

令和 2 年 6 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00338

研究課題名(和文) 内的なゆらぎを駆動力とする効率的な学習システムの構築

研究課題名(英文) Efficient learning algorithm utilizing internal fluctuation of the brain

研究代表者

寺前 順之介 (Teramae, Jun-nosuke)

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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：海馬CA1領域の錐体細胞に関する覚醒行動下での自発活動データの解析を進めることで、記憶獲得前後および記憶消去前後を含む多様な文脈での神経細胞の活動の特徴を明らかにすることに成功した。またニューロンおよびシナプスの確率的な活動によって駆動され、生物学的妥当性の非常に高いと推定される新たなニューラルネットワークの構成法とその学習方法を発見することにも成功した。この学習方法によって獲得されたネットワーク構造や神経活動の特徴が、実際の神経系で観測された実験的知見の多くを統合的に説明することや、獲得された神経情報符号化が、可能な神経情報表現のうち最も効率性の高いものであること等も明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脳の神経細胞及びシナプス結合が示す持続的な確率的挙動に着目することで、ニューラルネットワークに対する脳型の新たな学習アルゴリズムの開発に成功した。このアルゴリズムは既存の学習アルゴリズムの様々な問題点を解決できることが示されており、さらに生物学的妥当性も極めて高いと考えられるため、脳型の人工知能チップや、ニューロモルフィックデバイスの開発などに有用であると期待されるほか、脳の基礎的な動作原理の解明として生命科学にも大きな波及効果を持つと期待される。

研究成果の概要(英文)：Analyzing simultaneous recordings of a large population of neurons in CA1 of awake animals before, during, and after acquisitions of episodic memories, we revealed various features of neural activities that presumably characterize engram neurons. We also succeeded in developing a biologically plausible learning algorithm of neural networks that utilizing stochastic behaviors of neurons and synapses in the cortical circuit. We found that the learning algorithm consistently accounts for various experimental findings of the brain, solves many known limitations of existing learning rules of neural networks, and provides the most efficient neural coding recently discovered in rodent cortical networks. Our results suggest that synapses and neurons in the cortex cooperatively implement the most efficient learning or stochastic computation.

研究分野：理論神経科学

キーワード：脳 自発活動 海馬 機械学習 人工知能 確率 シナプス可塑性 確率的情報処理

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。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

私たちの脳は、予測、推定、学習などの能力において、既存のコンピュータをはるかに上回る性能を示す。近年、ディープラーニングなどの、脳の構造をとりいれた機械学習が、画像認識などの幅広い分野において、ヒトに匹敵する高い性能を示し始めたが、学習に必要なデータ数、計算量、あるいはそれに伴うエネルギー消費などの効率性を考慮に入れると、その性能はまだ私たちの脳のレベルにまでには達していないことがわかっていった。例えば囲碁の世界チャンピオンに勝利した AlphaGo の消費電力は数十キロワットなのに対して、ヒトの脳はたかだか数ワットのエネルギーしか消費しない。

コンピュータと比較した、脳の動作の大きな特徴が「自発活動」である。通常のコンピュータは入力によってトリガーされて計算を開始するため、自発的に動作し続けることはない。ところが私たちの脳では、感覚器官から何の入力も入らず、運動系に何の出力も送っていない時、つまり脳が積極的に働く必要がないと思える時にも、神経細胞の自発的なスパイク発火活動が安定的に継続している。この自発活動の消費エネルギーは、脳全体の消費エネルギーの 90% にも達する。自発活動は、強いゆらぎを伴っていることから、しばしば「自発ゆらぎ (spontaneous fluctuation)」とも呼ばれており、ほぼランダムな活動に見えることから、神経活動の単なる背景ノイズではないかと思われたこともあった。しかし現在では、これほどの多くのエネルギーが割り当てられていること等から、自発活動は単なるノイズではなく、脳の情報処理において何らかの必要不可欠な重要な役割を果たしていると考えられている。実際、この考えに基づいて、自発活動の特性を探る研究が活発に進められ、ランダムに見える自発活動は、必ずしもランダムでなく低次元の構造を持つこと、入力の応答として得られる神経活動と高い相関を持つこと、自発活動のゆらぎが動物の覚醒状態や注意などに応じて動的に変化すること、時系列記憶の発火パターンと高い相関を持つことなど重要な知見が得られていた。また理論的側面からの研究も活発に進められており、ゆらぎを伴う自発活動によって、マルコフ連鎖モンテカルロ法のような高次元の確率分布からのサンプリングが可能になること、生成モデルの確率分布が脳のシナプス可塑性に近い学習則で実装できること、さらに、この仮説を実装した簡単な数理モデルによって、動物の応答と神経活動のゆらぎの相関が矛盾なく説明できることなど、脳が、自発ゆらぎを利用する事で、記憶、学習、予測などの確率的推定問題を効率良く解いている可能性を示唆する知見が得られていた。

2. 研究の目的

しかし本研究計画立案の時点では、学習の進展や記憶の獲得等に伴う自発活動の継続的な変化の詳細を捉える研究は、実験的にも理論的にも行われておらず、そのためにこれまで提案された理論研究のほとんどは、概念的な提案に留まり、実際の脳が実現する高い推定能力も効率性も未解明のままで、具体的に情報処理に応用できるレベルには達していなかった。そこで本研究計画は、実験と理論の両者を統合することで、神経情報処理における自発ゆらぎの特性と機能を詳細に明らかにし、内的なゆらぎを戦略的に利用する新しい効率的な情報処理の枠組みを具体的に構築することを目的とした。

具体的には学習や記憶の獲得にともなう脳の自発活動の変化を実験的に測定して、その解析から自発活動の変化が持つ特性を解明し、さらに、その知見を利用して、学習や自発活動を実現するニューラルネットワークモデルを作成することを目指した。具体的には、実験結果を指針とすることで、自発活動によってニューラルネットワークの結合がどのように変化すべきかを明らかにし、それを用いて、脳におけるゆらぎの適応的な制御原理を解明すること、また、具体的な神経ネットワークの構造が与えられた時に、パラメータ空間がどのようにサンプリングされるのかに着目することで、ゆらぎを調整して効率的なサンプリングを実現する新たな学習理論を提案することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究計画の目的を達成するために、研究代表者が データ解析、ゆらぎと学習のニューラルネットワークモデルの提案と作成、数値シミュレーション等を含む理論研究を担当し、研究分担者が 遺伝子導入、実験系構築、in vivo 長期間イメージング等の実験研究を担当する研究体制を取った。

まず研究分担者が、分担者が既に確立しているマウス海馬を対象とした条件付け実験を利用して、条件付け前、条件付け行動実験中、および条件付け後の海馬 CA1 の神経細胞の自発活動を測定した。具体的には、海馬 CA1 の神経細胞に対して、発火活動によって増加するカルシウム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、さらにその蛍光を in vivo の自由行動下で継続的に測定するために、超軽量の顕微鏡をマウス頭部に設置した。これによって多数の神経細胞の発火を、10Hz 以上の高時間分解能で、かつ数日に渡って、測定することが可能になった。この条件のもとで、条件付け、またその消去実験を行い、学習にともなう神経発火活動の長時間におよぶ変化を測定した。

研究代表者は、分担者が測定した神経活動データの解析を行い、記憶獲得にともなう発火活動変化の特徴付けを目指した。具体的には、場所依存的神経活動の存在の有無、記憶獲得前後を特徴づける集団神経活動の抽出、記憶獲得と記憶想起を特徴づける神経細胞集団とその活動の、機械学習手法の利用による抽出等を目指した解析を行った。

合わせて研究代表者は、持続的かつ確率的な神経活動によって安定的かつ効率的な記憶や学習を実現することで、生物学的に高い妥当性を持ち、かつ既存の機械学習の問題点を解決する新たなニューラルネットワークの学習アルゴリズムの探求とその動作原理の解明を行った。

4. 研究成果

(1) 記憶学習、想起、及び消去に関する行動実験中のマウスに対し、海馬 CA1 領域からの長期的な神経活動データ取得に成功し、最大で 600 以上の神経細胞からの 20Hz での同時記録に成功した。さらにこの神経活動の記録と同時に、行動測定として、ケージ内でのマウスの位置を 2Hz の時間分解能で記録することにも成功した。

(2) 記録された行動及び神経活動データのデータ解析を実行した。特に、マウスの新規環境への導入時、条件付け刺激提示直後、及び記憶想起時と想定される時間の 3 つの時間帯において、神経細胞の同期発火が増加する傾向にあること、場所細胞としての空間的な神経活動の局在は、必ずしも多くなく限定されたものである可能性が高いこと、神経細胞データから記憶草生地と想定される時間を有意に推定可能であること等を明らかにすることに成功した。特にについては、記憶想起中であると推定されるマウスの移動停止時刻を、神経活動データから Lasso 回帰によって推定する手法を利用した。この時、Lasso 回帰のパラメータの推定に用いた行動実験のセッションとは、異なる行動実験のセッションに対して、マウスの移動停止時刻を予測させることで、マウスの移動停止及び、その背景にある特徴的な神経活動が、条件付け刺激によって獲得された記憶の想起に起因するものかどうかを明らかにすることを試みた。その結果、マウスの移動停止自体の予測は、条件付け刺激時及びその前後でほぼ変化なく可能であるにも関わらず、セッションをまたぐ予測に関しては、条件付け刺激時やその前後で、異なる傾向を見せ、具体的には、条件付け後を学習データとして利用し、条件付け時の行動時系列を予測する際に、相対的に高い予測精度が得られることを発見した。この結果は、条件付け時に発生した特徴的な神経活動が記憶の痕跡の役割を果たし、その一部がその後のマウスの移動停止時にも活動しているが、時間経過とともに、その脳内表現が徐々に確率的に変化していると考えられることで整合的に解釈できるため、海馬での記憶の獲得とその痕跡としての神経活動の変化に関して合理的な説明を与え得ると考えられる。

(3) 脳内で持続的に観測される確率的な神経活動に基づく新たなニューラルネットワークの学習アルゴリズムの提案にも成功した。この研究では、脳内では神経細胞(ニューロン)だけではなく、神経細胞間の結合部位であるシナプスの挙動も確率的であることに着目した。既存研究では、ニューロンの確率的挙動とシナプスの確率的挙動のどちらも、何らかの確率的情報処理に関与している可能性が示唆されてきたが、両者の関係は不明であり、両者の共存にどのような機能的意味があるのかは未解明に残されていた。この研究では、ニューロンとシナプスの 2 つの確率的挙動が相乗的に働くことで、既存の機械学習アルゴリズムの多くの問題点を克服し、神経系の多くの実験事実を説明し、さらに頑健性と高次元性のバランスを取るという意味で最適な神経符号化を実現する学習アルゴリズムを形成可能なことを理論的に明らかにすることに成功した。

このアルゴリズムを導くために、まず、脳内で観測されている様々な実験事実に基づいてニューロンとシナプスの確率的挙動は、外部環境を反映する入力刺激や教師データが与えられた上での、脳内のニューロンやシナプスの状態を表す高次元の変数全体に対する条件付き確率分布からのサンプリングであるという仮説を導入した。この仮説に基づき、ベイズの定理やギブスサンプリングに関する数学的性質を利用して計算を進めることで、個々のニューロンやシナプスの確率的挙動が、他のニューロンやシナプスあるいはネットワークに提示されたデータ(外部入力)によってどのように変化するかを記述する確率的な発展法則を導出することに成功した。この確率的な発展法則は、脳内の実際のニューロンやシナプスの時間変化が持つ特徴の多くと合致しており、これがそのままの形でニューラルネットワークの学習を可能にすることを明らかにした。

既存の誤差逆伝播法等とは異なり、この学習則はネットワークを構成する各要素に対して、非同期かつ局所的に動作するため、学習の実現に対して、誤差信号のような大域的な情報の共有も、また順伝播と逆伝播の切り替えや層構造に沿った計算の実行などの細かい計算のスケジューリングが不要になるため、今後のニューロモルフィックデバイスや人工知能チップの開発など、ニューラルネットワークの学習則の物理実装において特に重要な役割を果たしていくと考えられる。

さらに、この学習則によって得られたネットワークが、与えられた入力データをどのような内部表現に変換しているかを調査したところ、内部表現の主成分分析の分散が、そのランクについて、-1 をわずかに下回る冪乗で減衰していることが明らかになった。この-1 をわずかに下回る冪乗則は、最近実際の脳内でも観測されており、冪指数が-1 を上回ると符号化の連続性が破れて情報表現の頑健性が低下して汎化性能が失われる一方、冪指数が-1 より小さい場合は、一部のニューロン活動にのみ情報が集中した非効率的な表現になっていることが分かっているため、この-1 乗をわずかに下回る神経符号化は、頑健性を保つ中で(言い換えると汎化性能を失わない中で)もっとも効率的な符号化が実現していると言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kada Hisashi, Teramae Jun-nosuke, Tokuda Isao T.	4. 巻 12
2. 論文標題 Highly Heterogeneous Excitatory Connections Require Less Amount of Noise to Sustain Firing Activities in Cortical Networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers in Computational Neuroscience	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fncom.2018.00104	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 Kass Robert E., Amari Shun-Ichi, Arai Kensuke, Brown Emery N., Diekman Casey O., Diesmann Markus, Doiron Brent, Eden Uri T., Fairhall Adrienne L., Fiddymant Grant M., Fukai Tomoki, Grøn Sonja, Harrison Matthew T., Helias Moritz, Nakahara Hiroyuki, Teramae Jun-nosuke, et.al	4. 巻 5
2. 論文標題 Computational Neuroscience: Mathematical and Statistical Perspectives	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Annual Review of Statistics and Its Application	6. 最初と最後の頁 183 ~ 214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1146/annurev-statistics-041715-033733	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

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Jun-nosuke Teramae
2. 発表標題 A Supervised Learning Rule as a Stabilization Mechanism of Arbitral Fixed Points of Hidden Neurons
3. 学会等名 The 28th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Thom_s Rodrigues Crespo, Jun-nosuke Teramae, Naoki Wakamiya
2. 発表標題 Noise Robustness and Generalization of Bayesian Neural Networks with Lognormal Synaptic Weights
3. 学会等名 The 28th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Tsuyoshi Tatsukawa, Jun-nosuke Teramae, Naoki Wakamiya
2 . 発表標題 Validity of the Flat Minima Approach to Understand Generalization of Deep Learning
3 . 学会等名 The 28th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Yutaro Murata, Jun-nosuke Teramae, Naoki Wakamiya
2 . 発表標題 Reinforcement Learning for Visual Attention with Scalable Size of Attentional Field
3 . 学会等名 The 28th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Futa Tomita, Jun-nosuke Teramae, Naoki Wakamiya
2 . 発表標題 Biologically Plausible Learning Method with Minimizing Gap of Local Energy in Asymmetric Neural Network
3 . 学会等名 The 28th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Hatanaka, J. Teramae, and N. Wakamiya
2 . 発表標題 Layer specificity of acquired memory duration in multilayer LSTM networks
3 . 学会等名 The 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Application (NOLTA 2017) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 村田悠太郎, 寺前順之介, 若宮直紀
2. 発表標題 再帰的な選択的注意モデルにおける注意領域サイズの強化学習
3. 学会等名 電子情報通信学会NC研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 富田風太, 寺前順之介, 若宮直紀
2. 発表標題 局所エネルギー差最小化による非対称結合下での学習アルゴリズム
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 寺前順之介, 若宮直紀
2. 発表標題 不動点化としての脳型の教師あり学習アルゴリズム
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 ニューラルネットワークの学習方法、ニューラルネットワークの生成方法、学習済装置、携帯端末装置、学習処理装置及びコンピュータプログラム	発明者 寺前順之介	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-064222	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

