様　式　C－19、F－19－1、Z－19　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　元 年　６ 月 21 日現在

機関番号：２０１０３
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2016～2018
課題番号：１６Ｋ００２４６

研究課題名（和文）高次元非線形ダイナミクスを用いた新しい音声情報処理機構の構築

研究課題名（英文）Construction of a new mechanism of auditory information processing using high-dimensional nonlinear dynamics

研究代表者

香取　勇一（Katori, Yuichi）

公立はこだて未来大学・システム情報科学部・准教授

研究者番号：２０５５７６０７

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,500,000円

研究成果の概要（和文）：多数の非線形素子の結合系で生じる複雑な運動を用いて様々な情報処理を行うレザバー計算の枠組みを基に，聴覚データを想定した多次元時系列データに適用可能なモデリング原理の確立に取り組んだ．レザバー計算と予測符号化を組み合わせた動的予測符号化のネットワークモデルについては階層的なネットワークに拡張した．音響データを用いて，その性能評価を行い，音響時系列データの階層的な構造を抽出することに成功した．研究の過程で，音声・音響だけではなく様々な対象に応用できることを見いだし，研究を多面的に発展させた．視覚系の情報処理モデル，多変量時系列データの解析，ロボット制御など様々な応用研究に発展させることができた．

研究成果の学術的意義や社会的意義
本研究は高次元の非線形力学系で生じる複雑なダイナミクスを積極的に活用することで，新しい情報処理の仕組みを構築する試みである．本研究の成果は，音声・音響だけでなく視覚的な情報，各種センサー情報処理，ロボット制御などを含む，新しい脳型人工知能など工学的な応用に結びつくことが強く期待される．また非線形素子の結合系ともみなせる生体の脳・神経ネットワークの情報処理機構の理解を通して，生理学・医学の発展に結びつくことが期待できる．

研究成果の概要（英文）：We conducted on establishing a modeling principle applicable to multidimensional time-series data assuming auditory data based on the framework of reservoir computing that performs various information processing using complex motion that occurs in a coupled system of many nonlinear elements. The network model based on reservoir computing and predictive coding is extended to a hierarchical network. We evaluated the performance of the proposed model using acoustic data and succeeded in extracting the hierarchical structure of acoustic time series data. In the process of research, we found that it could be applied not only to speech and sound but also to various objects and developed research in multiple ways. It could be developed into various applied research such as a model of the visual system, analysis of multivariate time series data, and robot control.

研究分野：非線形ダイナミクス、脳型人工知能

キーワード：非線形ダイナミクス　脳型人工知能　リザバー計算　時系列解析

１．研究開始当初の背景

研究代表者は非線形システム解析の手法を用いて，脳・神経ネットワークの数理モデリングや非線形ダイナミクスの工学応用について研究してきた.本研究課題の核であるリザバー計算は,非線形ダイナミクスを利用して時系列データをモデリングする機械学習の手法であり，例えば非線形性を持つ再帰結合型ニューラルネットワークにおいて，与えられた時系列データを再現するようにネットワークのパラメータを設定（学習）することが出来る. 以上の研究を踏まえ，リザバー計算とスパースモデリングを組み合わせ，様々な時系列データのモデリング・解析に活用するという着想に至った.

２．研究の目的

下記を研究目的として設定したうえで研究を実施した.（１）リザバー計算（相互結合した多数の非線形素子の複雑な運動を用いて，多様な時系列データを学習・モデリングする機械学習の手法）と予測符号化やスパースモデリングを組み合わせ，多次元時系列データに適用可能なモデリング原理を確立する.（２）提案手法の核である非線形ダイナミクスの特性を拡張・解析する.（３）提案手法を音響データやその他の多次元時系列データに適用し，その有効性を確認し新しい多次元時系列データの解析手法を構築する.

３．研究の方法

上記の研究目的を達成するため，下記のテーマを中心に研究を実施した.（１）モデリングの基本原理を確立するため,その核にあたるダイナミカル･リザバーの動力学特性の解析を行った.また予測符号化とレザバー計算を組み合わせたネットワークを構築した.（２）モデリング原理を拡張するため，振動子ベースのネットワークモデルや，超立方体上の疑似ビリヤード系ダイナミクスに基づくレザバーの構築・評価を行った．さらにネットワークの構造・特性を拡張するため，階層化ネットワークを機構しその性能評価を実施した.（３）音声や生体時系列の実データを用いてモデリング手法の検証・評価を行った.

４．研究成果

（１）レザバー計算と予測符号化を組み合わせたネットワークモデル[3]

本研究の核であるリザバー計算は,非線形ダイナミクスを利用して時系列データをモデリングする機械学習の手法である.非線形性を持つ再帰結合型ニューラルネットワークにおいて,与えられた時系列データを再現するようにネットワークのパラメータを設定（学習）することが出来る.本研究では、高次元非線形ダイナミクスを応用するリザバー計算に関連する研究として、予測符号化とリザバー計算を組み合わせたモデルを構築した（図１）．特に予測誤差に基づきリザバーを駆動させる機構により、様々な時系列の生成・予測に応用できることを示した.

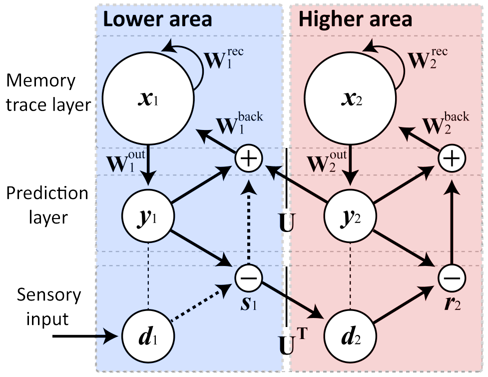

図１：予測符号化とリザバー計算に基づく２階層のネットワークモデル

（２）階層的かつ動的な予測符号化モデルによる音楽情報処理

音楽の階層的な構造を捉え，それを用いて音楽情報を生成するモデルを提案した．音楽はフレーズや和音などの階層的な構造を持ち，人間はこれを用いた作曲活動を行っている．本研究では脳の予測符号化の理論を基に音楽情報生成モデルを構築する．脳は高次の領域で外界の刺激の記号化を行っており，さらに高次の領域から低次の領域に記号化した情報をフィードバックし，外界の刺激の再構成を行っていることが知られている．先行研究で提案されている動的な予測符号化モデルを階層化することで，聴覚系の予測符号化モデルを構築した．階層化するにあたって低次のネットワークと高次のネットワークの結合部分に非負値行列因子分解を用いることで，外界の刺激をスパー

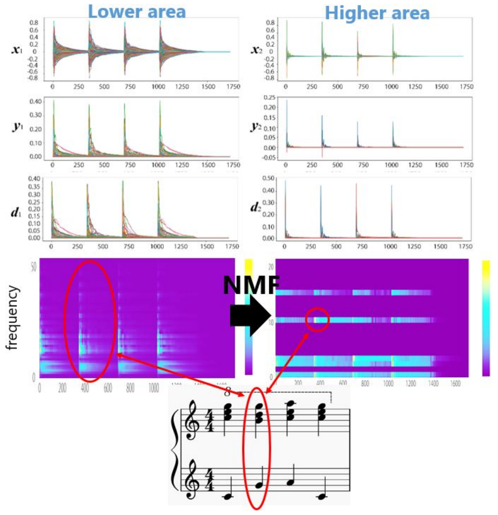

図 2:階層ネットワークモデルによる音響データのモデリング

スな時系列の表現に変換した．音楽のパワースペクトルの再構成を行う実験を行うことで，提案モデルの性能を調査した．結果として入力信号の特徴を捉え，入力信号の再構成に成功している．また，このモデルに音楽のパワースペクトルを入力して，音楽情報の生成を行った．フレーズの長期的な時間相関を捉えた上で，データ生成を行っていることが確認された（図２）．（学会発表[5]で予備的な結果を報告し、別途論文投稿の準備を進めている）

（３）結合 Stuart-Landau 振動子系を組み合わせたリザバー計算モデル

リザバー計算の実現方法として良く用いられる Echo state network (ESN) では音声波形や脳波信号のような複雑な時系列の予測が困難であることが明らかになっている．また自然現象・工学システムのいたるところで振動現象が見られる．そこで複雑な時系列を予測するために，ダイナミクスに振動性を加えたレザバー計算モデルを提案した．このモデルは，ダイナミクスに振動性を加えるため，中間層のニューロンを Stuart-Landau 振動子に変更している．本研究では，提案したモデルと ESN との予測精度の比較実験を行い、性能のパラメータの依存性を明らかにした．（学会発表[3]で予備的な結果を報告し、別途論文投稿の準備を進めている）

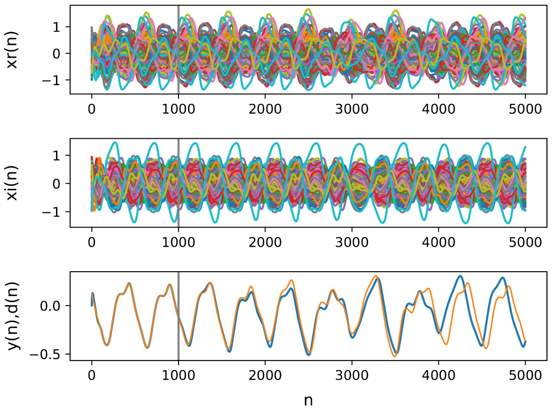

図 3：Stuart-Landou 振動子を用いたリザバー計算モデルによる時系列予測

（４）予測符号化とリザバー計算による文脈依存処理[2]

予測符号化は、生体内部の視覚のモデルとして広く受け入れられている仮説である． リザバー計算に基づく予測符号化(PCRC)モデルを用いた動的予測符号化が提案されているが、それらがどのように機能するかは明らかにされていない． 本研究では、簡単な PCRC ネットワークを構築し、その基礎となる非線形ダイナミクスを解析した． 文脈の影響は視覚的知覚に対するもう一つの重要な要素であるので、本研究では、文脈依存タスクのための PCRC ネットワークを構築し、各文脈のアトラクタ・ランドスケープの構造を明らかにした．

（５）リザバー計算を用いた効率的な時系列データの符号化と脳活動データの計測・解析

リザバー計算を用いた効率的な多次元時系列データの符号化方法を提案した．音響信号，脳波などの時系列データは，一つの観測点に対して複数の観測値が計測され，多次元時系列データとして得られる．そのため，空間に紐づいたデータから空間的な特徴を取り出す研究が広く行われている．聴覚信号をカーネル関数の足し合わせを用いて符号化するアルゴリズムを提案されている．しかし，空間的特徴・時間的特徴の両方に基づく効率的な符号化手法には研究の余地がある．本研究では，与えられた多次元時系列データを，リザバー計算を用いて動的に生成したカーネル関数を用いてスパイクへの符号化を試みた.比較的単純な時系列データを用いて，提案モデルの性能評価を行い、与えられた多次元時系列データをスパイク列に符号化できることを示した．上記の多次元時系列データ解析手法を、脳活動（脳波）データの解析に適用して解析を進めている．認知課題を用いて頭皮脳波計（計 14 名）を行い、脳波データを得た．提案手法を用いて脳波データを解析し、瞬きなど特徴的な応答をする箇所を抽出することに成功した．（学会発表[4]で予備的な結果を報告し、脳波解析についての論文を投稿中である）

（６）超立方体上の疑似ビリヤード系ダイナミクスを用いたリザバー計算[1]

リザバー計算は、単純な学習則と、疎でランダムに接続された多数の非線形ユニットを用いてリカレントニューラルネットワークを構築するためのフレームワークであり、ネットワークは時系列の生成や予測を含む多くのタスクに使用できる複雑な動きを生成する．本研究では高次元超立方体上で複雑な運動をする擬似ビリヤードシステムのダイナミクスに基づいてリザバーを構築した．本研究で提案するモデルは、効率的なハードウェア実装が期待される．時系列生成タスクについて提案モデルを評価し、そのモデルが広範囲のパラメータ値に対して適切に機能することを示した．このアプローチは、時間領域情報処理のための新しいメカニズムと人工知能システムのような脳のための基礎技術を与える．

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 8 件）

[1] Yuichi Katori, Hakaru Tamukoh, and Takashi Morie, “Reservoir Computing Based on Dynamics of Pseudo-Billiard System in Hypercube”, 2019 International Joint Conference on Neural Network (IJCNN2019), 査読有,(accepted).

[2] Hiroto Tamura, Yuichi Katori, and Kazuyuki Aihara, “Possible Mechanism of Internal Visual Perception: Context-dependent Processing by Predictive Coding and Reservoir Computing Network,” Journal of Robotics, Networking and Artificial Life, 査読有, (in press).

[3] Yuichi.Katori, “Network Model for Dynamics of Perception with Reservoir Computing and Predictive Coding,” Advances in Cognitive Neurodynamics (VI),査読有, Chapter 11, 2018, pp.89-95. Springer Nature Singapore Pte Ltd., ISBN 978-981-10-8853-7.
doi: 10.1007/978-981-10-8854-4.

[4] Muyuan Xu, Yuichi Katori, Kazuyuki Aihara, ”Stability Analysis on Sparsely Encoded Associative Memory with Short-Term Synaptic Dynamics,” International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 27, No. 10, 査読有, 2017, 1730034 (18 pages).
doi:/10.1142/S0218127417300348

[5] Takumi Sase, Yuichi Katori, Motomasa Komuro, and Kazuyuki Aihara, “Bifurcation Analysis on Phase-Amplitude Cross Frequency Coupling in Neural Networks with Dynamic Synapses,” Frontiers Computational Neuroscience, 査読有, Vol.11, Article No.1830, pp.1-19, 2017.
http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fncom.2017.00018/full

[6] Muyuan Xu, Yuichi Katori, Takashi Kohno, Kazuyuki Aihara, “External Input-Facilitated Onset of Chaos in Recurrent Neural Networks,” The 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, 査読有, 2016, pp.206-209.

[7] Miwa Fukino, Yuichi Katori, Kazuyuki Aihara, ”A Computational Model for Pitch Pattern Perception with the Echo State Network,” The 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and its Application, 査読有, 2016, pp.271-274.

[8] Yuichi Katori, “Encoding Multi-Dimensional Time Series Data with Reservoir Computing”, 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, 査読有, 2016, pp.275-278.

〔学会発表〕（計 5 件）

[1] Hiroto Tamura, Yuichi Katori, and Kazuyuki Aihara, “Possible Mechanism of Internal Visual Perception Context- dependent Processing by Predictive Coding and Reservoir Computing Network”, The 2019 International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB2019), 2019.

[2] Kanata Ara and Yuichi Katori, “Hierarchical Network Model of Auditory Information Processing using Dynamical Predictive Coding and Non-negative Matrix Factorization”, The 28th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society, 2018,
（日本神経回路学会 大会奨励賞受賞）.

[3] Shoya Nakajima and Yuichi Katori, “Reservoir Computing with Coupled Stuart-Landau Oscillators,” The 28th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society, 2018.

[4] Masumi Kaneko and Yuichi Katori, “Efficient Encoding of Multi-dimensional Time Series Data with Reservoir Computing”, The 28th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society, 2018.

[5] Kanata Ara and Yuichi Katori, "Hierarchical network model of auditory information processing using dynamical predictive coding," Proceedings of The Twenty-Third International Symposium on Artificial Life and Robotics 2018 (AROB), 2018.

〔図書〕（計　　件）

〔産業財産権〕
○出願状況（計　　件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況（計　　件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

６．研究組織

(1)研究分担者
研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：
研究者番号（8 桁）：

(2)研究協力者
研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。