

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2020～2022  
課題番号：20K11987  
研究課題名(和文) 自発的な内部ダイナミクスを利用する柔軟で効率的な時系列学習アルゴリズムの実現  
  
研究課題名(英文) Efficient algorithm for sequential learning utilizing spontaneous internal activity  
  
研究代表者  
寺前 順之介 (Teramae, Junnosuke)  
  
京都大学・情報学研究科・准教授  
  
研究者番号：50384722  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：我々ヒトを含む動物の脳内では、スパイク発火により情報を表現するニューロンと、ニューロン間での情報伝達を実現し、記憶や学習の実体であると考えられているシナプスの両方が、確率的な自発的な内部ダイナミクスを示し続けていることが実験的に報告されている。しかし、これらの確率性が、脳の学習や情報処理、特に、時間情報の記憶や学習をどう実現し得るのかは未解明だった。本研究課題では、実験と理論の共同研究によってこの問題に取り組み、海馬記憶痕跡細胞の特性を機械学習の手法を援用して解析によって明らかにしたほか、ニューロンとシナプスの確率性によって時系列学習を実現する新たなニューラルネットワークの提案にも成功した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

我々の脳は、現在研究されている機械学習や人工知能に比べて格段に低消費電力で効率的に動作することが知られており、このような効率的な学習の実現には、脳のニューロンやシナプスが持つ特性を活かした新たな学習アルゴリズムが必要だと考えられてきた。本研究成果として得られた学習アルゴリズムは、脳のニューロンやシナプスのように、素子が持つ固有の確率性を活かして学習を実現するものであり、確率的動作が正確な学習を実現可能であることを示した点で高い学術的意義を持ち、同時に、今後、このアルゴリズムの実装を進めていくことで、脳型の、超低消費電力で動作する機械学習の実現に繋がりが得るといった高い社会的意義を持つ。

研究成果の概要(英文)：Recent biological experiments have reported that both neurons and synapses in the brain are stochastic. They continue to show seemingly random internal dynamics even during the animal's realization of precise and reliable responses and learnings. It has been a long-lasting question of why these random dynamics allow us reliable learnings. In this project, combining experimental and theoretical approaches, we tackled the problem. We revealed characteristic features of engram cells in the hippocampus by introducing a method that has been developed in the context of machine learning. Also, we succeeded in proposing a novel learning algorithm, named dual-sampling neural network, in which fully stochastic dynamics of neurons and synapses realize reliable learning. Numerical simulation of the network showed that the learning algorithm could reproduce various experimentally reported features of the cortical circuit.

研究分野：理論神経科学、非線形物理学

キーワード：脳 学習 確率 海馬 記憶 ゆらぎ ノイズ ニューラルネットワーク

## 1. 研究開始当初の背景

近年、ディープラーニングなど、脳の構造を部分的に取り入れた機械学習が画像認識などの幅広い分野に置いて、我々ヒトを凌駕する高い性能を示し始めた。これらの機械学習のほとんどでは、入力層から出力層まで一方向的に情報が伝播するフィードフォワード型のニューラルネットワークが用いられてきたが、一方で、我々ヒトを含む動物の脳の結合のほとんどは、入力から出力に向かう結合ではなく、反対に高次領野から低次領野へ向かう結合、あるいは同一領野内での結合などの「再帰的結合」であることが知られている。このため、脳のネットワークはフィードフォワードネットワークよりは、リカレントニューラルネットワークとして良く記述されると考えられてきた。

リカレントニューラルネットワークでは、ある時刻でのネットワークの内部状態や出力が、再帰的結合を介して次時刻の状態に影響する。これは特に時系列学習には重要な可能性が高いと考えられており、さらにこのような再帰的な情報伝達には、自発的な「内部ダイナミクス」を示し得るといふ大きな特徴がある。例えば脳内では、発生する神経活動のうち、消費エネルギー換算で90%もの活動がこの自発的な内部ダイナミクスであることが報告されていた。

多くの実験研究が、この自発的な内部ダイナミクスの脳内情報処理や学習における重要性を指摘してきたが、極めて高い確率性を持つ脳の内部ダイナミクスが、記憶や学習と具体的にどのように関連するのか、確率的内部ダイナミクスを利用する記憶や学習メカニズムとはどのようなものかは未解明に残されていた。

## 2. 研究の目的

そこで本研究課題では、実験と理論の共同研究により、脳の内的な自発ダイナミクスと記憶・学習の関係を解明し、生物が持つ柔軟で効率的な時系列学習の実体は何か？リカレントニューラルネットワークの確率的内部ダイナミクスを利用する時系列学習アルゴリズムの原理は何かという問いに答え、柔軟で効率的な新たな学習アルゴリズムを提案し、その特性を解明することを目的とした。

## 3. 研究の方法

まず、実験的研究においては、研究分担者が確立した文脈依存の条件付け課題を利用し、記憶獲得前後と記憶獲得行動実験中の海馬 CA1 の神経細胞の発火ダイナミクスを測定しそのデータ解析を行った。これは具体的には、海馬 CA1 の神経細胞に対して、発火活動の一過的な上昇をレポートするカルシウムインジケータを遺伝子改変によって発現させ、その蛍光をマウス頭部に設置した超軽量顕微鏡によって *in vivo* の自由行動下で継続的に測定するものであり、これにより数百個の CA1 ニューロンの発火活動を数日から数週間に渡って測定可能にするものである。

本研究では、cross validation 等の機械学習に関連する手法、同期指標、クラスタリング等を利用することで、薬理的に記憶痕跡細胞として同定された細胞群が、刺激提示以前から、記憶獲得、忘却、再記憶等の時間経過の中で、どのような特性を示すのかを調査した。

理論研究においては、ニューロンとシナプスのダイナミクスを確率的に扱い、学習をギブスサンプリングの一種として定式化することで研究代表者が提案した学習アルゴリズムを利用した。これは既存の誤差逆伝播法と異なり、リカレントネットワークに直接適用可能であり実験で観測された脳の多くの特性とも高い整合性を示すものである。このネットワークのダイナミクスを利用することで、記憶獲得や忘却と自発活動の関連を調査し、さらに、このようなネットワークにおいて、時間経過に伴って認知活動の自発的变化が発生するか？発生する場合はそこにどのような特徴があるのか等を調査した。

## 4. 研究成果

### (1) 記憶痕跡細胞の特徴的活動の同定

海馬 CA1 において記憶痕跡細胞としてラベリングされた細胞群とラベリングされなかった細胞群に対して、記憶獲得と想定される事象発生時を含む5日間の神経活動データ(具体的にはカルシウムイメージングデータ)をもとにラベリングの値を推定する機械学習課題を設定し、その推定に高い割合で寄与する神経活動を特定することで、記憶痕跡細胞となるために必要な神経活動を同定することを目指した研究を行った。ここでは具体的な推定手法として、各要因の寄与率が明確になりやすい random forest を用いることとし、推定の要素となる特徴量として、実験日、環境、刺激提示前後など異なる各実験セッションに対して、スパイクカウント、平均活動度などを利用した。その結果、記憶痕跡細胞ラベリングへの特徴量の寄与率が最も高い寄与率を同定することに成功した。

## (2)記憶痕跡細胞の同期特性の解明

上記項目と同様に海馬 CA1 記憶痕跡細胞に関して、記憶痕跡細胞群内およびそれ以外の細胞群内での神経活動の同期度合いの時間変化を解明する研究を行った。具体的には各実験セッションでの神経活動時系列間の相関係数を記憶痕跡細胞群、それ以外の細胞群に分けて測定し、更に両者の違いについて検定を行った。その結果、記憶獲得前から忘却、再記憶獲得までの各セッションについて、記憶痕跡細胞群とそれ以外の細胞群との間の同期指標の時間変化を同定でき、両者に顕著な違いがあることを発見できた。さらにこの相関に基づき細胞群のクラスタリング解析も行い、各クラスタの特性に関する調査も実施した。

## (3)確率的ニューラルネットワークにおける記憶忘却

通常のフィードフォワード型で動作するニューラルネットワークと異なり、脳のような確率的に動作するネットワークでは、内的なゆらぎに起因して記憶の忘却が起きると期待される。この記憶忘却の時間経過を調査するために、脳のようにニューロンとシナプスが確率的に動作することで学習や推定が実現するニューラルネットワーク (Dual Sampling Neural Network) を用いて、記憶忘却過程の数値シミュレーションを実施した。その結果、図に示すように、学習後の時間経過によって確かに記憶忘却とみなせる現象が発生すること、またその忘却過程が学習時の記憶獲得過程に比べて著しく長い時間スケールで実現することを発見した。

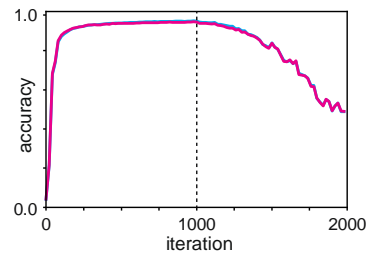


図 1：確率的ニューラルネットワークにおける記憶獲得および記憶忘却過程の時系列

## (4)確率的シナプスによる制限ボルツマンマシンの実現

脳内のニューロンとシナプスが示す確率的な内的ダイナミクスの効果を検討するために、シナプスの確率性を取り入れたボルツマンマシンを提案し、その特性の解析を行った。ボルツマンマシンは、与えられたデータのデータ分布を学習する確率モデルでありニューロンを確率的素子として扱うが、シナプス強度は決定論的に学習される。このモデルを拡張し、シナプスも確率的に動作する新たなボルツマンマシン (Synaptic Boltzmann Machine) を提案した。このモデルの学習過程を数値的に解析し、このマシンでは、結合強度のダイナミクスが非線形な挙動を示し、シナプスの役割分担と不要なシナプスの刈り込みが発生することを確認した。

## (5)多義図形入力に対する自発的知覚交代の実現

ネッカーキューブ錯視に代表されるような、同一の図形に対して複数の解釈が可能な図形を多義図形と呼ぶ。多義図形に関する顕著な特性の一つが、ヒトが多義図形を経時的に観察すると、視覚入力は同一であるにも関わらず、自発的な認知の交代現象が発生することである。このような自発的知覚交代は、出力が入力の関数として一意に定まる既存のフィードフォワード型ニューラルネットワークでは発生せず、また前述のボルツマンマシンのような一部に確率性を導入したネットワークでも通常は発生しないことから、何らかの脳内の内的な自発活動の反映として実現していると期待される。そこで確率的内部ダイナミクスと時間経過に伴う知覚交代との関係を理論的に検討するため、前述の Dual Sampling neural Network に対して、ネッカーキューブ画像を入力し、知覚交代が実現するかどうかを検討した。その結果、自発的知覚交代現象とみなせる現象が、学習の進展に伴って発生するという新たな知見を得ることに成功した。さらにその知覚交代間の継続時間分布が、実験的に報告されているのと近いガンマ分布でよく記述できることも発見した。

## (6)同期活動を実現する最小結合ネットワーク

リカレントネットワークで発生する代表的な非線形現象がリミットサイクル振動子の同期現象である。リミットサイクル振動子を記述するモデルとして位相振動子が  $\sin$  関数で結合した Kuramoto model が良く研究されているが、素子間の完全同期が大域安定状態になるためのネットワーク結合率に関する要件は未解明であった。これに対し整数計画法を利用することで、どんなネットワーク・トポロジーに対しても完全同期を大域安定にするネットワーク結合強度の下限を導出することに成功した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Teramae Jun-nosuke, Tsubo Yasuhiro	4. 巻 4
2. 論文標題 Dual sampling neural network: Learning without explicit optimization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 043051-1-20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.4.043051	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 寺前順之介	4. 巻 14
2. 論文標題 大脳皮質の確率的自発活動と疼痛の予測符号仮説	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本運動器疼痛学会誌	6. 最初と最後の頁 66-71
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 Yoneda Ryosuke, Tatsukawa Tsuyoshi, Teramae Jun-nosuke	4. 巻 31
2. 論文標題 The lower bound of the network connectivity guaranteeing in-phase synchronization	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 063124 - 063124
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0054271	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21件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Thomas Rodrigues Crespo, Jun-nosuke Teramae
2. 発表標題 Smoothed robustness analysis of classifiers
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 後藤裕也, 寺前順之介
2. 発表標題 サンプリング型ニューラルネットワークにおけるシナプス変動とエネルギー地形
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 立川剛至, 寺前順之介
2. 発表標題 情報論的解析に基づく大脳皮質のべき乗則コーディングの最適性
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 富田風太, 寺前順之介
2. 発表標題 Graded persistent activityを示すニューロンモデルによるリザーバー計算の理論解析
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐伯卓哉, 寺前順之介
2. 発表標題 樹状突起活動電位によって非線形応答を示す低次元ニューロンモデルの提案
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊大師, 寺前順之介
2. 発表標題 多義図形入力に対するサンプリング型ニューラルネットワークの時間応答
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林 暁吾、高島 魁斗、寺前 順之介、松尾 直毅
2. 発表標題 文脈依存的恐怖条件付け学習におけるマウス海馬CA1細胞のカルシウムイメージング
3. 学会等名 Neuro2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 富田風太, 寺前順之介
2. 発表標題 Graded persistent activity を示すニューロンモデルを用いた Reservoir computing
3. 学会等名 Neuro2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 富田風太, 寺前順之介
2. 発表標題 Graded persistent activityを示すニューロンモデルを用いたReservoir computing
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 寺前順之介
2. 発表標題 大脳皮質の自発活動とネットワーク特性
3. 学会等名 第14回日本運動器疼痛学会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山中宏太, 寺前順之介
2. 発表標題 変動閾値ニューロンモデルによるスパイクングニューラルネットワークの誤差逆伝播法
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本昌治, 寺前順之介
2. 発表標題 シナプスを確率変数とする制限付きボルツマンマシンの相転移
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本昌治, 寺前順之介
2. 発表標題 ニューロンとシナプスを確率変数とする制限付きボルツマンマシン
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山中宏太, 寺前順之介
2. 発表標題 膜電位のbackward modulationを利用するLIFニューロンの教師あり学習
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤裕也, 立川剛至, 寺前順之介
2. 発表標題 人工ニューラルネットワークにおけるべき則表現と学習則
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 立川剛至, 寺前順之介
2. 発表標題 べき乗則に従うニューラルネットワークの学習可能性と汎化性能
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 JUNNOSUKE TERAMAE
2. 発表標題 Dual stochasticity in the cortex as a biologically plausible learning with the most efficient coding
3. 学会等名 The 43rd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Kota Yamanaka, Jun-nosuke Teramae
2. 発表標題 A biologically plausible and effective learning algorithm for spiking neural networks
3. 学会等名 The 43rd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 KYOGO KOBAYASHI, Ren Takakura, Jun-nosuke Teramae, Naoki Matsuo
2. 発表標題 Calcium imaging of hippocampal CA1 engram cells during a contextual fear conditioning paradigm
3. 学会等名 The 43rd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kaito Takashima, Jun-nosuke Teramae, Naoki Matsuo, Kyogo Kobayashi, Ren Takakura
2. 発表標題 CA1 engram cells are characterized by activity reduction in a novel context during memory encoding
3. 学会等名 The 43rd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡田青空, 寺前順之介
2. 発表標題 ランダム時系列を利用する運動の教師あり学習
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
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
研究 分担 者	松尾 直毅  (Matsuo Naoki)  (10508956)	九州大学・理学研究院・教授    (17102)	

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