

令和元年6月25日現在

機関番号：82401

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2013～2017

課題番号：25120004

研究課題名（和文）スパースモデリングから脳における視覚物体像の時空間表現に挑む

研究課題名（英文）Sparse modeling to approach spatial and temporal representation of objects in the brain

研究代表者

谷藤 学（Tanifuji, Manabu）

国立研究開発法人理化学研究所・脳神経科学研究センター・チームリーダー

研究者番号：60197530

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 55,800,000円

研究成果の概要（和文）：物体像表現の空間構造の解明（課題1）においては、高次視覚連合野に「物体の意味的カテゴリ」に選択的なクラスター（ドメイン）が形成されていること、初期視覚野の特異点（Pinwheel）が皮質の中でU形に折れ曲がり皮質上の隣接する特異点をつなぐひも状の構造をしていることを、物体像表現の空間構造と時間構造の統合理解（課題2）においては、物体像の提示位置によって、視覚情報が異なる神経回路メカニズムによって低次から高次に送られていることを、脳における物体像のスパース表現の意味の解明（課題3）においては、高次視覚連合野における物体像のスパース表現において個々の細胞がコードしている図形特徴を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

初期視覚野の特異点の折れ曲がり構造の発見は、1950年代に電気生理学的な研究から信じられてきた仮説を覆す結果になっており学問上のインパクトがある。
提示される物体像の視野上の位置によって異なる神経回路が使われていることを明らかにした研究は、従来のFeed forward network の考え方に修正が必要であることを示唆しており学問上のインパクトがある。
高次視覚野の図形特徴を明らかにした研究は、物体像処理のような多層ネットワークの構造を解析することにも使える手法であるため、AIが主流となりつつある社会において高い意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：In the sub-project, “the spatial structure essential for object representation”, we found (1) object category selective domains in inferior temporal (IT) cortex by using dense electrode recordings, (2) singularity strings in primary visual cortex where orientation singularity forming hairpin trajectories in 3D cortical space. In the sub-project, “Temporal structure essential for object representation”, we found that different neural circuits mechanisms along the ventral visual pathway are used depending on the position of object images in the visual field. In the sub-project, “Sparse representation of objects in IT cortex”, we successfully identified visual features represented by view tuned face neurons in IT cortex that enables view-invariant face representation.

研究分野：システム神経科学

キーワード：物体認識 顔認知 深層学習

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

脳研究の進展によって、感覚情報は多数の神経細胞の組み合わせによって表現されていることがわかってきた。従って、カテゴリーの分離、個別対象の分離、擾乱に対してロバストな情報表現、など、脳における情報表現の諸問題は、個々の神経細胞の応答から説明することは難しく、神経細胞の応答で張られる高次元空間の中でのクラスタリングとそのダイナミクスという枠組みでの理解が必要になる。本研究では、特に、物体像の視覚的な認識のメカニズムに焦点を当てて、この枠組みのもとで研究する。私たちは、物体像が照明の違い、他の物体の陰になっている、視点が違うなどの擾乱のために画像として同一ではなくても正しく個々の物体を同定し、また、カテゴリーを判別できる。この不変的な物体認識に着目し、視覚連合野の神経細胞集団の活動を記録し、スパースモデリングにより、高次視覚野での視覚情報表現の持つ特質を数理的な立場から研究する。

2. 研究の目的

具体的には、次の三つの課題を設定する。

【課題 1】物体像表現の空間構造の解明

高次視覚野において異なる空間スケールで物体像が表現されていることが示唆されている。この知見に基づき、物体を表現する図形特徴とその空間構造を明らかにし、スケールの異なる空間の機能的な関係を解明する。

【課題 2】物体像表現の空間構造と時間構造の統合理解

行動動物から神経活動を記録した研究から、物体に対する細胞の応答は複雑な時間構造を持つことが知られている。本課題では【課題 1】の空間構造に関する知見をもとに、物体像の表現に関して、空間構造と時間構造を統合し理解する。

【課題 3】脳における物体像のスパース表現の意味を解明する

本課題では、【課題 2】で明らかにされた物体像の時空間表現から、脳においてスパースな表現が使われている意義を解明する。

3. 研究の方法

【課題 1】物体像表現の空間構造の解明

下側頭葉視覚連合野 TE において、視覚情報を運ぶ神経ユニットには、神経細胞だけでなく、それが集まったカラム構造、さらにカラムが集まったドメイン構造の少なくとも三つの空間スケールの異なる構造があると考えられる。空間スケールの異なる構造を明らかにするために、多電極アレイを用いて神経活動の記録を行う。

物体像をそれぞれ短時間(100ms)、かつ、連続してサルに提示することで、数千個の物体像の応答を記録する。視覚刺激は、異なる個体・性別のサル、ヒト、様々な視点からの物体像など、視覚認識において意味を持つ物体カテゴリーによって構成する。

同時記録された神経ユニットの応答は各ユニットを軸とする高次元空間の中での数千個の物体像の分布として捉えられる。高次元空間の構造的な特徴を機械学習の手法を用いて解明する。

これらの空間構造においては大脳皮質が2次元の平面として近似されている。しかし、大脳皮質には厚みがあって、異なる深さで違う応答様式を持つ可能性がある。機能の3次元可視化技術である機能的 OCT を低次視覚野に適用し、その可能性を探る。

【課題 2】物体像表現の空間構造と時間構造の統合理解

時間構造の解析には行動中の動物を用いる。そのため、麻酔下の実験のように、多くの物体像を

刺激に用いて応答を記録することは實際上困難である。【課題 1】の研究から絞り込まれた物体像を使って計測を行う。応答の時々刻々の変化は、一般的に行動課題依存的である。しかし、ここではどのような行動課題でも基本的なモードとして持っている時間構造を対象とする。そこで、もっとも単純な物体像に対する注視課題を動物に課し、注視している物体像に対する応答を、【課題 1】で用いた電極アレイにより多くの神経ユニットから同時に記録する。また、記録された応答パターンを【課題 1】で用いた手法を時間軸に拡張した方法によって解析する。

【課題 3】 脳における物体像のスパース表現の意味を解明する

【課題 1】で記録されたたくさんの物体像に対する神経応答から神経ユニットが符号化している図形特徴を推定する。具体的には自然画像の中にユニットが符号化している図形特徴の良いモデルがあると仮定し、膨大な数の自然画像断片のそれぞれについて物体像応答を推定し、実際の神経ユニットの応答の間でもっとも高い相関を持つものを探索する。応答の推定には、画像断片と物体像の間のユークリッド距離を用いるが、距離は、初期視覚野における低次の視覚情報処理を考慮して、画素空間ではなく局所的な方位と色の空間上で測る。

4. 研究成果

紙面の都合上、ここでは主な成果だけ、ピックアップする。

【課題 1】

TE 野における機能構造が階層的に構成されていること、すなわち、(1)似た図形特徴に反応している細胞はコラムを作っていて、(2)同じ物体カテゴリーに含まれる図形特徴群に反応するコラムは集まってドメインを作っていることを明らかにした。ドメインには、はっきりとわかる物体カテゴリー、例えば顔や身体、に選択的に応答するものがあつた。各階層の機能構造ユニットの組み合わせによって物体像が多重に表現されていると考察した(発表論文9)。

初期視覚野の方位選択性コラムは脳表面上で風車状に配列されている。風車の羽根の一枚一枚が異なる方位を符号化するコラムで、風車の中心に相当する部分は様々な方位のコラムが一つに集まった特異点になっている。また、方位の並びの順番によって、特異点には時計回り(CW)と反時計回り(CCW)のものがある。我々は、初期視覚野の機能構造の3次元可視化を行い、(1)風車の羽根の部分では電気生理学的な研究から示唆されるように、脳表面から白質に向かって同じ方位に応じる領域が伸びているが、(2)CWとCCWの特異点は皮質の中で折れ曲り互いに繋がっていることを明らかにした(発表論文4)。

【課題 2】

我々の視覚は、心的な状態によって影響を受ける。このことから、高次視覚野における物体表現もダイナミックに変化していると考えられる。我々は行動動物を用いてコラムの物体像応答に対する空間的な注意の影響を検討し、コラムの受容野の形が空間的な注意によって形を変えることを明らかにした(発表論文5)。

【課題 3】

顔の応答するコラムの集まった領域を対象に、顔コラムの図形特徴を推定した結果、自然画像の断片の中に個々のコラムが符号化している図形特徴の良いモデルとなるものが見出された。モデルから推定される顔の向きに対する選択性は神経応答のそれとよく合致し、85%の顔コラムについて統計的有意な相関を示した($p < 0.05$)。この研究から、(1)高次視覚野でコラムが符号化している特徴は、自然画像の中の局所的な方位と色の組み合わせでうまくモデル化できること、(2)特に、顔コラムが符号化している特徴は、典型的な2、3箇所の方方位の組み合わせを含んでいることが多いこと、(3)顔の向きに対する選択性は、顔の3次元の向きの変化

によって起こるこれらの局所的な特徴の部分的な変化によるのであって、いわゆる顔の特徴(目、鼻、口)が先に検出されてそれらの組み合わせが顔の向きによって変化することを反映しているわけではないこと、(4)抽出された複数の特徴で張られる空間の中で個人個人の顔が向きに非依存的に表現されていること、が明らかにすることができた(発表論文3)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- 1 Nakamichi Y., Okubo K., Sato T., Hashimoto M, Tanifuji M. (2019) Optical intrinsic signal imaging with optogenetics reveals functional cortico-cortical connectivity at the columnar level in living macaques. *Scientific Report* 9, 6466 (査読あり)
- 2 Uchida G., Tanifuji, M. (2018) Transition rate dependence of interspike interval distributions of model neurons driven by two-state fluctuating input, *Phys. Rev. E* **98**, 032416-16 (査読あり)
- 3 Owaki, T., Vidal-Naquet, M., Nam, Y., Uchida, G., Sato, T., Câteau, H., Ullman S., Tanifuji, M. (2018) Searching for visual features that explain response variance of face neurons in inferior temporal cortex. *PLoS ONE* 13, e0201192 (査読あり)
- 4 Nakamichi, Y., Kalatsky, V. A., Watanabe, H., Sato, T., Rajagopalan, U.M., Tanifuji, M. (2018) 3D topology of orientation columns in visual cortex revealed by functional optical coherence tomography. *J. Neurophysiol.*, 119, 1562-1575 (査読あり)
- 5 Obara, K., O'Hashi, K., Tanifuji, M. (2017) Mechanisms for shaping receptive field in monkey area TE. *J. Neurophysiol.*, 118, 2448-2457 (査読あり)
- 6 Watanabe, H., Rajagopalan, U.M., Nakamichi, Y., Igarashi, K., Kadono, H., Tanifuji, M. (2016) Functional optical coherence tomography of rat olfactory bulb with periodic odor stimulation. *Biomed. Opt. Express*, 7, 841-854 (査読あり)
- 7 Uchida, G., Tanifuji, M. (2014) Independent noise enhances synchronization in heterogeneous systems. *Journal of the Physical Society of Japan* 83, 093801 (査読あり)
- 8 Murata T, Hamada T, Shimokawa T, Tanifuji M, and Yanagida T, (2014) Stochastic process underlying emergent recognition of visual objects hidden in degraded images. *PLoS One*, 9(12), e115658 (査読あり)
- 9 Sato T., Uchida G., Lescroart M.D., Kitazono J., Okada M, Tanifuji M. (2013) Object representation in inferior temporal cortex is organized hierarchically in a mosaic-like structure. *J Neurosci* 33, 16642-16656 (査読あり)

[学会発表] (計 5 件)

1. Tanifuji M., “Searching for visual features driving face neurons in the higher visual cortex, inferior temporal cortex, in macaque monkeys” IEEE International Symposium on Video and Audio Signal Processing in the Context of Neurotechnologies St. Petersburg Russia 6 2017
2. Tanifuji M., “Machineries for forming center and periphery of receptive fields in monkey anterior inferior temporal cortex” IEEE International Symposium on Video

and Audio Signal Processing in the Context of Neurotechnologies St. Petersburg
Russia 7 2017

3. Tanifuji M, “Topology of orientation columns in visual cortex revealed by functional optical coherence tomography” Asia Pacific Conference on Vision Tainan Taiwan 7 2017
4. Tanifuji M, “View angle maps inside the face selective sub-region of anterior inferior temporal cortex” The 6th FAONS Congress and the 11th Biennial Conferences of CNS Wuzhen, China 9 2015
5. Tanifuji M, “Underlying Cortical Function and Structure for Object Recognition” The 5th Cinet General Conference Osaka 10 2015

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年 :

国内外の別 :

○取得状況 (計 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年 :

国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名 : 内田豪

ローマ字氏名： Go Uchida

所属研究機関名：理化学研究所

部局名：脳神経科学研究センター

職名：専門職研究員

研究者番号 (8 桁)：50321732

研究分担者氏名：大橋一徳

ローマ字氏名： Kazunori O'hashi

所属研究機関名： 国立研究開発法人国立精神・神経医療研究センター

部局名：疾病研究第3部

職名：流動研究員

研究者番号 (8 桁)：90617458

研究分担者氏名：佐藤多加之

ローマ字氏名： Takayuki Sato

所属研究機関名：理化学研究所

部局名：脳神経科学研究センター

職名：研究員

研究者番号 (8 桁)：20391964

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。