

海馬時間細胞による2つの時間軸の表現

複雑理工学専攻 47206101 松本透次郎

指導教員：藤澤茂義 教授

2022年2月

Key Words : 海馬; 時間細胞; 神経生理学

1 序論

海馬に存在する時間細胞は時間的規則性を有する状況下において特異的に発火する神経細胞である。その発見以降、発火頻度符号化特性や発火位相符号化特性、相対的時間表現特性や位相前進性など、様々な観点で研究が行われてきた。しかし、動物が並行して流れる複数の時間を同時に計測しなければならない状況において、時間細胞がどのように時間情報を符号化しているかについては未だ明らかとなっていない。そこで本研究では、2つの時間イベントを提示した際の時間細胞の振る舞いを調べることによって、更なる時間細胞の特性について調査を行う。特に以下の2つの観点について、新たな知見を与えることを目的とする。

- (1) 2つの時間軸をそれぞれ独立してコードしている時間細胞は存在するのか？
- (2) 2つの時間軸を個別にコードしている時間細胞が存在するか？それはどのように表現されているか？

2 実験方法

実験はラットを対象として行った。ラットには外科手術を行い、海馬に極小シリコンプローブを埋め込んだ。これによって、実験中の海馬での神経細胞の活動を記録することが可能となる。

実験装置を図1に示す。ラットは実験中この装置内に固定され、レバーの操作のみが可能な状態で保持される。

はじめにトレーニング課題を行った。左右交互に提示されるレバーを交互に引くことで、レバー先端から報酬として水が提示される。この課題を通して、ラットにレバーが提示されると即座にレバーを引くことを学習させた。

学習完了済みのラットに対して実験課題を行った。実験課題の概念図を以下の図2に示す。この課題では左右のレバーが異なる時間間隔において提示される。40秒

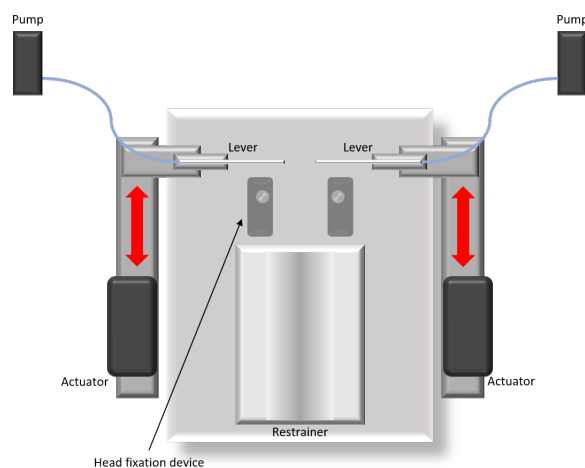


図1: 実験装置の模式図

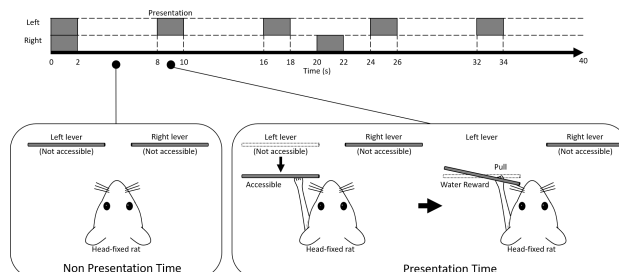


図2: 実験課題の概念図

を1回とするサイクルは左レバーにおける8秒トライアル5回と右レバーにおける20秒トライアル2回で構成され、1回の実験で45回のサイクルを実施した。課題中のラットの海馬における神経活動を記録し、このデータを用いて解析を行った。

3 解析方法

はじめに、実験より得られた細胞外電位から神経細胞の発火活動を分離するために、スパイクソーティングと呼ばれる解析手法を用いた。今回の実験ではKilosortと呼ばれるソフトウェアによる教師なしクラスタリングを行うことでこれを実現した。

続いて細胞の発火頻度情報を基にして、刺激前後時間ヒストグラム (PSTH) を作成した。PSTH は特定時間内に発生した神経細胞の発火頻度をヒストグラムとして表示したものである。これによって、対象となる神経細胞の活動と動物の行動を同じ時間スケール上で比較することが可能となる。

更に神経細胞の中から 8 秒と 20 秒の時間間隔に対応した時間細胞を抽出するために、対象の時間細胞に対して以下の条件を設けた。

1. 神経細胞の発火率が 2 Hz 以上 10 Hz 以下である。
2. 神経細胞の情報量 I_2 が 0.2 bit 以上である。
3. 片側パワースペクトル $P_1(f)$ の値が $\bar{P}_1 + 3\sigma$ より大きい。ここで \bar{P}_1 は $P_1(f)$ の平均値、 σ は $P_1(f)$ の標準偏差である。

こうして得られた時間細胞は以下の 6 つの種類に分類してカウントした。

- 1/8 Hz の周期性のみを持ち、提示時間中に発火頻度のピークを持つ時間細胞
- 1/8 Hz の周期性のみを持ち、提示時間中に発火頻度のピークを持たない時間細胞
- 1/20 Hz の周期性のみを持ち、提示時間中に発火頻度のピークを持つ時間細胞
- 1/20 Hz の周期性のみを持ち、提示時間中に発火頻度のピークを持たない時間細胞
- 1/8 Hz と 1/20 Hz の周期性を持ち、提示時間中に発火頻度のピークを持つ時間細胞
- 1/8 Hz と 1/20 Hz の周期性を持ち、提示時間中に発火頻度のピークを持たない時間細胞

4 結果

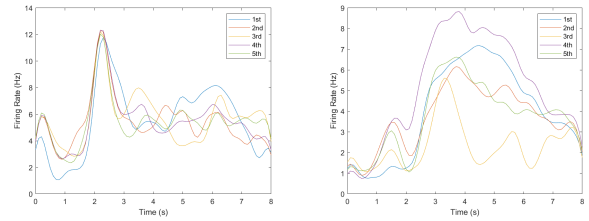
3 匹のラットを用いた 51 回の実験結果を解析した結果、時間細胞は計 314 個観測された。その内訳を以下の表 1 に示す。更にこれら時間細胞を個別に解析した

表 1: 時間細胞の個数

	提示時間	提示時間外
1/8 Hz の周期性のみ	104	79
1/20 Hz の周期性のみ	6	13
1/8 Hz と 1/20 Hz の周期性	58	54

結果、図 3a および 3b から分かるように、1/8 Hz と 1/20 Hz の周期性を持つ時間細胞の発火頻度には、8 s トライアルにおけるピーク位置 (時間) は近いが、ピーク

の高さ (発火頻度) が異なるという特徴があることが分かった。



(a) 1/8 Hz の周期性のみを持つ時間細胞の例 (b) 1/8 Hz と 1/20 Hz の周期性を持つ時間細胞の例

図 3: 左レバー (8 秒) のトライアル別 PSTH

5 考察

実験結果および解析結果より、以下の考察が得られた。

1. 2 つの時間軸を独立してコードする時間細胞が存在する。また数の多寡は時間イベントの発生頻度と関係がある。
2. 2 つの時間軸を同時にコードする時間細胞が存在する。また、短い周期の時間軸に発生頻度のピーク的位置を同期させ、長い周期の時間軸は発生頻度ピークの高さの変化させることで表現している。

以下の図 4 に本考察をまとめた概念図を示す。図 4 に示

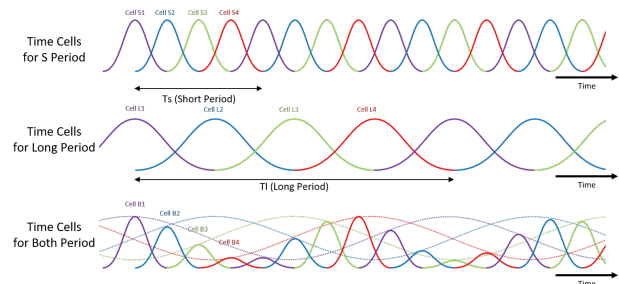


図 4: 考察内容の概念図

すように、2 つの時間イベントが繰り返し行われるタスクにおいては、2 つの時間軸を独立してコードする時間細胞と 2 つの時間軸を同時にコードする時間細胞の両方が存在する。短い周期で発生する時間イベントに対応する時間細胞と長い周期で発生する時間イベントに対応する時間細胞は、それぞれ対応する周期ごとに独立して発火する (図 4 上段および中段)。対して 2 つの時間軸を同時にコードする時間細胞では、短い周期と長い周期の両方に対応して発火頻度が多くなる。このことは我々が時間をどのように知覚・理解しているかを知る上で重要な知見であると考えられるだろう。