

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔令和4（2022）年度 中間評価用〕

令和4年3月31日現在

研究期間：2020年度～2024年度
課題番号：20H05705
研究課題名：心的イメージの脳情報表現の可視化

研究代表者氏名（ローマ字）：神谷之康（KAMITANI Yukiyasu）
所属研究機関・部局・職：京都大学・大学院情報学研究科・教授
研究者番号：50418513

研究の概要：

イメージは心の状態を構成する重要な要素である。本研究課題では、脳情報デコーディングと深層ニューラルネットワーク（DNN）の階層的情報表現を組み合わせ、錯視や想起を含む多様な心的イメージを脳活動から画像として再構成する方法を開発し、心的イメージの脳内表現と生成メカニズムを解明する。

研究分野：認知科学、認知計算神経科学、神経科学

キーワード：心的イメージ、深層学習、機械学習、fMRI、ECoG、視覚、夢、錯視

1. 研究開始当初の背景

多様な心的イメージは脳内でどのように生成されるのであろうか？ 研究代表者のグループは世界に先駆けて「脳情報デコーディング」アプローチを提唱し、脳内情報表現を解読する手法を開発してきた。2017年には、画像知覚中のヒトの脳活動パターンから、同じ画像を入力としたときの深層ニューラルネットワーク（DNN）の階層的特徴量を予測できること（脳-DNN 信号変換）を示した。2019年には予測した DNN 信号を最適化アルゴリズムで処理することにより、知覚像を画像として再構成する方法（深層イメージ再構成）を開発した。従来の心理学や認知神経科学では、主観体験は間接的な行動指標によって計測され、具体的な内容を可視化して解析することは困難であったが、これらの手法を拡張することにより、視覚イメージの主観的経験内容を解読し、画像として可視化できることが期待される。

2. 研究の目的

本研究課題では、脳情報デコーディングと DNN 情報表現を組み合わせることで、錯視や想起を含む多様な心的イメージの内容を、大脳視覚皮質の活動パターンから解読・可視化することを目指す。色や形などイメージの異なる要素や脳部位、脳活動時系列、ボトムアップ/トップダウン処理の違いなどに注目し、各種イメージがどのような脳内プロセスによって生成されるかを明らかにする。

3. 研究の方法

われわれのこれまでの研究から、画像知覚時のヒトの脳活動パターンを、同じ画像に対応する階層的 DNN 特徴量に変換（デコード）することが可能になった。また、画像を知覚しているときと想起しているときで共通の脳活動パターンが見られることが知られている。これらの知見にもとづき、画像知覚時の脳活動データで訓練したデコーダを用いて、主観的なイメージを経験しているときの脳活動を、階層的 DNN 特徴量に変換（デコード）する。さらに、デコードされた DNN 特徴量にもとづいて画素値を最適化することで、再構成画像を得る。この枠組みを拡張しながら、錯視や想起を含む多様な心的イメージの内容を大脳視覚皮質の階層的情報表現から解読・可視化する。ヒトの脳活動データは、fMRI（機能的磁気共鳴画像）計測、および、頭蓋内電極を用いた ECoG（皮質脳波）計測により取得する。

4. これまでの成果

1. 注意による再構成画像の変化

2つの画像を重ね合わせ、そのうちの1つを注視しているときのfMRI活動を測定し、注意が再構成に及ぼす影響を調べた。再構成された画像は、注意を向けた画像により類似していることが示され、再構成画像が単なる刺激の反映ではなく「心の中のイメージ」であることが証明された（Horikawa & Kamitani, 2022; 図1）。

2. 個人間深層イメージ再構成

表現される画像情報を保持しながら脳活動パターンを被験者間で変換する「脳コード変換器」を構築し、深層イメージ再構成モデルが異なる被験者間で汎化することを示した（Ho et al, 2022）。

3. 錯視イメージの再構成

自然画像を用いた脳計測データで再構成モデルを構築し、錯覚刺激（主観的輪郭とネオンカラー錯視）を見ているときの脳活動に適用した結果、主観的な線や色をもつ画像が再構成された。主観的線や色の成分が脳部位によって異なることも示された。主観的な錯視イメージを画像として可視化できることを示したはじめての成果で、知覚研究の新たなパラダイムを提示した（論文投稿準備中）

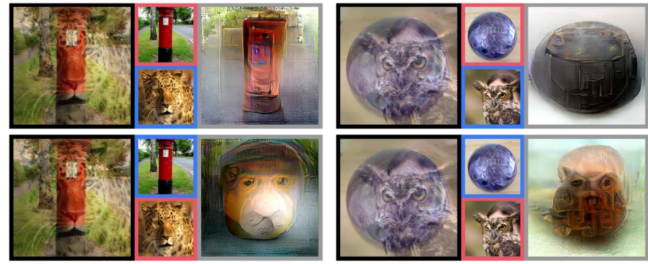


図 1. 注意による再構成画像の変化：各パネルで、左が刺激画像、中央の赤枠が注意を向けた画像、右が脳からの再構成画像。

4. 脳とDNNの階層的類似性を評価する手法

ヒト視覚野の階層的領域とDNN階層の対応度の指標としてBrain hierarchy (BH) scoreを提案した。広く用いられている29の事前学

習済みDNNのBHスコアは、画像認識性能と負の相関があり、最近開発された高性能DNNは必ずしも「脳的」でないことがわかった。脳に類似した表現を獲得するためのアーキテクチャが示唆され、心的イメージ可視化に適したDNNモデルを構築するための指針が得られた（Nonaka et al., 2021）。

5. 睡眠/覚醒遷移時の全脳活動構造の解析

夢見の研究のために計測したデータから、睡眠から覚醒する際、皮質と皮質下の一連の脳活動を含む2段階プロセスが進行することを見出した（Alcaide et al., 2021）。

6. 心的イメージ解釈法の応用

本研究課題で開発した解析手法を、ECoG計測や異なる生物種に適用した成果を発表した（e.g., Fukuma et al., 2022; Tanigawa et al., in press; Macpherson et al., 2021）。

5. 今後の計画

1. 大規模データによる事前学習済み DNN モデルを脳情報表現に適応させることで、心理状態をより正確に反映したイメージの可視化を実現する。
2. MEG 装置を用いて高時間解像度の脳活動データを取得し、10~100 ミリ秒の時間スケールで心的イメージの生成プロセスを明らかにする。
3. REM 睡眠時のデータを効率的に取得する方法を確立し、REM 睡眠時と non-REM 睡眠時の心的イメージの違いを明らかにする。
4. 知覚時と想起時で異なる脳活動パターンに注目し、双方を考慮した心的イメージ可視化法を開発する。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

Horikawa, T. & Kamitani, Y. Attention modulates neural representation to render reconstructions according to subjective appearance. *Communications Biology* **5**, 1–12 (2022). (査読あり)

Fukuma, R., Yanagisawa, T., Nishimoto, S., Sugano, H., Tamura, K., Yamamoto, S., Iimura, Y., Fujita, Y., Oshino, S., Tani, N., Koide-Majima, N., Kamitani, Y. & Kishima, H. Voluntary control of semantic neural representations by imagery with conflicting visual stimulation. *Communications Biology* **5**, 1–15 (2022). (査読あり)

Tanigawa, H., Majima, K., Takei, R., Kawasaki, K., Sawahata, H., Nakahara, K., Iijima, A., Suzuki, T., Kamitani, Y. & *Hasegawa, I. Decoding Oscillatory Representations of Memory-Recalled Color in Macaque Prefrontal Cortex. *Cell Reports* (2022 in press). (査読あり)

Nonaka, S., Majima, K., Aoki, S. C. & Kamitani, Y. Brain hierarchy score: Which deep neural networks are hierarchically brain-like? *iScience* **24**, 103013 (2021).

Macpherson, T., Churchland, A., Sejnowski, T., DiCarlo, J., Kamitani, Y., Takahashi, H. & Hikida, T. Natural and Artificial Intelligence: A brief introduction to the interplay between AI and neuroscience research. *Neural Networks* (2021). (査読あり)

Alcaide, S., Sitt, J., Horikawa, T., Romano, A., Maldonado, A. C., Ibanez, A., Sigman, M., Kamitani, Y. & *Barttfeld, P. fMRI lag structure during waking up from early sleep stages. *Cortex* **142**, 94–103 (2021).

Ho, J. K., Horikawa, T., Majima, K. & Kamitani, Y. Inter-individual deep image reconstruction. *bioRxiv* **56** (2022). (査読なし)

7. ホームページ等

京都大学情報学研究科 脳情報学分野（神谷研究室）

<https://kamitani-lab.ist.i.kyoto-u.ac.jp/>