nakajima, H. Hauser	4. 巻 11141
2. 論文標題 Mass-Spring Damper Array as a Mechanical Medium for Computation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science: International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN2018), Springer, Cham.	6. 最初と最後の頁 781-794
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 T. Kubota, K. Nakajima, H. Takahashi	4. 巻 non
2. 論文標題 Information processing using a single Izhikevich neuron	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Artificial Life Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 550-557
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 中嶋浩平	4. 巻 33巻5号
2. 論文標題 やわらかい身体のダイナミクスに計算をアウトソースする	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 人工知能 (特集「自然界に見いだす数物構造を利用した知的情報処理」)	6. 最初と最後の頁 570-576
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 中嶋浩平、井上克馬、國吉康夫、Sophon SOMLOR、Tito Pradhono TOMO、Alexander SCHMITZ	4. 巻 102巻2号
2. 論文標題 柔らかいマテリアルの変形を用いた情報処理	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会誌 (小特集「リザパーコンピューティング」)	6. 最初と最後の頁 121-126
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 Suzuki Kento, Aoyagi Toshio, Kitano Katsunori	4. 巻 11
2. 論文標題 Bayesian Estimation of Phase Dynamics Based on Partially Sampled Spikes Generated by Realistic Model Neurons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers in Computational Neuroscience	6. 最初と最後の頁 116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fncom.2017.00116	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 Onojima Takayuki, Goto Takahiro, Mizuhara Hiroaki, Aoyagi Toshio	4. 巻 14
2. 論文標題 A dynamical systems approach for estimating phase interactions between rhythms of different frequencies from experimental data	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PLOS Computational Biology	6. 最初と最後の頁 1005928
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pcbi.1005928	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 Imai Takashi, Ota Kaiichiro, Aoyagi Toshio	4. 巻 86
2. 論文標題 Robust Measurements of Phase Response Curves Realized via Multicycle Weighted Spike-Triggered Averages	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 024009 ~ 024009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.024009	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 Terada Yu, Ito Keigo, Aoyagi Toshio, Yamaguchi Yoshiyuki Y	4. 巻 2017
2. 論文標題 Nonstandard transitions in the Kuramoto model: a role of asymmetry in natural frequency distributions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment	6. 最初と最後の頁 013403 ~ 013403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-5468/aa53f6	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 Takahashi Noi, Chawanya Tsuyoshi, Aizawa Yoji	4. 巻 87
2. 論文標題 Multi-affinity and Phase Sensitivity of Strange Nonchaotic Attractors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 024003 ~ 024003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.024003	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 Fujii Keisuke, Nakajima Kohei	4. 巻 8
2. 論文標題 Harnessing Disordered-Ensemble Quantum Dynamics for Machine Learning	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 24030
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.8.024030	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 Nakajima Kohei, Hauser Helmut, Li Tao, Pfeifer Rolf	4. 巻 5
2. 論文標題 Exploiting the Dynamics of Soft Materials for Machine Learning	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Soft Robotics	6. 最初と最後の頁 339 ~ 347
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1089/soro.2017.0075	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 Nakajima Kohei, Li Tao, Akashi Nozomi	4. 巻 non
2. 論文標題 Soft timer: Dynamic clock embedded in soft body	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Robotic Systems and Autonomous Platforms	6. 最初と最後の頁 181 ~ 196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/B978-0-08-102260-3.00008-1	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 該当する

1. 著者名 Takashi Imai, Kaiichiro Ota and Toshio Aoyagi,	4. 巻 86
2. 論文標題 Robust Measurements of Phase Response Curves Realized via Multicycle Weighted Spike-Triggered Averages	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 24009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.024009	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 Yu Terada, Keigo Ito, Toshio Aoyagi and Yoshiyuki Y. Yamaguchi	4. 巻 2017
2. 論文標題 Nonstandard transitions in the Kuramoto model: a role of asymmetry in natural frequency distributions,	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment: Theory and Experiment	6. 最初と最後の頁 13403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-5468/aa53f6	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 Yu Terada and Toshio Aoyagi	4. 巻 94
2. 論文標題 Dynamics of two populations of phase oscillators with different frequency distributions	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 e1004950
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.94.012213	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 Takashi Imai and Toshio Aoyagi	4. 巻 7
2. 論文標題 Improvement effect of measuring phase response curves by using multicycle data	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications	6. 最初と最後の頁 58-65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.7.58	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 Kohei Nakajima	4. 巻 2017
2. 論文標題 Muscular-Hydrostat Computers: Physical Reservoir Computing for Octopus-Inspired Soft Robots	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Brain Evolution by Design (Springer Japan)	6. 最初と最後の頁 403-414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-4-431-56469-0_18	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47件 (うち招待講演 17件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 荒井貴光, 矢ヶ崎怜, 國府寛司, 高橋淑子, 青柳富誌生
2. 発表標題 腸の蠕動運動に関わる細胞間のリズム相互作用解析
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 那須悠太, 合原一究, 武田龍, 青柳富誌生
2. 発表標題 カエルの合唱における相互作用の非自明な特徴
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青柳富誌生
2. 発表標題 力学系的視点からのリズムデータ解析, フォーラム「バイアスフリー・ライフ研究のススメ - 新興技術はいかに生命活動の真の姿を照らし出せるか? - 」
3. 学会等名 第42回日本分子生物学会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒井貴光, 青柳富誌生
2. 発表標題 カオスの遍歴時系列データのテンソル分解解析の試み
3. 学会等名 電子情報通信学会 複雑コミュニケーションサイエンス (CCS)研究会 2018年度第1回第1種研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 窪田修, 今井貴史, 青柳富誌生
2. 発表標題 平均振動数の著しく異なる振動子集団の結合系で見られる同期現象
3. 学会等名 電子情報通信学会 複雑コミュニケーションサイエンス (CCS)研究会 2018年度第1回第1種研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栴井啓貴, 今井貴史, 青柳富誌生
2. 発表標題 外力下におけるデータ駆動型位相縮約
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栴井啓貴
2. 発表標題 てんかん発作の特徴づけから予測の展望まで?Permutation-Information Theoretic Approach?
3. 学会等名 次世代脳プロジェクト冬のシンポジウム, 新学術領域研究「適応回路シフト」「身体性システム」「オシロロジー」「人工知能と脳科学」 「脳情報動態」5領域合同シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青柳富誌生
2. 発表標題 力学系的視点からの時系列データ解析-モデルベースとモデルフリーのアプローチ-
3. 学会等名 神戸大学極みプロジェクト「ホログラフィック技術による生命現象の4次元計測・操作の実現とその臨床利用」キックオフシンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 窪田修, 今井貴史, 青柳富誌生
2. 発表標題 平均振動数の異なる振動子集団の結合系でみられる同期現象の解析
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 栴井啓貴, 中嶋浩平, 青柳富誌生
2. 発表標題 Permutation分布に基づくコンセプトドリフトの検出
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀之内翔大, 合原一究, 青柳富誌生
2. 発表標題 位相振動子モデルに基づいたカエルの鳴き声の相互作用の解析と統計的検証
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中嶋浩平
2. 発表標題 Reservoir Computingの展開
3. 学会等名 RIMS共同研究「統計的モデリングと予測理論のための統合的数理研究と実践」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Nakajima, K. Inoue, Y. Kuniyoshi, S. Somlor, T. P. Tomo, A. Schmitz
2. 発表標題 Soft Keyboard: A Novel User Interface for Soft Devices
3. 学会等名 Special Session "Laser Dynamics and Complex Photonics 3: Reservoir Computing Session" in The 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Inoue, K. Nakajima, Y. Kuniyoshi
2. 発表標題 A Recipe for Designing Chaotic Itinerancy: Innate Training Approach
3. 学会等名 Special Session "Non-Algorithmic Computing by Complex Systems Session" in The 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中嶋浩平
2. 発表標題 Reservoir Computingの展開
3. 学会等名 IBISML/PRMU/CVIM合同研究会にて招待講演 (FIT2018と同時開催) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中嶋浩平, 春名太一
2. 発表標題 Spatiotemporal dynamics driven by maximization of local information transfer
3. 学会等名 日本生物物理学会第56回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 春名太一, 中嶋浩平
2. 発表標題 Maximizing Local Information Transfer in Boolean Networks
3. 学会等名 日本生物物理学会第56回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Nakajima
2. 発表標題 Soft Interfaces: Linking Morphological Dynamics and Information Processing
3. 学会等名 IROS 2018 Workshop on Controlling Soft Robots: Model-based vs. Model-free Approaches (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Nakajima
2. 発表標題 Physical Reservoir Computing for Soft Robots
3. 学会等名 IROS 2018 Workshop on Soft Robotic Modeling and Control: Bringing Together Articulated Soft Robots and Soft-Bodied Robots (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中嶋浩平
2. 発表標題 やわらかいマテリアルを用いた機械学習法：Reservoir Computingの展開
3. 学会等名 ものづくり企業に役立つ応用数理手法の研究会（第26回技術セミナー）（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 茶碗谷毅，高橋野以
2. 発表標題 準周期外力系におけるSNAの「形」について
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋野以，津川暁，茶碗谷毅
2. 発表標題 弱い一般化同期を特徴づける不安定周期軌道の解析
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 荒井貴光，青柳富誌生
2. 発表標題 カオス遍歴時系列データの主成分分析
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今井貴史, 柘井啓貴, 青柳富誌生
2. 発表標題 振動子間結合の推定を介した位相データの正規化手法
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柘井啓貴, 今井貴史, 青柳富誌生
2. 発表標題 時系列データを用いた位相応答曲線のベイズ推定について
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 窪田修, 今井貴史, 青柳富誌生
2. 発表標題 位相振動子モデルに基づいたカエルの鳴き声の相互作用の解析
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 窪田修, 今井貴史, 青柳富誌生
2. 発表標題 位相振幅同期を呈するシンプルモデルのノイズ下での挙動
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栴井啓貴, 青柳富誌生
2. 発表標題 振動子系における相互作用の有無が位相応答曲線の推定に与える影響について
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 窪田修, 今井貴史, 青柳富誌生
2. 発表標題 平均振動数の異なる振動子集団の結合系で見られる間欠的な位相同期
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 akayuki Onojima, Takahiro Goto, Hiroaki Mizuhara and Toshio Aoyagi
2. 発表標題 Estimation of phase coupling functions for cross-frequency synchronization in the EEG data
3. 学会等名 The 40th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 茶碗谷毅, 高橋野似, 酒井貴郁
2. 発表標題 準周期外力複素2次写像系の分岐と basin 構造
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tsuyoshi Chawanya
2. 発表標題 Two transition routes from stable torus to chaotic attractor:
3. 学会等名 ランダム力学系理論の総合的研究
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋野似、茶碗谷毅
2. 発表標題 オンオフ間欠性のスイッチングと非双極性の関係
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kohei Nakajima
2. 発表標題 Exploiting the dynamics of soft materials for machine learning
3. 学会等名 Workshop on Advanced Fabrication and Morphological Computation for Soft Robotics (in IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2017, Singapore) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中嶋浩平
2. 発表標題 Physical reservoir computing for soft robots
3. 学会等名 SIG-Soft Robotics研究会(中央大学後楽園キャンパス) (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中嶋浩平
2. 発表標題 Physical Reservoir Computingと力学系の記憶容量について
3. 学会等名 Perspectives in random and non-autonomous dynamical systems (Department of Mathematics (Room 127), Kyoto University) (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中嶋浩平, 藤井啓祐, 根来誠
2. 発表標題 量子レザバー計算のための空間多重化法の提案
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会(岩手大学)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中嶋浩平
2. 発表標題 Physical reservoir computingの展開：タコ足計算機から流体計算機まで
3. 学会等名 第16回情報科学技術フォーラム FIT2017展示会(東京大学本郷キャンパス2号館2階フォーラム)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kohei Nakajima
2. 発表標題 Permutation entropy and transcripts in epileptic seizure time-series data
3. 学会等名 Advanced ECoG/EEG Analysis in Epilepsy (Post-Congress in the 51st Annual Congress of the Japan Epilepsy Society) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中嶋浩平
2. 発表標題 Physical reservoir computingの数理
3. 学会等名 第8回横幹連合コンファレンス(オーガナイズド・セッション:マイクロとマクロをつなぐ社会的知能・合理性)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中嶋浩平
2. 発表標題 Physical reservoir computing
3. 学会等名 マテリアル知能ワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栴井啓貴, 中嶋浩平, 北城主一, 青柳富誌生
2. 発表標題 神経系としての結合系における情報流の推定
3. 学会等名 日本物理学会 2017年春季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小山和輝, 後藤貴宏, 青柳富誌生
2. 発表標題 Adaptive Group Lassoを用いたリズム間の相互作用の推定
3. 学会等名 日本物理学会 2017年春季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 荒井貴光, 青柳富誌生,
2. 発表標題 二部グラフ構造を持つ位相振動子型連想記憶モデル
3. 学会等名 日本物理学会 2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中嶋浩平
2. 発表標題 Physical reservoir computing for soft robots
3. 学会等名 第62回SIGMBI: 分子ロボティクスとマテリアルインテリジェンス (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中嶋浩平
2. 発表標題 Exploiting the dynamics of soft materials for machine learning
3. 学会等名 The 64th Japan Society of Applied Physics (JSAP) Spring Meeting (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 茶碗谷毅, 酒井貴郁
2. 発表標題 多重周期外力系における分岐構造の外力振動数比への依存性について
3. 学会等名 日本物理学会 2017年春季大会
4. 発表年 2017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
研究 分担者	中嶋 浩平  (Nakajima Kohei)  (10740251)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任准教授   (12601)	
研究 分担者	茶碗谷 毅  (Chawanya Tsuyoshi)  (80294148)	大阪大学・情報科学研究科・准教授   (14401)	