

平成 30 年 6 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26290004

研究課題名(和文)特徴次元統合における視覚的顕著性の神経加算様式の解明

研究課題名(英文)Neural computation in integrity of visual saliency

研究代表者

小川 正(OGAWA, TADASHI)

京都大学・次世代研究創成ユニット・特任教授/プログラスマネージャー

研究者番号：50311197

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：ニホンザルに視覚探索課題を遂行させ、後頭頂葉から単一ニューロン活動を記録した。

その結果、目標刺激の位置に関係なく、視覚探索で必要とされる注意レベルの強弱に依存して活動強度を変化させるニューロン群が見出された。これらのニューロン群は神経活動全体を底上げする効果が有り、視覚的顕著性の相対的強度を適応的に変化させている可能性がある。

さらに目標刺激を規定する特徴次元に選択的に視覚的顕著性を表現するニューロン群と、特徴次元に依らずに表現するニューロン群が混在していた。この結果は、LIP野が視覚的顕著性の次元統合過程において中間段階に位置することを示唆する

研究成果の概要(英文)：We trained monkeys to search for a target that was salient in the shape, color dimension, or both dimensions, and recorded the neuronal activity from the lateral intraparietal area (LIP) of monkeys performing visual search. We found two major properties in LIP neurons. First, some LIP neurons enhanced the magnitude of their activity, irrespective of the spatial location of the target, when the target was moderately salient (difficult search condition) than when it was quite salient (easy search condition). This result suggests that these neurons could contribute to enhance the activity of LIP neurons to achieve the neuronal threshold leading the saccade eye movement to the salient target. Moreover, other neurons exhibited the target discriminative activity only in one dimension (shape or color), suggesting that LIP is located at the intermediate stage in the representation visual saliency. Thus, our results revealed the mechanisms underlying neuronal representation of visual saliency.

研究分野：神経科学

キーワード：眼球運動 saliency 頭頂葉 サル 注意 視覚探索

1. 研究開始当初の背景

眼球運動で目標とする物体を探るとき、目標物体が周囲の物体と色や形で大きく異なる場合、目標物体は視覚的に顕著になる。例えば、多数の赤リンゴがあるなかで1つだけある色の異なる青リンゴがあると、視覚的に顕著になり注意を自動的に惹きつける(ボトムアップ型注意という)。さらに色だけでなく形も異なる黄色バナナが存在すると、注意はより目立つ黄色バナナの方に強く惹きつけられる。

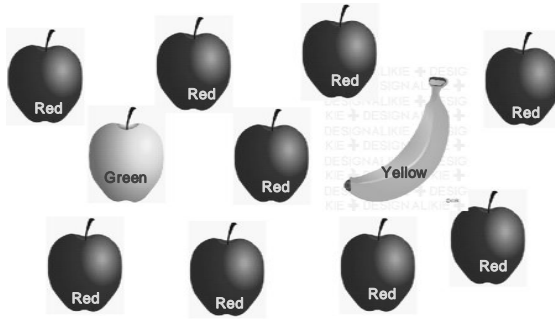


図1 視覚的顕著性と次元統合

我々は、日常生活において、多数の物体が存在する視覚環境から目標物体をサカード眼球運動によって探索している。目標とする物体がそれ以外の物体に比べて識別が容易な状況(目標物体が目立つ、視覚的顕著性が高い場合)では、視覚刺激の提示からサカード眼球運動の開始時刻までの反応時間が短くなり、逆に困難な状況(目標物体が目立たない、視覚的顕著性が低い場合)では反応時間が長くなることが知られている。

2. 研究の目的

作業仮説: 集中注意の強度を反映するニューロン活動の存在

目標物体の刺激特徴が周囲物体のそれと顕著に異なり、目立つ場合は視覚探索が容易になるが(図2A, Easy条件)、周囲物体の刺激特徴と差異が小さい場合は視覚探索が難しくなる(図2A, Difficult条件)。先行研究から、視覚探索が容易な条件では、目標刺激と妨害刺激に対するニューロン活動の差異が大きくなり目標識別が短時間で生じるが(図2B, 実線・赤矢印)、視覚探索が難しい条件では活動強度の差異が小さくなり目標識別が遅延する(図2B, 破線・青矢印)(Bichot et al., 2001; Nishida et al., 2013)。

これらの結果は、視覚探索が困難な条件よりも容易な条件でニューロン活動の変化が大きくなることを示唆している。しかしながら、「目標物体を選ぶための集中的注意は、視覚探索が容易な条件よりも難しい条件で必要

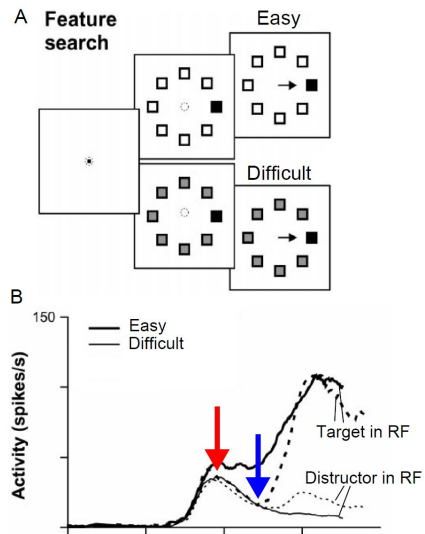


図2 視覚探索の難易度とニューロン活動とされる」ことから、難易度の高い視覚探索

で働くと考えられる集中的注意を従来の知見で説明することはできない。

本研究では集中的注意を説明できる神経機構を、視覚探索を遂行しているサルの頭頂間溝外側壁領域(the lateral intraparietal area, LIP)で見出すことを目的とする。

3. 研究の方法

2頭のニホンザルに、複数物体の中で1つだけ異なる物体を目標物体として眼球運動で探す視覚探索課題を訓練する。目標物体は色のみ、形のみ、色と形の両方で周囲物体と異なる場合がある。このような視覚探索課題を遂行しているサルの頭頂間溝外側壁領域(the lateral intraparietal area: LIP)からニューロン活動を記録した。記録したニューロン活動データに対して、スパイク波形によるソート解析を行い、単一ニューロン活動データに分類した。

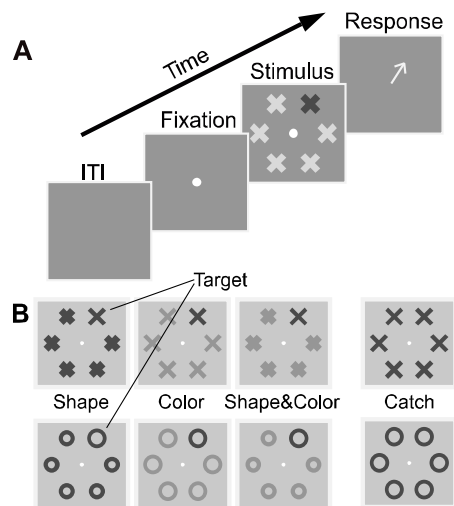


図3 提示した視覚探索の刺激

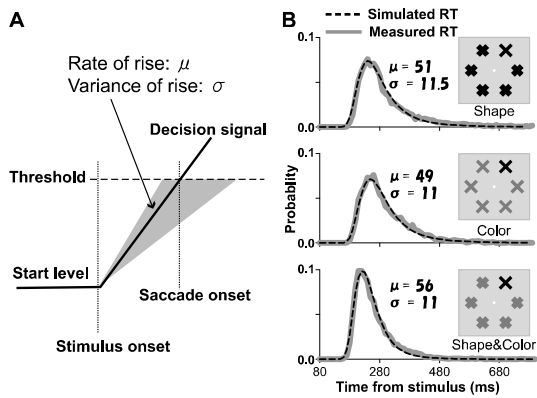


図4 行動データから目標刺激の顕著性を定量化する

一方、視覚的顕著性の強さを刺激呈示から目標に向かうサッカ一度眼球運動が生じるまでの反応時間を用いて行動学的に定量化した。定量化には、LATER モデル (Carpenter & Williams, Nature, 1995) を用いてサッカード潜時を推定するした。このモデルでは、行動決定信号は傾き (μ) の強さで増大し、予め定められた閾値 (s) に達するとサッカードが生じる (図 4 A)。但し、 μ には正規分布状のノイズ (σ) が付加されているので、潜時は後方に歪んだ分布となる。

図 4 B で示すように、実測の潜時分布 (灰色線) に最も近似する潜時分布 (破線) をつくる「傾き (μ)」を、その条件における視覚的顕著性信号の信号強度とする。ニューロン活動強度と行動データから推測された目標刺激の顕著性強度の関係性を明らかにした。

4. 研究成果

2 頭のサルから合計で 243 個のニューロンから計測し、視覚探索の難易度変化に対応して異なった特性を示す 2 種類のニューロン群が見出された。

注意レベルの強弱に伴って活動強度を変化させる LIP ニューロン

目標刺激の視覚的顕著性が高ければ反応時間 (サッカード潜時) は短くなり、顕著性が低ければ潜時は長くなる。単独、または複数の特徴次元で目立つ目標の顕著性強度を行動データ (サッカード潜時分布) から定量的に推定し、それが後頭頂連合野のニューロン活動においてどのように表現されているかを調べた。

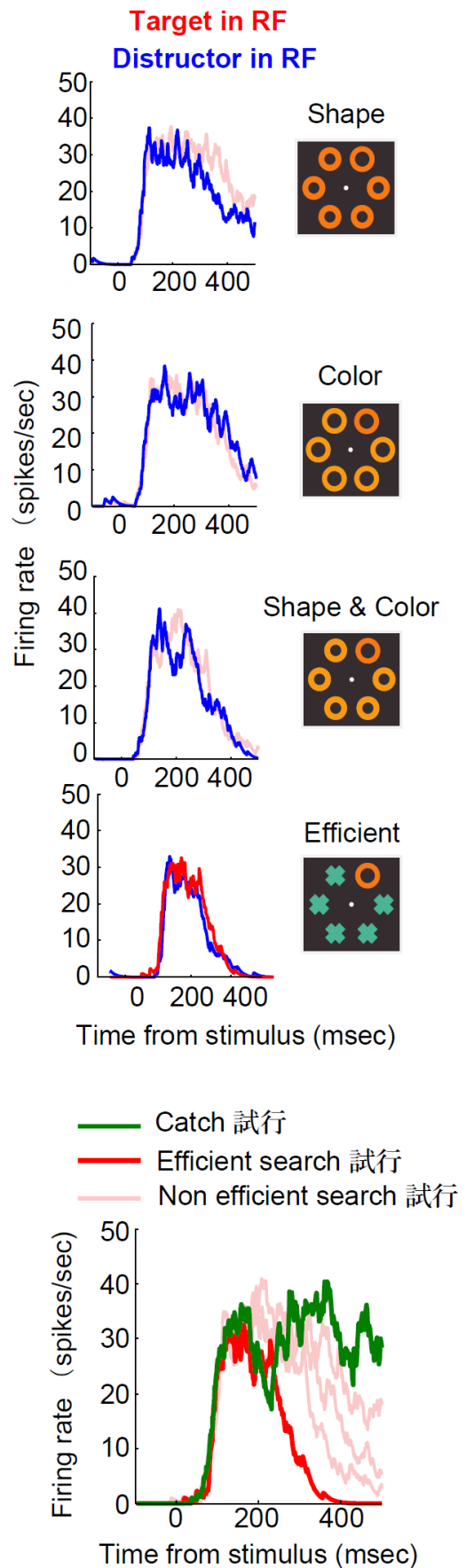


図5 注意強度に応じたニューロン活動

その結果、従来の saliency-map 仮説で予想されるニューロン活動（視覚的顕著性に依存した活動変化）だけではなく、目標刺激の位置に関係なく、視覚探索で必要とされる注意レベルの強弱に依存して活動強度を変化させるニューロン群が見出された。

これらのニューロン群では、受容野に目標刺激が呈示された場合と妨害刺激が呈示された場合で活動強度に差異が生じないが、目標刺激の探索難易度が增大するにつれて活動強度が大きくなる傾向を示した（i.e. 集中的注意が必要とされる条件で、より大きな活動強度を示す）。さらに、これらのニューロン群は、目標刺激が存在する条件では、目標刺激が呈示されない Catch 条件よりもニューロン活動強度が減弱することから、単純な視覚応答では説明できなかった。

このような性質をもつニューロン群は頭頂連合野における神経活動全体を底上げする効果が有り、目標位置に向かうサッカードが生じるときのニューロン活動の閾値を実質的には引き下げる効果があることが示唆された。

目標刺激を識別するニューロン群

目標物体の刺激特徴が周囲物体のそれと顕著に異なり、目立つ場合は視覚探索が容易になるが（Easy 条件）、周囲物体の刺激特徴と差異が小さい場合は視覚探索が難しくなる（Difficult 条件）。先行研究から、視覚探索が容易な条件では、目標刺激と妨害刺激に対するニューロン活動の差異が大きくなり目標識別が短時間で生じるが、視覚探索が難しい条件では活動強度の差異が小さくなり目標識別が遅延することが報告されている（Bichot et al., 2001; Nishida et al., 2013）。

これらの先行研究は、視覚探索が困難な条件よりも容易な条件でニューロン活動の変化が大きくなることを示唆している。実際、我々の実験においても、従来から報告されている特性を示すニューロン群が見いだされた。

受容野に目標刺激が呈示された場合は妨害刺激が呈示された場合に比べてニューロン活動が増大しており、受容野刺激が目標であるか否かを識別することが可能であった。しかしながら、目標刺激の探索難易度が增大するにつれて活動強度が弱まる傾向を示す（i.e. 集中的注意が必要とされる条件で活動強度が弱まる）。このような性質は、注意強度とは逆の関係となっていた。

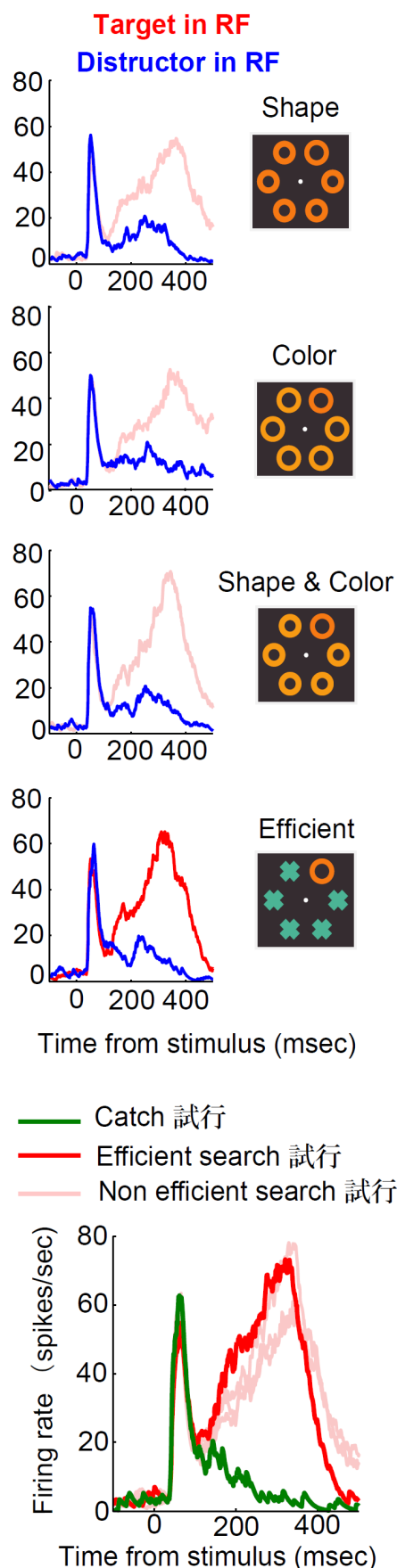


図6 目標位置を識別するニューロン活動

特徴次元依存性を保持した視覚的顕著性を表現する LIP ニューロン

LIP 野では、目標となる刺激を規定する特徴次元に特異的に視覚的顕著性の強弱を表現するニューロン群と、特徴次元に依らずに視覚的顕著性を表現するニューロン群が混在していた。この結果は、LIP 野が次元統合過程に位置することを強く示唆するとともに、最終的なおける視覚的顕著性の表現は、LIP 野よりも後段の神経過程で表現されている可能性を示した。

注意強度依存性を示すニューロン群の機能的役割

先行研究から、前頭前野 (the frontal eye field, FEF) や上丘 (the superior colliculus, SC) の movement cells の活動強度が一定の閾値に達したときサカード眼球運動が生じることが知られている (閾値仮説)。

LIP ニューロンは FEF や SC に直接神経投射しており、これらの領野に存在する movement cells を駆動する信号源になっている可能性があるが、目標刺激を識別するニューロン群は、探索難易度が高い条件で活動強度が減弱しているためそのままでは閾値仮説に合致しない。

しかしながら、注意強度依存性を示すニューロン群は探索難易度が高い条件で活動強度が増大するため、2 種類のニューロンタイプが同時に FEF や SC の movement cells に入力されていると、両者のニューロンタイプが補い合い、サカード開始時に同程度の活動強度を生起することが可能になると考えられる。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

(1) Different target discrimination times can be followed by the same saccade initiation timing in different stimulus conditions during visual searches. Tanaka T, Nishida S, Ogawa T. Journal of neurophysiology 114(1) 366-380 2015.

(2) Transition of target-location signaling in activity of macaque lateral intraparietal neurons during delayed-response visual search. Nishida S, Tanaka T, Ogawa T. Journal of neurophysiology 112(6) 1516-1527 2014.

(3) Discharge-Rate Persistence of Baseline

Activity During Fixation Reflects Maintenance of Memory-Period Activity in the Macaque Posterior Parietal Cortex. Nishida S, Tanaka T, Shibata T, Ikeda K, Aso T, Ogawa T. Cerebral Cortex 24(6) 1671-1685 2014.

[その他]

脳科学辞典 (<https://bsd.neuroinf.jp/>)
視覚性トップダウン型注意とボトムアップ型注意, 小川正, DOI : 10.14931/bsd.7335

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

小川 正 (OGAWA TADASHI)

京都大学・次世代研究創成ユニット・特任教授/プログラムマネージャー

研究者番号 : 50311197

(2) 研究分担者

三浦 健一郎 (MIURA KENICHIRO)

京都大学・大学院医学研究科・助教

研究者番号 : 20362535