

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K00344

研究課題名（和文）ラット型ロボットの頭脳としての内側側頭葉神経回路モデルに関する研究

研究課題名（英文）Study on neural network model of medial temporal lobe as brain of a rat type robot

研究代表者

立野 勝巳（Tateno, Katsumi）

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：スパイクニューラルネットワーク（SNN）の並列計算用ライブラリを用意し、大規模なSNNを高速に計算する環境を整えた。このライブラリを用いて、嗅内皮質の格子細胞や頭方位細胞を作成し、海馬に場所細胞を形成するSNNを構築した。海馬SNNに行動選択SNNを追加することで、報酬依存の空間学習が可能となった。時間細胞を含むSNNも作成し、過去の経路に依存する空間学習を実施した。高速計算が可能となったことで、移動ロボットに海馬SNNを接続し、移動ロボットの移動速度や頭の向きに応じて実時間で海馬SNNに場所細胞が形成された。また、コンパートメント型錐体細胞のSNNにおいても時間細胞様の振る舞いを再現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ニューラルネットワークの中でも、SNNを用いた研究が盛んに行われるようになってきた。誤差逆伝搬法のような人工ニューラルネットワークの理論がSNNに適用できるようになってきたことが理由である。一方で、SNNの計算は、連立微分方程式を数値解法により解くため、計算負荷が高い。本研究成果によるライブラリはGraphics Processing Unitを意識することなく、並列計算によりSNNを作成でき、高速な計算を容易にする点で意義がある。本研究は、海馬に特化し、空間の場所表現に関するSNNを対象としたが、別の脳領域のSNNの構築も可能であるので、より大規模で機能的なSNNを構築することを可能にする。

研究成果の概要（英文）：A library for parallel computation of spiking neural networks (SNN) has been prepared to provide an environment for high-speed computation of large-scale SNNs. Using this library, we created grid cells and head orientation cells in the entorhinal cortex and constructed SNNs that form place cells in the hippocampus. Adding an action selection SNN to the hippocampal SNN would allow for reward-dependent spatial learning. A SNN containing time cells was also created and spatial learning dependent on past pathways. With the high-speed computation now possible, connecting a mobile robot to the hippocampal SNN, place cells were formed in the hippocampal SNN in real-time based on the movement speed and head direction of the mobile robot. Time cell-like behavior of compartmental pyramidal cells in a SNN was also reproduced.

研究分野：計算論的神経科学

キーワード：スパイクニューラルネットワーク 内側側頭葉 嗅内皮質 海馬 GPU

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

長期記憶のなかでもエピソード記憶には、海馬や嗅内皮質などの内側側頭葉が寄与している。エピソード記憶には、場所の情報や時間を表現する神経活動が必要である。実際、海馬では場所細胞や時間細胞が発見され、嗅内皮質では格子細胞、頭方位細胞、速度細胞、境界細胞などが発見されている。場所細胞や格子細胞や境界細胞は、動物の位置を表現する細胞である。また、嗅周皮質から海馬までの神経活動を記録した実験では、アイテムに反応する神経細胞と時間に反応する神経細胞の比率が領域ごとに変化する。エピソード記憶の理解のためには、これらの機能的な神経細胞を統合して理解する必要があるが、具体的な神経機構はまだ十分に明らかにされていない。

2. 研究の目的

本プロジェクトの目的は、海馬の場所細胞や嗅内皮質の格子細胞などを統合して、機能的に働く内側側頭葉のスパイクニューラルネットワークモデルを提案することにある。提案するニューラルネットワークは活動電位を有するスパイクニューロンによって作成し、できる限り大規模にすることで生理学的に知られた知見を反映しやすいようにする。スパイクニューロンもイオンチャネルの電位依存性を有する Hodgkin-Huxley 型モデルによる作成したニューラルネットワークと、より簡素化したニューロンモデルを使い分けることで、神経生理学的メカニズムへのアプローチと、学習における情報処理の側面を明らかにする。学習における情報処理への寄与を調べるために、空間探索課題に適用し、場所や時間情報の統合を試みることができるニューラルネットワークを提案する。また、ラットに見立てた移動ロボットと接続し、海馬における場所の表現ができるようにすることで、実空間における探索における海馬の機能について調べる足掛かりをつくることを目的である。

3. 研究の方法

海馬や嗅内皮質を領域ごとに、場所細胞や時間細胞のような特徴的なニューロンを含めたニューラルネットワークを作成し、設定したタスクを学習することを通して、各領域の統合について研究を進めた。3つの小プロジェクトに分けて進めた。プロジェクト1では、マルチコンパートメント Hodgkin-Huxley 型ニューロンモデルを用いたネットワークを作成した。海馬モデルでは、CA3とCA1領域の時間細胞の振る舞いを再現することとした。嗅周皮質モデルでは、マルチコンパートメント Izhikevich 型ニューロンモデルを用いて、遅延時間を含む入力を連合する学習を対象としてネットワークモデルを作成した。プロジェクト2では、タスク学習プラットフォームとして、スパイクニューラルネットワークでの処理を実時間で行うための環境として、Graphics Processing Unit (GPU) を用いた並列計算ライブラリを用意した。また、移動ロボットを用意した。プロジェクト3では、タスク学習プラットフォームを用いて学習を行った。当初、タスクとして痕跡恐怖条件づけを想定していたが、海馬の場所細胞が生かせる空間探索課題に切り替えて実施した。空間探索課題であっても、過去の移動経路情報を必要とする課題にすることで、時間細胞と場所細胞を活用する課題となる。また、探索行動において行動選択を学習する必要があったため、海馬からの出力に応じて、報酬依存で移動方向を学習するニューラルネットワークを追加した。タスク学習は計算機シミュレーションでのみ行ったが、移動ロボットのセンサー情報から嗅内皮質 海馬モデルにおいて場所細胞が実時間で形成できることを確認した。

4. 研究成果

(1) コンパートメント Hodgkin-Huxley 型錐体細胞モデルを用いた経時依存的発火に関するシミュレーション、および嗅周皮質ネットワークによるペア連想記憶シミュレーション

複雑な分岐を有する樹状突起のある錐体細胞モデルをコンパートメント Hodgkin-Huxley 型モデルで作成し、化学シナプスで結合して、海馬 CA3 と CA1 のニューラルネットワークとした。錐体細胞と抑制性介在細胞を合わせて約 3000 個の神経回路モデルを構成した。回路サイズは拡張可能で、10000 個まで拡張可能である。セル・アセンブリ間のダイナミックな遷移を利用した時間細胞様の特性を再現するシミュレーションを行った(図1)。CA1 神経回路モデルは、CA3 神経回路モデルからのシナプス入力を受けて、時間細胞様の神経活動を示した。

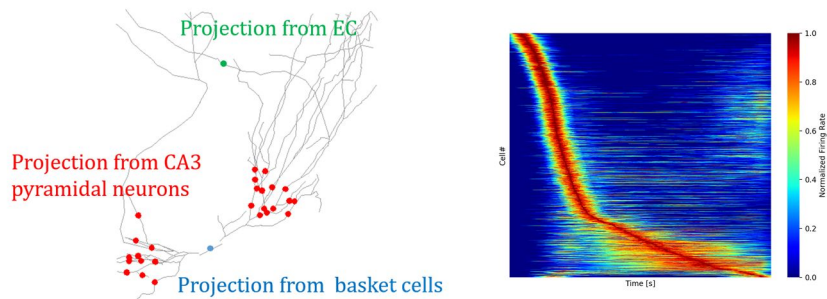


図 1 複数コンパートメントで構成される Hodgkin-Huxley 型錐体細胞モデルの概形 (左) と時間細胞様の活動電位伝播 (右)

嗅周皮質ニューラルネットワークでは、痕跡条件づけを想定し、条件刺激が与えられてから無条件刺激が与えられるまで数秒間発火を継続させ、連合学習するシミュレーションを行った。刺激が与えられていない遅延時間中も発火を継続させるため、内因性持続発火特性を有するマルチコンパートメント Izhikevich 型 late-spiking ニューロンを採用した。内因性持続発火特性は、細胞外アセチルコリン濃度が高くなった際、脱分極刺激停止後も自発的に発火が持続する現象である。条件刺激により発火を始めた嗅周皮質の神経細胞モデルは、刺激終了後の数秒間持続して発火を続けることを確認した。また、条件刺激と無条件刺激の2つの刺激を結びつける応答を再現できた。

(2) 大規模なスパイクングニューラルネットワークを高速で処理するための GPU を用いたニューラルネットワーク並列計算用ライブラリの整備

大規模なニューラルネットワークを計算するためには、GPU を用いて高速に、連立微分方程式を解く必要がある。そのために、スパイクングニューロンを解くためのライブラリを作成した。このライブラリにより、GPU プログラミングに必要な汎用並列コンピューティングプラットフォーム (CUDA) を意識することなく、並列計算ができるようになった。GPU の性能にも依存するが、結合確率 5% のスパース結合でシナプス遅延 1ms としたニューラルネットワークであれば、20 万ニューロンまでの実時間計算が可能であることを確認した。採用したニューロンモデルはリーキー積分発火型モデルであるが、作成したライブラリは Izhikevich モデルと Hodgkin-Huxley 型モデルもサポートしている。また、嗅内皮質の格子細胞を備え、経路積分によって海馬の場所細胞を形成する SNN では、およそ 5 万ニューロンを実時間で計算できるようになった。シナプス伝達遅延が 3ms 以上あるような場合には、さらに規模の大きな計算を実施できる見込みがあることも確認した。

(3-1) 経路依存場所細胞を用いた交替迷路課題学習シミュレーション

場所細胞と時間細胞を統合し、経路依存場所細胞 (図 2 のスプリッター細胞) を形成し、交替迷路課題を学習するネットワークを提案した。交替迷路課題は、8 字迷路を時計回りと反時計回りを交互に進むことにより報酬が得られる課題である。この課題を学習するためには、少し前の経路を保持しておく必要がある。スプリッター細胞は、場所細胞であるが、右回りの後と左回りの後では、同じ場所であっても異なる場所細胞が反応する。特定のオブジェクト入力をトリガーとして時間細胞で情報を一定時間保持し、場所細胞と連合させることでスプリッター細胞を形成した。また、行動学習のため、海馬 SNN の後段に行動選択のための SNN を接続し、ドーパミン依存シナプス可塑性を併せて導入することで、交替迷路課題を学習することができることを確認した。

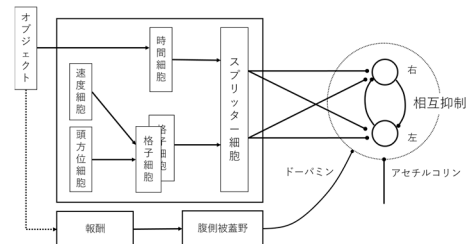


図 2 スプリッター細胞と行動選択 SNN を導入したネットワーク。

(3-2) 移動ロボットと嗅内皮質 海馬スパイクングニューラルネットワークを接続し、場所細胞を形成するシミュレーション

嗅内皮質 海馬 SNN は、仮想ラットの移動速度と頭方位細胞からの入力と、初期位置を元に場所を表現する場所細胞を形成する。2次元のオープンフィールドにおいて、実際の移動ロボットを操作しながら、頭方位と移動速度を嗅内皮質 海馬 SNN に入力することで、場所細胞の形成を確認した (図 3)。結果として、実時間で海馬内に場所細胞の計算ができることを確認した。ただし、ニューラルネットワークと移動ロボットを双方向結合するまでには至らなかった。

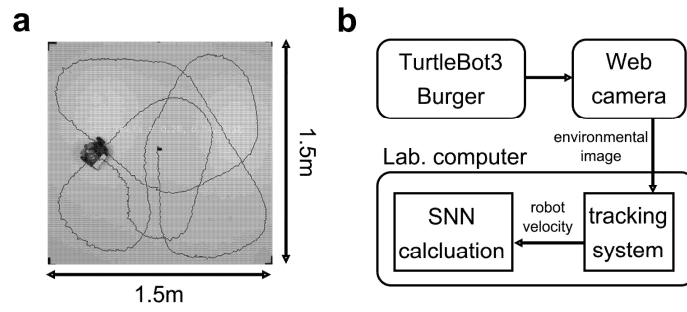


図3 移動ロボットと嗅内皮質 海馬 SNN を結合し、実時間で場所細胞を形成するシミュレーション。a. 移動ロボットと行動軌跡。b. 接続ダイアグラム。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 田上天羽・立野勝巳	4. 巻 119(381)
2. 論文標題 海馬の文脈依存情報および報酬に基づいて行動を制御する前頭前野モデル	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 23-26
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 無
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 立野勝巳・高田健介	4. 巻 119(471)
2. 論文標題 経路依存場所情報を符号化するスパイクングニューラルネットワークを用いた行動選択学習	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 115-118
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 無
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 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5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 立野 勝巳
2. 発表標題 海馬の経路依存場所細胞を再現するスパイクングニューラルネットワークモデル
3. 学会等名 異分野融合ワークショップ「脳型情報処理によるロボットラーニングの技術革新」（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kensuke Takada, Katsumi Tateno
2. 発表標題 Effects of synaptic properties on time cell-like firing based on attractor dynamics
3. 学会等名 The 11th FENS Forum of Neuroscience (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kensuke Takada, Katsumi Tateno
2. 発表標題 Attractor transitions for time cell-like elapsed time dependent activity in a hippocampal CA1-CA3 network model
3. 学会等名 Neuroscience 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高田 健介、立野 勝巳
2. 発表標題 海馬神経回路においてセル・アセンブリから生成される経時依存的発火に関する計算機シミュレーション
3. 学会等名 第27回日本神経回路学会全国大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kensuke Takada and 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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

九州工業大学 大学院生命体工学研究科 人間知能システム工学専攻 立野研究室ホームページ
<https://www.brain.kyutech.ac.jp/~tateno>

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