

下側頭皮質ニューロン集団による刺激-報酬連合の経験による変化 Experience-Dependent Change of Stimulus-Reward Association by Population of Inferior Temporal Neurons

松本有央(PY)¹⁾, 内山薫²⁾, 菅生(宮本)康子¹⁾

Narihisa Matsumoto (PY), Kaoru Uchiyama and Yasuko Sugase-Miyamoto

¹⁾産業技術総合研究所 脳神経情報研究部門

²⁾筑波大学大学院 人間総合科学研究科

xmatumo@ni.aist.go.jp

Abstract — Single neurons in macaque inferior temporal (IT) cortex are sensitive to associations between visual stimuli and predicted reward. To investigate an experience-dependent change of the stimulus-reward association by a population of IT neurons, we recorded single-unit activity of IT neurons, and analyzed the population activities and monkey's behaviors in each trial.

Keywords — population coding, category index, reaction time, associative learning

1 導入

サル脳の側頭葉には、視覚刺激と他の視覚刺激との連合に反応するニューロンが存在することが知られている[1]。最近、MogamiとTanakaは、下側頭皮質のニューロンが視覚刺激と報酬の連合に反応することを発見した[2]。サルの行動はたとえ同じタスクで同じ量の報酬をもらっても試行毎に異なる。ニューロン活動も同じ視覚刺激が呈示されても試行毎に異なる。外界の刺激の変化や学習等によってニューロン活動の強さが変化することも知られている。ニューロン集団で見ると、これらの変化をとらえることができる可能性がある。下側頭皮質のニューロン集団がコードする視覚刺激と報酬の連合に関する情報の経験による変化を調べる。このために、単一試行におけるニューロン集団の活動とサルの行動の解析を行う。

2 手法

2.1 タスク

1匹のアカゲザルに次のバーリリースタスクを訓練した。まず、サルがバーを握ったら、色画像と白黒パターン画像を500-700msの遅延期間を経て続けて呈示する。続いて赤色の注視点を呈示し、これが緑色に変わったら、1秒以内にサルがバーから手を放すように訓練する。色とパターンの組み合わせによって、バーリリース後の報酬(ジュース)の有無が決まる。色(C1, C2)とパターン(P1, P2)の4通りの組み合わせと報酬の有無(R1, R2)の関係を図1に示す。同じパターンが呈示されても色によって報酬の有無が異なる。サルは注視点が赤から緑に変わるとバーを放すだけに

も関わらず、色とパターンの組み合わせで決まる報酬の有無によって、行動を変化させると予測される。このタスクを実行中のサルの下側頭皮質から微小電極を用いてニューロン活動を記録した。本実験は産業技術総合研究所動物実験委員会の許可を得て行った。

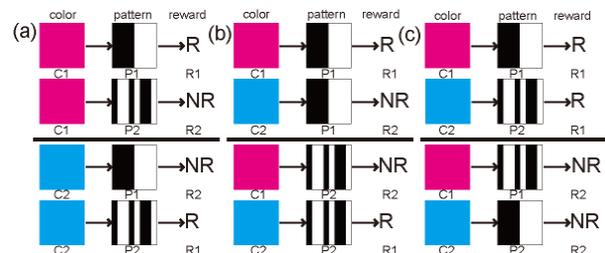


図1: 刺激と報酬の組み合わせ。(a): 色カテゴリー。(b): パターンカテゴリー。(c): 報酬カテゴリー

2.2 サルの行動データの解析

先行研究により、報酬試行の方が、サルのバーリリースの反応潜時が短く、タスクの正答率が高く、報酬を予期したリッキング行動が起こることが分かった[3]。本研究では、反応潜時の試行毎の解析を行った。単一ニューロン活動を記録した1セッションの反応潜時を早いものから並べて、20%, 40%, 60%, 80%の値を計算する。0-20%に間にある反応潜時のスコアを-2とし、20-40%を-1, 40-60%を0, 60-80%を1, 80-100%を2とする(図2)。1セッションにおけるすべてのスコアを合計すると0になる。さらに試行毎の累積和をとることで色とパターンのそれぞれの組み合わせにおけるスコアの変化を観察できる。色とパターンのそれぞれの組み合わせについて10試行以上ニューロン活動を記録した45セッションについて解析を行い、それぞれの試行におけるスコアをセッションについて平均した。試行数はセッションによって異なり、データが無い場合はそのセッションのその試行を無視し、20試行までのデータを用いた。

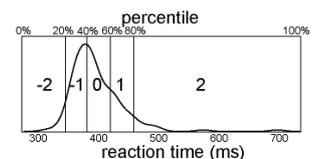


図2: 反応潜時の分布とスコア

2.3 ニューロン活動の解析

色とパターンのそれぞれの組み合わせについて10試行以上記録した45個のニューロン活動を用いた。試行

は色 (C1, C2) とパターン (P1, P2) の組み合わせで4組に分けられ, さらに, 色 (C1, C2), パターン (P1, P2), 報酬の有無 (R1, R2) によって図1に示すように色 (a), パターン (b), 報酬 (c) の3つのカテゴリーに分類できる. これらのカテゴリーについてカテゴリーインデックス (CI) を $CI = (BCD - WCD) / (BCD + WCD)$ で計算する [4]. BCDはカテゴリー間の応答の差の平均, WCDはカテゴリー内の応答の差の平均である. 色で分類したときのCIのBCDとWCDを $BCD = (|r_{11} - r_{12}| + |r_{21} - r_{22}|) / 2$, $WCD = (|r_{11} - r_{21}| + |r_{11} - r_{22}| + |r_{12} - r_{21}| + |r_{12} - r_{22}|) / 4$ で計算する. r_{ab} は色CaとパターンPbが呈示された1試行での500msの時間窓内でのスパイク数を表す

(a, b=1, 2). CIの値は-1から1の間をとり, 1に近いほど, カテゴリーの分離が良いことを意味している. ニューロン毎にCIを計算し, それぞれの試行毎に平均したものを, 試行について累積和をとる.

3 結果

3.1 反応潜時の試行毎の変化

各セッションにおいて反応潜時のスコアを試行毎に計算し, スコアの累積和を計算した. 1セッションの例を図3(a)に示す. 実線は報酬試行, 破線は無報酬試行であり, 線の色はその試行で呈示した色画像を表している. その結果, 無報酬試行では反応潜時の累積スコアが増加し, 報酬試行では累積スコアが減少した. さらに, このセッションでは, 8試行目から無報酬試行の累積スコアが0から離れていくことが分かった. 全45セッションの平均をとると, 図3(b)のようになり, 3試行目から無報酬の累積スコアが0から離れていくことが分かった. それゆえ, サルは初期の試行で刺激と報酬の関係を学習し, 報酬の有無によって反応潜時が異なった.

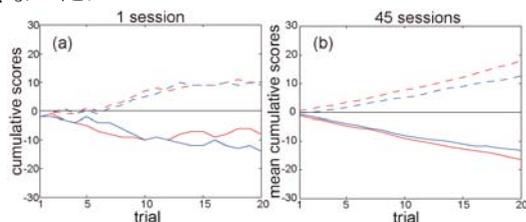


図3: 反応潜時の累積スコア.

3.2 ニューロン活動の試行毎の変化

図1で定義した3つのカテゴリー分類に対して, ニューロン毎にCIを計算した. 色, パターン, 赤の注視点が呈示されたそれぞれの時間から500msの時間窓におけるスパイク数を計算した. それぞれのカテゴリー分類におけるCIを計算し, 45個のニューロンについて試行毎に平均した. この値を試行について累積和をとった結果を図4に示す. 色が呈示された時間窓 (a) では, 色のCIが最も高く, パターンが呈示された時間窓 (b) では, パターンのCIが最も高く, 赤の注視点が呈示されている時間窓 (c) でもパターンのCIが最も高い. さらに, 報酬のCIが9試行目から徐々に増加している. そ

れゆえ, 経験によって後半の試行で報酬の有無を予測する情報をコードするようになった可能性を示唆している. また, 反応潜時について, それぞれのカテゴリー分類に対してCIを計算した結果, 報酬のCIが最も高かった (図4(d)).

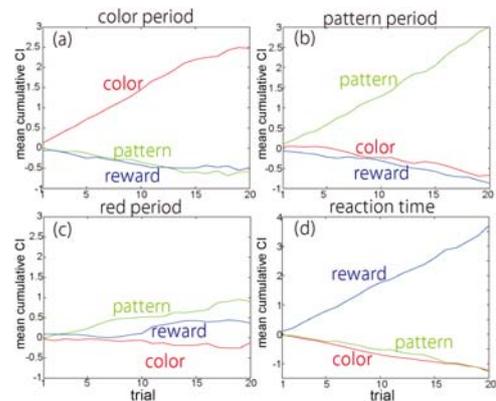


図4: CIの累積和. (a), (b), (c): 45個のニューロンの平均. (d): 45セッションの反応潜時の平均

4 まとめ

下側頭皮質ニューロン集団の単一試行活動とサルの反応潜時の関係を調べた. 試行を色, パターン, 報酬によって分類し, それぞれのCIを計算した. その結果, サルは初期の試行で刺激と報酬の関係を学習しているにも関わらず, ニューロン集団は後半の試行で報酬による差が現れた. これは, 下側頭皮質のニューロン集団は行動と直接関連しないが, 長期的な経験によって報酬の有無を予測する情報をコードするようになった可能性を示す. 本研究で用いた単一試行の解析は, 基礎的な神経科学だけではなく, BMI研究にも役立つ.

謝辞: 本研究は科研費 (20700219, 20700356) の助成を受けたものである.

参考文献

- [1] K. Sakai and Y. Miyashita (1991) "Neural organization for the long-term memory of paired associates." *Nature*, **354**:152-155.
- [2] T. Mogami and K. Tanaka (2006) "Reward association affects neuronal responses to visual stimuli in macaque TE and perirhinal cortices." *J Neurosci*, **26**: 6761-6770
- [3] K. Uchiyama, N. Matsumoto, M. Shidara, and Y. Sugase-Miyamoto (2008) "Experience-dependent stimulus-reward/non-reward association during delayed conditioning." *Neurosci Res*, Supplement, p2-r17.
- [4] D. J. Freedman, M. Riesenhuber, T. Poggio, and E. K. Miller (2003) "A Comparison of primate prefrontal and inferior temporal cortices during visual categorization" *J Neurosci*, **23**:5235-5246