

脳の広範な活動を図形として可視化

神経細胞活動を可視化する技術を用い、脳の視覚認知に関わる活動を幾何学図形として抽出しました。物を認識したり記憶を思い浮かべたりする際に、側頭葉から前頭葉の神経細胞活動が刻々と変化し、異なる図形として可視化できました。さまざまな生活で観察される脳活動の抽出に役立つと期待されます。

起床して時間を確認し、家を出て会社に着き、仕事をする。私たちのそんな日常生活の裏では、脳神経細胞が活動し、複雑に絡み合った事柄を処理しています。本研究チームは2023年7月、このような日常生活のさまざまな場面で起こる脳の神経細胞の活動を簡便に可視化する数理解析技術(PCArs)を開発、公表しました。PCArs技術は、観測された脳神経細胞の活動データの中で、どの事象が最も大切なのか、複数の活動があるのかなどを見つけ出すことができます。

本研究では、PCArs技術をサルの側頭葉から前頭葉までの広範な脳部位の神経細胞活動に当てはめました。提示される図形を見て物の位置を覚える活動、提示された図形がもらえる餌の手がかりになる状況の活動など四つの行動状況を解析しました。その結果、物体の認識に関わる側頭領域ほど幾何学図形が円に近い割合が多かった一方で、記憶領域と考えられる海馬や前頭葉ではカーブや直線の幾何学図形の出現が増えました。

このように幾何学図形に基づいて神経活動を分類した結果、視覚情報の認知・記憶・判断過程における神経集団の活動は時々刻々と変化し、異なる幾何学図形に分類されることが分かりました。

この技術を脳全体の神経細胞活動に適用することで、時々刻々と変化する脳全体の活動をリアルタイムで画像化することが可能となります。その結果、脳の新たな情報処理の仕組みの発見につながることを期待されます。

研究代表者

筑波大学医学医療系

山田 洋 准教授

研究の背景

朝、時計を見て時間を確認し、家を出る。その時、会社までの道のりを想起する。それは脳の神経細胞が活動しているからこそ起きることです。そして、最終的に会社に到着する。その時にも、道中の出来事や仕事の内容などを思い浮かべたりするかもしれません。このように脳は日常生活の中で、複雑に絡み合ったさまざまな事柄を処理しています。本研究チームはこのような日常生活の場面で起こる脳神経細胞活動を可視化できる簡便な数理解析技術(PCArs)^{注1)}を開発しました。今回は、この技術を脳の広範な領域の活動に適用しました。

研究内容と成果

前回の研究¹⁾では、実験で得られる複数のデータタイプに対応した解析手法とするため、二つの異なるデータタイプを持つ研究チーム（北京大学の納家勇治主任研究員ら、量子科学技術研究開発機構の南本敬史グループリーダーら、筑波大学の山田洋准教授ら）が集まりました。今回はその研究チームが集めた全ての脳活動データ（四つの実験から得られた10カ所の脳領域の神経細胞活動データ）を解析しました。解析にあたっては情報物理学の専門家（立命館大学の坪泰宏教授）の協力を得て、出現した図形の定量的な判別を行いました。

研究に用いた実験データのの一つが、訓練を受けたマカクザル（以下、サル）が、ヒトと同じように確率と量の違いを認識してギャンブルをする際に記録された脳神経細胞活動のデータです（図1 A-C）。カジノでギャンブルをするような状況の神経細胞活動です。また、サルに図形の形と場所を提示して覚えさせ、それを後に思い出して答える行動課題を訓練した際に記録された、図形の形と位置の記憶に関わる神経細胞活動のデータ（図1 D-F）も用いました。地図を見ながら行き先に到着するような状況で観察される脳活動です。これらに、ご飯を食べる際に提供を待ったり、メニューを見てご飯を選んでいるような状況の、二つの実験データを加え、全てのデータ（脳の側頭葉や前頭葉など物体の視覚的認識に関わる脳領域計10カ所のデータ）を比較しました。

PCArs 技術により神経活動は軌跡として可視化され、円、直線、点などが現れます。これらの軌跡は、時々刻々と脳が処理する情報に変化する（円を描く、カーブを描く）場合や、じっと同じことを思い出し続ける（一点にとどまり変化しない）場合など脳の神経活動の状態を表現しています。このように軌跡情報を分類して解析した結果、サルが提示される図形を見て物の位置を覚えたり、提示される視覚図形がもらえる餌の手がかりになる状況では、物体の認識に関わる側頭領域ほど幾何学図形が丸に近い割合が多くなりました。一方で、記憶領域と考えられる海馬や前頭葉では、軌跡がカーブや直線の幾何学図形に分類されることが増えました（図2）。つまり、この幾何学図形による分類の結果、視覚情報の認知・記憶・判断過程における神経集団の活動は、異なる幾何学的特徴の組み合わせである可能性が示されました。

今後の展開

PCArs は、どんな神経細胞集団の記録データにも適用できる便利なツールです。今回は、その技術を用いて脳の10カ所の領域で記録された神経細胞活動のデータを解析しました。脳のさまざまな領域で記録された多数のデータに適用することができれば、複雑な日常環境下における個人の心やその変化、喜びや悲しみが生み出されるメカニズムの理解などにつながると考えられます。研究代表者らが進めている日本学術振興会（JSPS）の科研費研究や、科学技術振興機構（JST）ムーンショット型研究開発事業で、この技術を活用していく予定です。

参考図

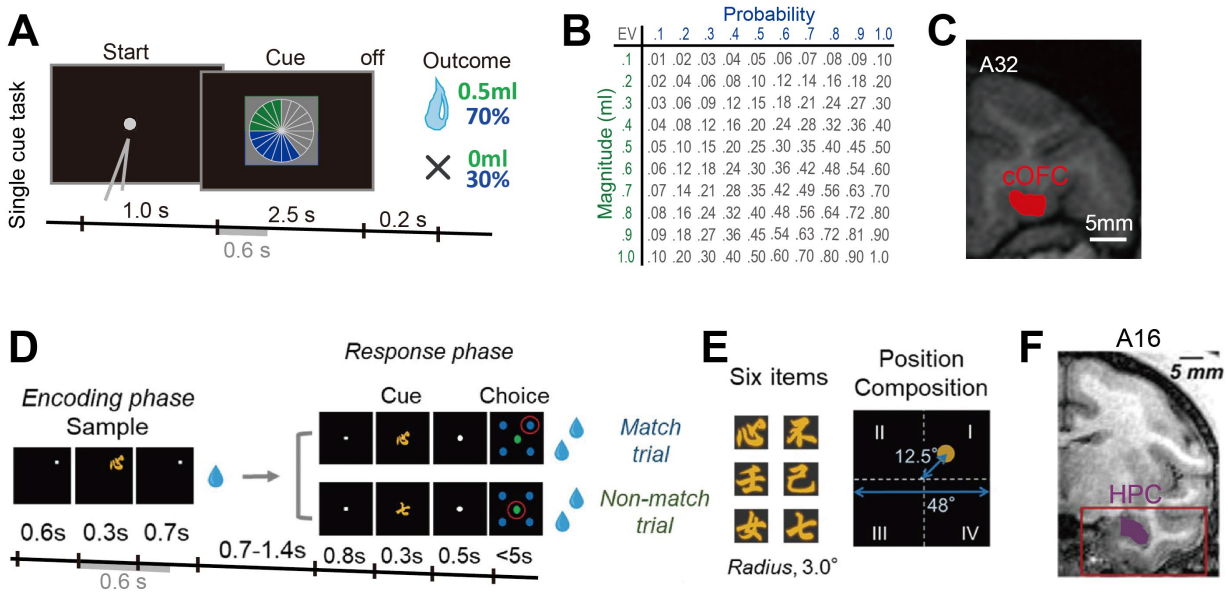


図1. 二つの実験の説明

(A) 図は、モニターを使ってサルに提示された行動課題の流れを示す。サルが中央の点を見ると、くじが現れる。その後、刺激が消え、くじの結果が与えられる。くじの上半分の緑色の区画はジュースの量を意味する。パイの区画1個分が0.1mlを意味し、0.1ml(1個)から1.0ml(10個)まで区画の個数が変化する。下半分の青色の区画は提示されたジュースの量が当たる確率を意味する。この図の例では、0.5mlのジュースが70%の確率で当たることを意味する。残りの30%の確率でサルはジュースを得ることができない。(B) 実験に用いられた全ての利得表。(C) 神経細胞活動の記録位置の例。(D) 別の実験で用いられた課題の説明。サルは提示された刺激の種類と位置を記憶し、その記憶に応じて反応行動を行う。刺激が同じだった場合には提示された位置を報告する。異なる場合には中央の丸を選ぶ。(E) 刺激の種類と提示位置の説明。(F) 神経細胞活動の記録位置の例。

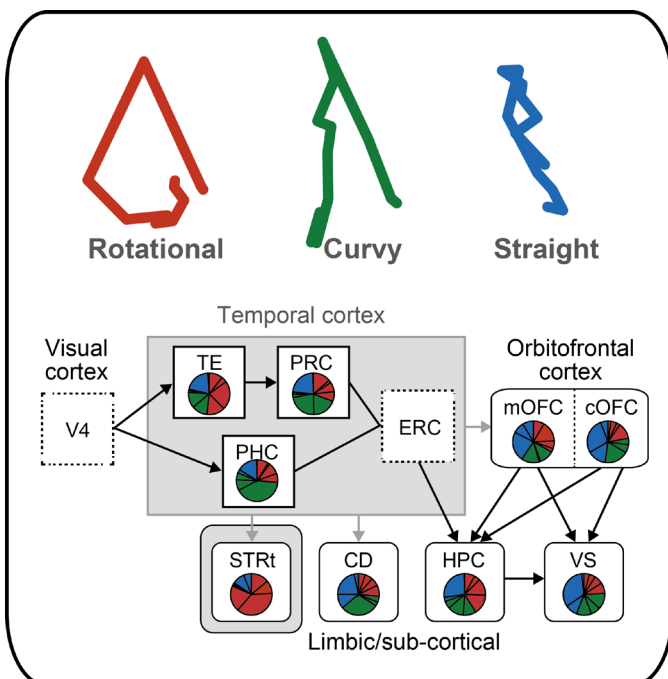


図2. 脳活動の図形的な変遷

観察された神経細胞活動から、その動的変化を図形として抽出した結果の要約。回転 (Rotational)、カーブ (Curvy)、直線 (Straight) に定量的に大別した所、視覚領野に近い側頭葉領域では回転 (赤色) やカーブ (緑) する物が多かった。一方で、記憶に関わる前頭葉や海馬領域では、直線 (青色) が多かった。

参考文献

1) Stable neural population dynamics in the regression subspace for continuous and categorical task parameters in monkeys. eNeuro 29 June 2023, 10 (7) ENEURO.0016-23.2023; <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0016-23.2023>

用語解説

注1) PCAs : Principle component analysis in regression subspace の略。時限圧縮を用いた主成分分析を注目する課題応答について行う手法。時々刻々と変化する神経細胞活動を図形として抽出する。

研究資金

本研究は科研費(新学術領域研究「情報物理学でひもとく生命の秩序と設計原理」山田洋:22H04832)、中部電気利用基礎研究振興財団(山田洋)、科学技術振興機構(JST)ムーンショット型研究開発事業 MoonshotR&D の「脳指標の個人間比較に基づく福祉と主体性の最大化」(プロジェクトマネージャー=松元健二・玉川大教授、課題推進者=山田洋:JPMJMS2294)、National Natural Science Foundation of China (納家勇治 Grant 31871139)の支援を受けました。

掲載論文

【題名】 Formation of brain-wide neural geometry during visual item recognition in monkeys (視覚認知を行う霊長類における、脳の広範な領域の神経活動の幾何学情報)

【著者名】 He Chen^{1,2}, Jun Kunimatsu^{3,4,5}, Tomomichi Oya^{6,7}, Yuri Imaizumi⁸, Yukiko Hori⁹, Masayuki Matsumoto^{3,4}, Yasuhiro Tsubo¹⁰, Okihide Hikosaka⁵, Takafumi Minamimoto⁹, Yuji Naya^{1,11,12}, Hiroshi Yamada^{*3,4}

1 School of Psychological and Cognitive Sciences, Peking University

2 Department of Biological Structure and Washington National Primate Research Center, University of Washington

3 Division of Biomedical Science, Institute of Medicine, University of Tsukuba

4 Transborder Medical Research Center, University of Tsukuba

5 Laboratory of Sensorimotor Research, National Eye Institute, National Institutes of Health

6 The Brain and Mind Institute, University of Western Ontario

7 Department of Physiology and Pharmacology, University of Western Ontario

8 College of Medical Sciences, University of Tsukuba

9 Advanced Neuroimaging Center, National Institutes for Quantum Science and Technology

10 College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

11 IDG/McGovern Institute for Brain Research at Peking University

12 Beijing Key Laboratory of Behavior and Mental Health, Peking University

【掲載誌】 iScience

【掲載日】 2025年1月31日(オンライン先行公開)

【DOI】 10.1016/j.isci.2025.111936

[https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042\(25\)00196-8](https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042(25)00196-8)

問合わせ先

【研究に関すること】

山田 洋（やまだ ひろし）

筑波大学医学医療系 准教授

URL: <https://trios.tsukuba.ac.jp/researcher/0000003502>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp