

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K16292

研究課題名(和文) 場所のネットワーク表現に関わる脳情報処理過程の同定

研究課題名(英文) Neural processing for network representation of spatial map

研究代表者

鈴木 裕輔 (Suzuki, Yusuke)

京都大学・生命科学研究科・助教

研究者番号：90723669

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：場所をネットワークとして表現することは、空間探索を効率化することは経験的に知られている。しかしスタンダードとなりうる実験パラダイムは確立されていない。本研究では、マウスを対象とした空間学習パラダイム、バーンズ迷路での空間探索のネットワーク構造が、空間スケールによって調整されることを報告した。

バーンズ迷路において各個体は、探索地点をノード、探索地点間の遷移をリンクとするネットワークを生成する。直径1mサイズのバーンズ迷路では、学習に伴ってネットワークの媒介中心性が減少するのに対し、直径1mサイズのバーンズ迷路では一定であり、その傾向は、学習後の空間探索傾向でも維持された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

場所をネットワークによって表象することは、場所同士の接続関係を維持したまま、場所の持つ物理的・幾何学的な特徴を要約することであり、これによって所望の場所への経路検索を容易にする。場所のネットワーク表象を探る研究によって、従来の認知地図モデルのアップデートが期待される。

本研究は、ネットワーク表象が空間スケールによって異なることを示唆した。これらの結果は、生物が長い距離や広大な空間の中で、どのようにナビゲーションを可能にしているかについての洞察を与える。

研究成果の概要(英文)：Representing places as a network is empirically known to make spatial navigation efficient. However, none of the standard experimental paradigms to test this has not been established. In this study, we report that the network structure of spatial exploration in the Barnes maze, a spatial learning paradigm for mice, is modulated by scale space. In the Barnes maze, each mouse generates a network where exploration points are nodes and transitions between them are links. In a 1-meter diameter Barnes maze, betweenness centrality of the network decreases with learning, whereas it remains constant in a larger 3-meter diameter Barnes maze. This pattern is maintained even in post-learning spatial exploration behavior.

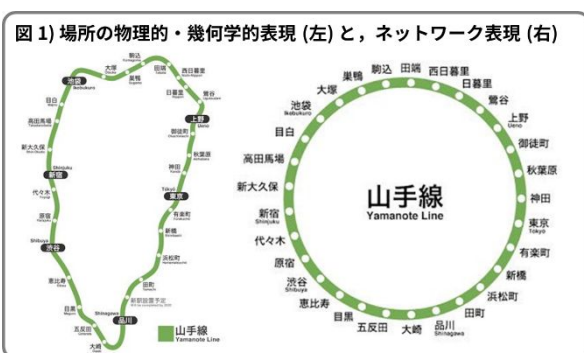
研究分野：心理学

キーワード：空間表象 ネットワーク

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

場所細胞や格子細胞に代表されるように、これまでの多くの研究では、認知地図が“実際の、正確な”場所の地図(例えば、図1左図)であることを想定し、場所の物理的・幾何学的特徴の神経相関に注意を向けてきた。一方、場所の物理的・幾何学的特徴の全てを用いて認知地図を生成・検索するには莫大な計算資源を要する(Dabaghian, et al., 2014)。従って、脳が認知地図を生成・検索する際に、物理的・幾何学的表現とは異なる、より“要約”された表現も用いてナビゲーションを実行している可能性もまた十分に想定できる(Weiss et al., 2012)。場所のネットワーク表現は、場所の持つトポロジカルな特徴、すなわち場所同士の接続関係を維持したまま、場所の持つ物理的・幾何学的な特徴(例えば、場所間の実際の位置関係や経路)を要約することと見なせ(図1右図)、これによって所望の場所への経路検索を容易にする(Javadi et al., 2017)。場所のネットワーク表現の神経表象を探索する一連の研究は、実環境の物理的・幾何学的特徴が忠実に再現されているとする従来の認知地図モデルを大幅にアップデートするものであり、本研究はこの潮流の一端に位置づけられる。近年のシミュレーションおよびラットを対象とした電気生理学の実験やヒトを対象としたfMRI実験から場所のネットワーク表現の神経表象の一端が明らかになってきた(Dabaghian, et al., 2014; Javadi et al., 2017)。しかしながら、その全容解明は未踏であり、スタンダードとなりうる実験・解析パラダイムの早期の立ち上げと確立が望まれていた。



2. 研究の目的

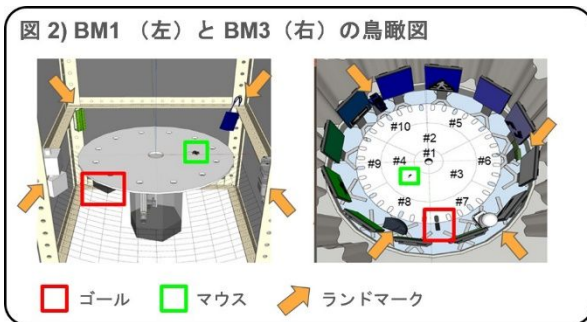
研究代表者は先の研究で、マウスを対象としたバーズ迷路パラダイムにおける空間学習中の探索地点を結ぶネットワーク構造が、学習とともに単純化されることを示し(Suzuki & Imayoshi, 2017)、ここから、それを成立させる神経表象があることが想定された。そこで本研究では、場所のネットワーク表現の神経表象を探索するために、空間学習中のマウスの行動データから、探索地点をノード、それらの間の遷移をリンクとするネットワークを一連の構造パラメータによって定量化するとともに、それらと神経細胞群のカルシウム応答との相関を検証することを目的とした。

3. 研究の方法

通常サイズ(直径1m)のBM(BM1)学習中のマウスの海馬dCA1領域の神経細胞群のカルシウム応答を微小脳内視鏡nVistaでイメージングし、Suzuki & Imayoshi, 2017で提案された空間探索のネットワーク構造の各パラメータ、すなわち探索地点をノード、探索地点間の遷移をリンクとするネットワークの位数、次数、密度、最短経路長、クラスタリング係数、媒介中心性、近接中心性との相関を検証した。

場所のネットワーク表象はより広い空間においてより顕著に活用されることが予想されたため、直径3mサイズのBM(BM3)を開発し(図2)、そこでのネットワーク構造をBM1でのそれと比較した。

また、空間学習は空間スケールの来歴の影響を受けることが予想された。例えば、広い空間で空間学習した後に狭い空間で空間学習するケースと、狭い空間で空間学習した後にそれとは別の狭い空間で空間学習するケースでは、同じ狭い空間での空間学習も異なる可能性が考えられる。そのため、先行してBM3を学習した後、BM1を学習する群(BM3 learner)と、BM1'を学習した後、ランドマークの種類とゴールの位置が異なるBM1を学習した群(BM1' learner)と、BM1を初めて学習する群(BM1 beginner)の間で、BM1学習中のネットワーク構造の比較した。また、先行してBM1を学習した後、BM3を学習する群(BM1 learner)とBM3 beginnerの間で、BM3学習中のネットワーク構造を比較した。



4. 研究成果

探索中のマウスの移動軌跡から探索地点のネットワーク構造を抽出できること、海馬 dCA1 から ~1000 個程度までの細胞の位置、形状、活動波形を推定し、各細胞の活動をバーズ迷路課題の全日に渡って追跡できることを確認し、探索ネットワークのパラメータと、神経細胞群の活動パターンとの相関を解析するまでのパイプラインが構築された。

BM1 と BM3 での空間学習成績を比較すると、予想通り前者よりも後者の難易度が高いことが示された。

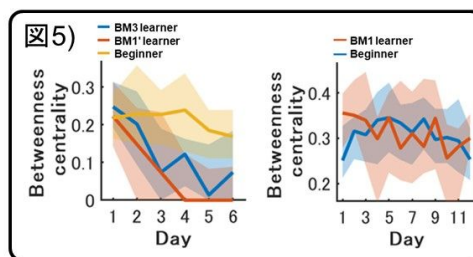
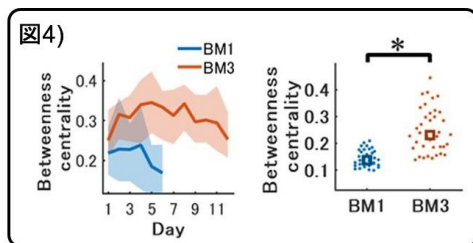
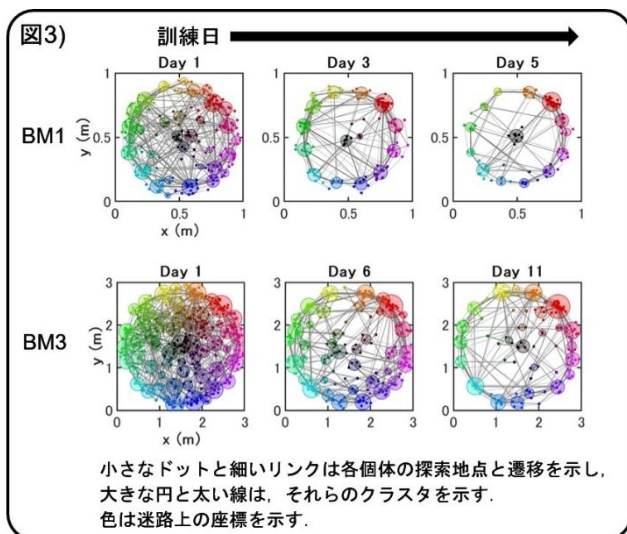
ネットワーク解析の結果、BM1 上の探索ネットワーク構造と、BM3 上のそれが質的、量的に異なることが発見された (図3)。

具体的に、媒介中心性 (Betweenness centrality) は、BM1 では学習に伴って減少するのに対し、BM3 では学習中一定の値を保った (図4 左図)。この傾向は、学習成立後の空間探索にも反映された (図4 右図)。これらの結果は、BM3 のような広いスケールではマウスは、異なる地点同士を中継する地点を維持するように探索することを示唆し、実際に、そのような探索地点が生成された (図3 下段の中心部の点)。そのような探索地点は BM1 では訓練初日 (図3 上段の左図の中心部の点) を除いて生成されなかった。

BM3 learner, BM1' learner, BM1 beginner 間での BM1 における空間学習成績を比較すると、BM3 learner が最も正確な空間表象を示し、次いで、BM1' learner, BM1 beginner であった。BM3 learner と BM1' learner における学習中の媒介中心性の減少は、BM1 beginner よりもさらに急峻であった (図5)。一方で、BM1 learner と BM3 beginner の BM3 における学習成績と学習に伴う媒介中心性の変化は同様であった。

これらの結果は、空間学習時のネットワーク構造が、先行する空間学習で経験した空間スケールの影響を受けることを示唆する。すなわち、先行する空間学習は、そこでの空間スケールと同じか、より狭いスケールでの後続の空間学習での媒介中心性を大きく減少させる。一方で、先行学習から、そこでの空間スケールより広いスケールでの空間学習での媒介中心性への効果は限定的であった。媒介中心性はまた、異なるスケール間の空間学習の成績とよく一致していた。

以上は、場所のネットワーク表象が空間スケールとその来歴に影響されることと、空間学習成績と良く対応することを示唆する。上記の成果は、Tachiki et al., 2023 で論文化された。



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 Tachiki Yuto, Suzuki Yusuke, Kurahashi Mutsumi, Oki Keisuke, Mavuk Ozg?n, Nakagawa Takuma, Ishihara Shogo, Gyoten Yuichiro, Yamamoto Akira, Imayoshi Itaru	4. 巻 10
2. 論文標題 Scale Space Calibrates Present and Subsequent Spatial Learning in Barnes Maze in Mice	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 eneuro	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1523/ENEURO.0505-22.2023	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0件

〔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
---------	---------