

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K11974

研究課題名（和文）内側側頭葉－前頭前野のスパイクニューラルネットワークモデルに関する研究

研究課題名（英文）A study on a spiking neural network model of the medial temporal lobe-frontal cortex

研究代表者

立野 勝巳（Katsumi, Tateno）

九州工業大学・大学院生命体工学研究科・准教授

研究者番号：00346868

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）：内側側頭葉モデルとして、海馬と嗅内皮質のスパイクニューラルネットワーク（SNN）を作成し、その海馬からの出力を受けて行動選択をするSNNを結合した。提案SNNにいくつかの迷路課題を遂行する過程で、ドーパミン依存のスパイクタイミング依存性可塑性により、報酬に応じてシナプス結合が自己組織的に形成され、場所細胞の順方向リプレイが生じることを確認した。さらに、ニューロンモデルに順応特性を適用することで、逆方向リプレイや未経験経路のリプレイも確認した。また、嗅内皮質 海馬SNNにおいて、他者を含む観察T迷路課題も学習できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

迷路課題を学習する過程で、自己組織的に海馬ニューラルネットワーク内の場所細胞に経路の情報が蓄積されるという機構が提案でき、未経験の経路も生成できることが明らかになった点に学術的意義がある。未経験経路を示す一連の場所細胞の活動を海馬外のネットワークと接続し、脳内シミュレーションすることで、経験していなくても探索機能を強化することができるようになり工学的応用に意義がある。また、他者の場所表現を含めたネットワークの提案により、より社会性のある課題に対する応用も期待できる。GPUで並列計算する独自ライブラリの提案により、CUDAの専門知識がなくとも、容易に大規模なSNNが構築できるようになった。

研究成果の概要（英文）：As a medial temporal lobe model, we proposed a spiking neural network (SNN) of the hippocampus and entorhinal cortex, coupled with an SNN that makes action selection based on output from the hippocampus. While performing several maze tasks on the proposed SNN, we confirmed that synaptic connections were self-organized in response to rewards by dopamine-dependent spike-timing-dependent plasticity, resulting in forward replay of place cells. Furthermore, with the use of adaptation to neuronal models, we confirmed reverse replay and replay of inexperienced pathways. We also confirmed that an observational T-maze task using a pair of virtual rats could be learned in the entorhinal cortex-hippocampal SNN.

研究分野：計算論的神経科学

キーワード：海馬 嗅内皮質 スパイクニューラルネットワーク GPU

研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

内側側頭葉は海馬、嗅内皮質、嗅周皮質という脳領域を含み、エピソード記憶に関する脳領域である。この領域には、場所を表現する場所細胞や格子細胞、自分以外の個体や物の位置を表現する Social place cell などの存在が知られている。また、場所細胞に関連して位相歳差やリプレイといった特徴的な振る舞いを示すことについても報告されている。これらの特徴的な神経活動が統合されることでエピソード記憶が構成されると考えられるが、これらを含む神経回路の機能的結合についての検討は不十分である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、内側側頭葉モデルと前頭前野モデルを組み合わせ、仮想ラットが経験した空間情報を認知地図として蓄積し、行動計画に活用する仕組みを提案することである。そこで、海馬、嗅内皮質、嗅周皮質の電気生理学的知見に基づいてスパイクニューラルネットワーク (Spiking Neural Network, SNN) を作成し、嗅内皮質 海馬 SNN と行動選択 SNN を結合し、空間探索課題を通して、行動履歴の蓄積とそれに基づいた空間探索課題が遂行できることを明らかにする。SNN には誤差逆伝搬法などの学習手法が適用できないため、スパイクタイミングに依存したシナプス可塑性を用いて学習する方法を提案することも目的の一つである。

3. 研究の方法

海馬、嗅内皮質、嗅周皮質のそれぞれの領域にある特徴的なニューロンを含めて SNN を作成し、迷路課題を学習することを通して、海馬におけるリプレイや後方シフトの自己組織的な形成や機能について研究を進めた。課題ごとに 5 つのサブプロジェクトとして進めた。(1)モリス水迷路様課題における海馬 SNN のリプレイと場所受容野の後方シフト、(2)8 字迷路課題学習後の未経験経路のリプレイ、(3)他者を含む観察 T 迷路学習、(4)人工ニューラルネットワーク (ANN) から SNN への変換による格子細胞の形成、(5)嗅周皮質 SNN による新規物体に対する反応。電気生理学的知見に基づき、各領域の SNN 層を作成し、嗅内皮質 SNN 層と海馬 SNN 層を結合したネットワークを中心として、行動決定 SNN を追加するなどして、迷路課題を遂行した。いずれの SNN においてもスパイクタイミング依存性可塑性 (STDP) を有し、課題を応じて、ドーパミン依存性 STDP やシナプス結合重みの標準化を適用した。

上記の SNN 計算が高速に実施できるよう GPU を搭載したハイパフォーマンス計算機による並列計算で実装した。

4. 研究成果

(1)モリス水迷路様課題における海馬 SNN のリプレイと場所受容野の後方シフト

海馬 CA3 における場所細胞間のフィードフォワード結合の形成は、海馬のリプレイにつながる可能性がある。同時に、フィードフォワード結合の形成は、空間学習課題中の動物の動きとは逆方向に場所野を拡大する。両者の現象はフィードフォワードネットワークの結果であるにもかかわらず、両者が共存するためには、異なる神経調節因子の条件を考慮する必要がある。本研究では、海馬と嗅内皮質の SNN を用いて空間課題学習を行い、海馬のリプレイと後方シフトを生み出すシナプス結合の獲得過程を調べた。グルタミン酸作動性シナプス伝達は、細胞外アセチルコリン濃度によって抑制される。探索時には細胞外アセチルコリン濃度が高く、休息時には低くなると仮定した。直線トラックを走行させると、ドーパミン依存的シナプス可塑性により、場所細胞間のシナプスでフィードフォワード接続が形成され、後方シフトを引き起こした。休息時にはリプレイを起すことがわかった。さらに、報酬依存的なナビゲーション課題を学習するために、場所細胞の出力を行動選択 SNN に結合した(図 1)。モリス水迷路様課題では、プラットフォームの位置の学習と同時に、リプレイと後方シフトが獲得された。場所細胞の変形により、報酬地点への遠回りとなる経路が回避され、最適な経路を見つけることができた。動物がアセチルコリンやドーパミンなどの神経調節物質の放出を行動状態依存的に調節することで、海馬のダイナミクスを切り替え、空間記憶の符号化と定着の段階を分けていることを示唆する結果となった。

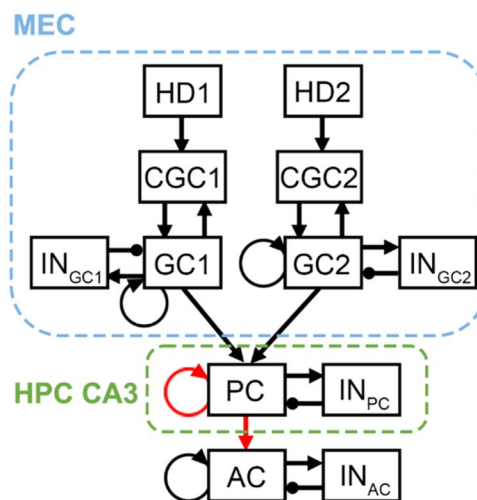


図 1 嗅内皮質 海馬 行動選択のスパイクニューラルネットワークモデル。

(2) 8 字迷路課題学習後の未経験経路のリプレイ

8 字迷路における交替迷路課題では、仮想ラットの進行方向は制約されており、反時計回りに周回した後、時計回りに周回する。海馬の場所細胞間の興奮性シナプス結合は、シナプス前細胞とシナプス後細胞の発火が時間的に近ければ、STDP によって増強もしくは減弱される。さらに、迷路を探索する過程で、報酬を得るとドーパミンが放出されるものとし、ドーパミン依存の STDP 関数を取り入れることで、報酬に依存したシナプス結合の増強・減弱が生じるようにした。シナプス結合の特性に加え、場所細胞モデルがアダプテーション特性を有するとした。結果として、迷路探索後には外部入力を遮断し、内部のランダムパルスによって発火を引き起こすと、順方向リプレイと逆方向リプレイが生じるだけでなく、順方向リプレイと逆方向リプレイが連続して生じるような未経験経路も想起された。

(3) 他者を含む観察 T 迷路学習

海馬には自己位置を示す場所細胞だけでなく、同じ迷路内の他者を示す場所細胞があることがわかっているため、この他者を表す場所細胞を形成し、他者の行動に応じて自己の行動を決定する課題を実施した。自己の場所細胞は格子細胞の組み合わせにより形成するものとしたのに対し、他者の場所細胞は、嗅内皮質で発見されたオブジェクトベクトル細胞により形成した。オブジェクトベクトル細胞は自分とオブジェクトの距離と方位に依存して活動する細胞である。オブジェクトベクトル細胞が同じ迷路内の他者にも反応すると仮定し、オブジェクトベクトル細胞と自己の場所細胞の合成により、自己と他者と位置関係を表すジョイント場所細胞とした (図 2a)。

T 字路の分岐点において、他者が右に行ったら左に、他者が左に行ったら右に移動するように学習する課題を実施した (図 2b)。学習を繰り返すと、ジョイント細胞は適切な方向に移動する行動結成細胞との間でシナプス結合が増強され、課題を遂行できるようになった。

(4) ANN から SNN への変換による格子細胞の形成

課題 (1) の SNN において、嗅内皮質の格子細胞は、近隣の興奮性細胞への局所的な結合と、2次元格子状に配置した細胞をトーラス状に結合により構成していた。しかし、格子細胞の活動を移動の速さと方向に依存して移動させるために、多くの興奮性細胞を要するし、柔軟性に欠ける。ANN では、速さと頭方位を入力し、場所細胞を出力として誤差逆伝搬法により学習すると、中間層に格子細胞が形成されることが報告されている。学習後の ANN を SNN に変換することで、より少ない細胞数で格子細胞を形成するようにした。ANN から SNN の変換にあたっては、積分発火細胞モデルに reset by subtraction 機構を取り込んだ。また、発

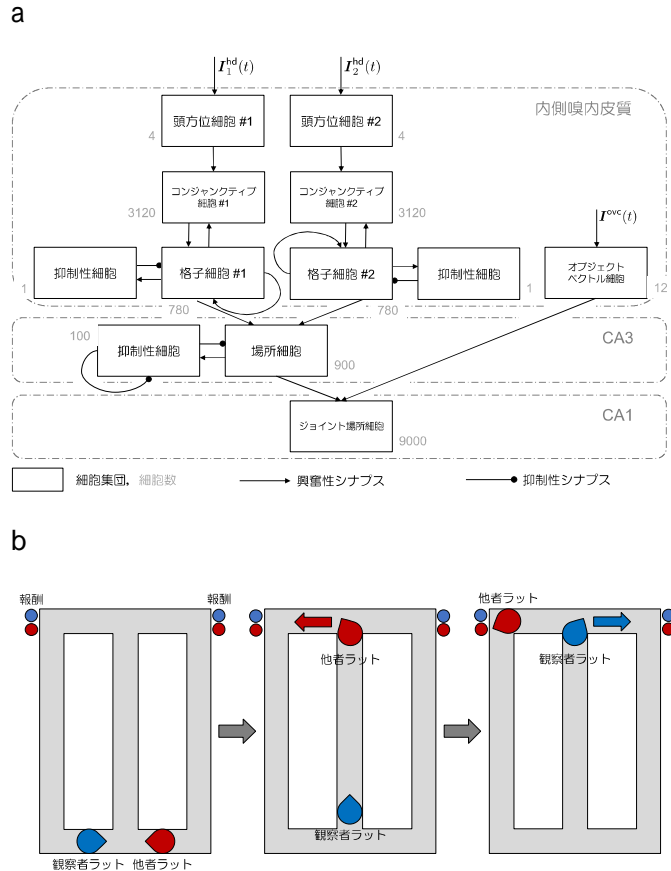


図 2 (a)提案ネットワーク。(b)他者を含む観察 T 迷路学習。

火率をもとにスパイクを確率的に発生させるようにした。この結果、中間層に格子細胞を形成する SNN を形成することができた。

(5) 嗅周皮質 SNN による新規物体に対する反応

嗅周皮質では新規物体と見慣れた物体に対する応答では、新規物体に対する発火が高くなる。物体を記憶するためにはシナプス結合の増強が必要であるが、見慣れた物体に対して応答が低くなるためにはシナプス結合が減弱される必要があると仮定し、シナプス結合の標準化を取り入れることで、物体を見慣れるにつれ関連する細胞群の結合は増強され、それ以外のシナプス結合は減弱させるようにした。この機構により、ネットワーク全体としては、見慣れた刺激に対する応答は下がることとなり、新規刺激に対する応答は維持された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Takada Kensuke, Tateno Katsumi	4. 巻 13
2. 論文標題 Real-time computation of a large-scaled entorhinal-hippocampal spiking neural network using GPU acceleration	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 349 ~ 354
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/nolta.13.349	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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 高田 健介, 立野 勝巳
2. 発表標題 迷路タスクにおいて未経験経路シーケンスを形成する海馬CA3スパイクングネットワークモデル
3. 学会等名 非線形問題研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Katsumi Tateno, Kensuke Takada
2. 発表標題 Parallel computation of entorhinal cortex-hippocampal spiking neural network and its applications in reward-based maze tasks
3. 学会等名 The 4th International Symposium on Neuromorphic AI Hardware (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takahiro Fukushima, Kensuke Takada, Katsumi Tateno
2. 発表標題 Emergence of replay of path-dependent place cells in entorhinal cortex-hippocampus spiking neural network on linear track
3. 学会等名 The 4th International Symposium on Neuromorphic AI Hardware (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kensuke Takada, Katsumi Tateno
2. 発表標題 A hippocampal spiking neural network model for replay and place-field deformation in spatial learning
3. 学会等名 Neuroscience 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高田 健介, 立野 勝巳
2. 発表標題 アセチルコリンによるシナプス抑制とシータリズムを用いた海馬リプレイの獲得・想起モデル
3. 学会等名 第31回日本神経回路学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kensuke Takada, Katsumi Tateno
2. 発表標題 Real-time computation of a large-scaled entorhinal-hippocampal spiking neural network using GPU acceleration
3. 学会等名 The 2021 NonLinear Science Workshop (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Katsuya Chiguchi, Katsumi Tateno
2. 発表標題 Spiking neural network model encoding the position of others for spatial observational learning
3. 学会等名 9th International Symposium on Applied Engineering and Sciences (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千口克也, 立野勝巳, 高田健介
2. 発表標題 自己位置と他者位置を符号化する嗅内皮質-海馬スパイクニューラルネットワークを用いた観察学習
3. 学会等名 ニューロコンピューティング研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuya Ito, Katsumi Tateno
2. 発表標題 Spiking recurrent neural network for spatial grid representation of entorhinal cortex for neuromorphic implementation
3. 学会等名 11th International Symposium on Applied Engineering and Sciences (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤 優也, 立野 勝巳
2. 発表標題 ANN-SNN 変換による嗅内皮質-海馬ネットワークの格子細胞の形成
3. 学会等名 2024年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 齋藤洸, 立野勝巳
2. 発表標題 シナプス重みの正規化を用いた嗅周皮質スパイクニューラルネットワークにおけるfamiliarity discrimination
3. 学会等名 2024年NOLTAソサエティ大会
4. 発表年 2024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
--	---------------------------	-----------------------	----

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