

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H04487

研究課題名（和文）皮質における光景表現の形成 --- 面・物体・光景をつなぐ階層的中間表現

研究課題名（英文）Conformation of the cortical representation of scene

研究代表者

酒井 宏 (Sakai, Ko)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：80281666

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、視覚系が自然光景を理解する過程において、物体特徴等の局所情報が物体ごとに選択的に統合されて、複数の物体が表現され、大域的な光景表現が形成されていく機序を明らかにすることを試みた。サルV4からの神経記録の解析と計算実験、ヒト心理物理実験を総合して、単一細胞・回路網・領野間の3レベルからアプローチした。具体的には、単一細胞レベルで複数の物体特徴が表現され、これらの集団によって前駆物体の部分的な特徴が表現されることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自然光景には多数の物体が含まれている。光景を正しく理解するためには、光景を物体ごとに分離する図地分離を正しく行う必要がある。本研究は、電気生理学・ヒト心理物理学・計算論的神経科学を統合して、図地分離の皮質計算過程の理解に寄与した。具体的には、V4の単一細胞が複数の特徴を符号化すること、細胞が集団として図地を表現すること、LFPの位相コヒーレンスが表現に寄与していることを示した点に学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：The present project studied the cortical representation of multiple objects and the integration of local object features, which construct the representation of global scenes through the visual pathway for understanding the natural scenes. We performed the analysis of the neural recordings from monkey V4, human psychophysics, and computational analysis, and showed the representation of object features and proto-objects in the individual neurons and the population of them.

研究分野：認知科学

キーワード：認知科学 神経科学 実験系心理学 情報工学 視覚

1. 研究開始当初の背景

ヒト視覚系の主要な目的は、眼前に広がる光景を理解することにある。これまでの研究によって、視覚各領野の細胞の選択性が明らかになり、階層的分散処理の構造も明らかになってきた。一方で、単一細胞のもつそれぞれの選択性では、物体や光景の表現はできないことが判ってきた。物体認識に関しては、輪郭・図方向・曲率・中心軸などの特徴に対する選択性は報告されたが、特徴を物体ごとに統合する機構や、領野を超えてどのように選択・統合が進められて物体認識や光景理解に向かうのか、さらに大域的な情報や知識がどのように局所の情報と統合されるのか、は判っていない。

2. 研究の目的

本研究では、視覚経路に沿って、どのように物体特徴が皮質で理解されていくか、特徴がどのように選択的に統合されて、どのような中間表現を経て、光景が形成されていくかという根源的な問題にアプローチした。具体的には、単一細胞レベルで複数の形状特徴が表現される、細領野を超えて情報が選択・統合されて、細胞集団が前駆物体(proto-object)を表現する、との仮説を提案・検討した。

具体的には、視覚系が自然光景を理解する過程において、物体特徴等の局所情報が物体ごとに選択的に統合されて、複数の物体が表現され、大域的な光景表現が形成されていく機序を明らかにすることを目的とした(図1参照)。局所情報を処理する単一細胞、その集団による回路網、さらに領野を超えた情報の伝達と処理、それぞれのレベルにおいて、物体と光景がどのように皮質で理解されていくかを検討した。特に、それぞれの中間表現とその形成機序に注目して、光景がどのように理解されていくかを研究した。

本研究では、図地・輪郭を含む特徴の統合によって前駆物体(proto-object)の特徴/部分が表現されることを示しことを目的とした。このために、単一細胞が、多次元の特徴空間内の部分を選択することで、前駆物体の特徴が統合・表現されることを示した(図2参照)。特に、微小多電極による自然画像/光景に対する視覚皮質 V4 の細胞反応の解析によって、次のことを示すことを目的とした：

- (1) 各画像特徴に対する(単次元)受容野の推定。
- (2) 細胞集団としての選好性の推定。
- (3) 自然光景・各特徴を表現するために必要な次元の推定。
- (4) 多次元特徴空間における細胞の選択性の同定。

3. 研究の方法

視覚系では、光景は網膜において光点に分解され、それが輪郭・面・形状と再構成されて物体や光景が認識されていく。光景には一般に複数の物体がある。分解された情報が、それぞれの物体を超えて混交することなく、物体毎に形状等の特徴が正しく分離されて統合されていく必要がある。本研究では、単一細胞、細胞集団、領野間帰還、それぞれのレベルにおける選択統合の機序について創造的な仮説を提案した。仮説を検討するために、多点微小電極からの V4 細胞応答の記録を解析した。細胞応答は信号分離によって単一細胞の応答に分離した。

[1] 単一細胞が、複数の画像特徴を同時に符号化する多次元選択性を有するとの仮説を検討した。これには、自然画像刺激と微小多電極記録を組み合わせた実験解析を基礎とした。この方法によって、従来のように狙った特定の選択性を解析するのではなく、多数の(場合によっては未知の)選好性が、多数の細胞によってどのように表現されているかを示すことができた。

[2] 細胞集団による回路の表現とその機序について検討した。これには、次元解析を行なって、



図1. 物体の特徴は、物体毎に統合し、他の物体のものと混交してはいけない。この例では、多数の曲線を各人毎に選択・統合しなければならない。自然画像では、複数の特徴/属性が統合される。

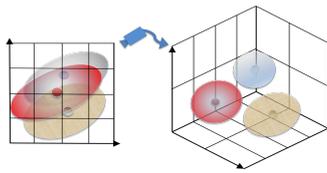


図 2. 次元を上げる(左:2D→右:3D)と構造を分離できる。次元を上げると、3細胞が真に何に反応するかが見えてくる。

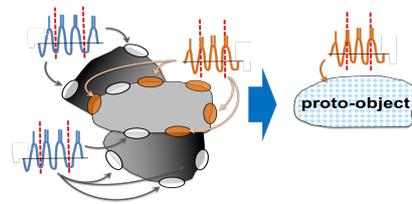


図 3. LFP 位相が同期する下層(左)細胞からの発火が上層(右)に伝搬し、単一物体の情報が選択的に統合され前駆物体が形成される。下層上下の物体は中の物体とは逆位相なので前駆物体に伝わらない。

情報論的に集団を形成する細胞の数を推定した。これを基に、細胞集団が内包する情報を機械学習を利用して明らかにした。提示した刺激と細胞群応答の関係を解析して、細胞集団の表現を明らかにした。特に、物体の中間表現”proto-object”“に対応する表現を探索した。

[3] V1 - V4 で同時記録した LFP から、位相同期による選択的な信号伝達について解析した (図 3 参照)。

4. 研究成果

(1) 単一細胞による物体特徴の表現

視覚系が自然光景を理解する過程において、物体特徴等の局所情報が物体ごとに選択的に統合されて、複数の物体が表現されていく機序を明らかにするために、まず、単一細胞および近傍細胞集団による物体特徴の表現と統合について研究した。微小多電極によって記録した多数・多様な自然画像に対するサル視覚皮質の中間領野 V4 における細胞反応を解析した。呈示画像の特徴を解析し、これら特徴に対する各細胞の選好性を解析した。呈示した自然画像が様々な特徴をもつ物体を含む光景であることに着目し、個々の細胞がどのような選好性を示すかに注目して解析した。輪郭・図方向・色といった特徴に対する受容野構造を推定した。V4 の細胞は、輪郭や図方向という高次情報を符号化していることが知られている。このために従来はフォーマルな受容野推定が困難と考えられていたが、本研究では輪郭・図方向に注目した STA (Spike Triggered Average) 法を提案し、これが実用することを示した。STA 法による解析結果は、細胞が輪郭の曲率や方位に加えて、受容野およびその周辺の図領域を表現していることを示した。

(2) 細胞集団による表現

呈示画像の特徴を解析し、これら特徴に対する各細胞の選好性を解析した。図方向・図領域に注目して個々の細胞の選好性を推定した受容野構造を基礎として、複数の特徴 (e. g., 形状・輪郭・テクスチャ) に対してどのような選好性をもつか、図領域を含めてどのような組み合わせを示すか、に注目して解析した。さらに、形状(輪郭)と面(テクスチャ)に着目して、自然テクスチャを有する自然画像と、そのシルエット(白黒 2 値)画像に対する神経反応の強度・潜時・次元等の関係を解析し、特徴融合の機構理解を試みた。この結果、形状と面は独立でもなく共通でもない符号化をしていることが示され、混合選択性を含めた冗長性の高い符号化をしている可能性があることが判った。特に、これらの表現は細胞個々によっては十分に表現され得ず、数十個程度の細胞集団によって信頼できる表現になり得ることが判った。

(3) V4 における物体の中間表現

呈示画像の特徴を解析し、同時にこれら特徴に対する各細胞の選好性を解析する方法を使って、V4 における輪郭形状とその内包する面に関わる中間表現を明らかにした。個々の細胞が示す図方向・図領域に注目した受容野構造、個々の細胞が示す複数の特徴に対する選好性に注目しながら、細胞群が有する次元解析を行なった。生理実験では刺激数と細胞数は有限であるが、ここでは外挿によって無限の刺激数・細胞数に対する次元を推定した。この結果、約 40 の細胞によって一つの proto-object が表現され得ることが判った。さらに、それぞれの次元が何を表現しているのか、複数の刺激特徴をどのように統合しているかに注目して解析した。その結果、刺激特徴が生起するヒト知覚に対応する神経応答があることが判った。

(4) LFP 位相による選択的統合

位相同期による選択的統合を基礎とする前駆物体形成の回路機序について研究を進めた。単一細胞によって表現される局所的な特徴が、細胞群による神経回路によって、物体毎に選択的に統合されているとの仮説の検討を行なった。局所フィールド電位(LFP)の位相コヒーレンス(緩

やかな同期)を基礎として、選択的統合が生じ、前駆物体の表現が形成されるとの機序を検討した。このために、まず、キャリアとなる γ 波が、比較的寿命の短い波($<1\sim 3s$)であることを示し、臨界崩壊によって生じている可能性を示した。この結果は、比較的短時間($\sim 1s$)の γ 波の位相コヒーレンスによって神経信号が選択・統合されて前駆物体が形成されえるとの仮説を検討する基礎となった。

局所フィールド電位(LFP)の位相コヒーレンス(緩やかな同期)を基礎として、選択的統合が生じ、前駆物体の表現が形成されるとの機序を検討するために、LFP波形のダイナミクス解析を実施した。LFPは極めて非定常な現象であることが知られているが、そのダイナミクスは殆ど判っていない。本研究では、LFPを特徴的なspindleに分解することをNMF(非負行列分解)によって試みた。そして、それぞれのspindleが異なる細胞集団からの断続的な信号伝達であるとの仮説を検討した。特に、spindleの振幅強度に関わらず、それらが共通にもつ特徴を探索した。これによって、LFPによる情報選択・伝達の機構理解を試みた。解析の結果から、領野を超える(V1 - V4)選択的信号伝達が行われていることが判った。このことは、物体中間表現がV4細胞群によって符号化されていることを考え合わせると、サルV4細胞が群としてダイナミックに面の中間表現を形成していることを示唆する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Shishikura Motofumi, Tamura Hiroshi, Sakai Ko	4. 巻 16
2. 論文標題 Correlation between neural responses and human perception in figure-ground segregation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Systems Neuroscience	6. 最初と最後の頁 1~17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnsys.2022.999575	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 -
1. 著者名 Kodama Atsushi, Kimura Kouji, Sakai Ko	4. 巻 153
2. 論文標題 Dimensionality of the intermediate-level representation of shape and texture in monkey V4	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 444~449
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.neunet.2022.06.027	査読の有無 有
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 Kimura Kouji, Kodama Atsushi, Yamane Yukako, Sakai Ko	4. 巻 17
2. 論文標題 Figure-ground responsive fields of monkey V4 neurons estimated from natural image patches	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 0268650~0268650
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0268650	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 -
1. 著者名 Sakai Ko, Sakata Yui, Kurematsu Ken	4. 巻 11
2. 論文標題 Interaction of surface pattern and contour shape in the tilt after effects evoked by symmetry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1~12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-87429-y	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 -

1. 著者名 Machida Itsuki, Kodama Atsushi, Kimura Kouji, Shishikura Motofumi, Tamura Hiroshi, Sakai Ko	4. 巻 1517
2. 論文標題 Cortical Coding of Surface Textures and Contour Shapes in the Intermediate-Level Visual Area V4	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications in Computer and Information Science (CCIS), Springer	6. 最初と最後の頁 37 ~ 45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-92310-5_5	査読の有無 有
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 Yamane Yukako, Kodama Atsushi, Shishikura Motofumi, Kimura Kouji, Tamura Hiroshi, Sakai Ko	4. 巻 15
2. 論文標題 Population coding of figure and ground in natural image patches by V4 neurons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0235128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0235128	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 -

1. 著者名 WAGATSUMA Nobuhiko, URABE Mika, SAKAI Ko	4. 巻 E103.D
2. 論文標題 Perception and Saccades during Figure-Ground Segregation and Border-Ownership Discrimination in Natural Contours	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 1126 ~ 1134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2019EDP7020	査読の有無 有
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 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 M. Shishikura, U. A. Ernst, I. Grothe, A. K. Kreiter and K. Sakai
2. 発表標題 Gamma activity spindles in V4 LFPs are modulated by stimulus dynamics and attentional demand.
3. 学会等名 Society of Neuroscience, Annual Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Shishikura, H. Tamura and K. Sakai
2. 発表標題 Population responses of monkey V4 neurons correlate with human figure-ground perception.
3. 学会等名 NEURO 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本雅之、酒井 宏
2. 発表標題 3次元形状知覚の照明依存性 ~ 照明画像の統計的解析 ~
3. 学会等名 日本視覚学会 夏季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 樹神 篤, 酒井 宏
2. 発表標題 サルV4野の神経反応が示す次元数の推定
3. 学会等名 第31回日本神経回路学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Shishikura, K. Kimura and K. Sakai
2. 発表標題 Figure-ground consistency across natural image patches in monkey V4.
3. 学会等名 Asia-Pacific Computational and Cognitive Neuroscience Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Kodama, and K. Sakai
2. 発表標題 Temporal development and dimensionality of figure-ground signals in monkey V4.
3. 学会等名 The 8th RIEC International Symposium on Brain Functions and Brain Computer (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Matheus Boger and Ko Sakai
2. 発表標題 Voluntariness based separation of attentional mechanisms in a visual search task - A possible indication for a new paradigm.
3. 学会等名 映像情報メディア学会、ヒューマンインフォメーション研究会、3月
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 町田 樹, 樹神 篤, 酒井 宏
2. 発表標題 V4 における表面と形状の同時表現
3. 学会等名 電子情報通信学会、ニューロコンピューティング研究会、3月
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Shishikura and K. Sakai
2. 発表標題 Packet-based selective information transmission through gamma oscillations in monkey V4 local-field-potentials during attention task.
3. 学会等名 令和2年度電気通信研究所共同プロジェクト研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 穴倉基文, 山根ゆか子, 田村 弘, 酒井 宏
2. 発表標題 サルV4野FG選好性細胞の応答とヒト図地知覚の一貫性の相関解析
3. 学会等名 第30回日本神経回路学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 町田 樹, 樹神 篤, 酒井 宏
2. 発表標題 サルV4における表面と形状の同時表現
3. 学会等名 第30回日本神経回路学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴田紀代, 酒井 宏, 栗木一郎
2. 発表標題 感情によるユニーク色知覚の変化
3. 学会等名 日本視覚学会 夏季大会
4. 発表年 2020年

〔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
研究 分 担 者	山根 ゆか子 (Yamane Yukako) (70565043)	沖縄科学技術大学院大学・神経計算ユニット・スタッフサイ エンティスト (38005)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	我妻 伸彦 (Nagatsuma Nobuhiko) (60632958)	東邦大学・理学部・講師 (32661)	

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			
ドイツ	University of Bremen			