

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12745

研究課題名（和文）自然視覚経験下の空間認識を支える脳内表現の定量的モデル化

研究課題名（英文）Quantitative modeling of neural representation for spatial cognition under natural visual experiences

研究代表者

和田 充史（Wada, Atsushi）

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所脳情報通信融合研究センター・主任研究員

研究者番号：10418501

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：人は様々な物に囲まれた複雑な環境の中でも、目に映る映像から瞬時に環境と自己の空間的な配置とその変化を把握できる。こうした自然な視覚経験下における空間認識のヒト脳メカニズム解明に向けて、本研究では、単純な空間認識課題である2次元速度分布推定用深層ニューラルネットワーク(DNN)であるFlowNetの内部表現を用いて、広視野自然動画へのfMRI視覚応答を定量的にモデルした。結果、空間認識に関わる視覚背側路中間処理段階の視覚野における脳活動をFlowNet深層が高精度で予測できることを示した。この結果は、広視野呈示とモデルベース解析を組み合わせた本アプローチの有効性を示唆するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空間認識に関わるヒト脳内情報表現の定量的モデル化は、主観的な空間認識状態を脳活動から直接推定する技術に使えるため、没入型VRの臨場感・映像酔い評価や認知症による空間認識障害の発見などの応用に資する。

研究成果の概要（英文）：Even in a complex environment surrounded by various objects, humans can instantly grasp the spatial arrangement of the environment and themselves from retinal images. To elucidate the human brain mechanism of spatial perception under such natural visual experience, we quantitatively modeled the fMRI visual response to wide-view natural video using the internal representation of FlowNet, a deep neural network (DNN) for 2D motion estimation. The results showed that the deep layers of FlowNet deep could accurately predict neural response in the mid-level dorsal visual areas, which are suggested to involve spatial cognition. These results indicate the effectiveness of our unique approach that combines wide-field stimulation and model-based fMRI analysis.

研究分野：脳機能イメージング，視覚神経科学，認知科学，人工知能

キーワード：自然視覚経験 空間認識 脳内情報表現 深層学習 モデルベース解析 fMRI 広視野 両眼立体視

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

人は様々な物に囲まれた複雑な環境の中でも、目に映る映像から瞬時に環境と自己の空間的な配置とその変化を把握できる。しかし、こうした空間認識を担う脳の仕組みについては、特定の視覚特徴に特化した人工的な刺激を用いた知見が主であり、様々な視覚特徴が複雑に絡み合った日常の自然な視覚入力に対して、どのような情報処理過程を経て人が正確かつ瞬時に空間認識を実現しているか、その脳メカニズムは依然として未解明のままである。

一方、近年著しい発展を見せる人工知能技術の一つ、深層ニューラルネットワーク(DNN) [1]と脳との間で情報表現の高い類似性が示されつつある。例えば、自然画像中の物体カテゴリを人以上の精度で認識可能な物体認識用 DNN と、脳内視覚物体認識処理を担う腹側視覚経路との間に情報表現の高い類似性を示すとする結果が報告されている[2],[3]。こうした、DNN を脳の情報処理モデルと見立てて脳活動データを解析する手法は、自然刺激に対する脳内情報表現を精緻かつ定量的に分析可能な方法論として注目されている[4]。

2. 研究の目的

本研究では、日常の視覚経験におけるヒト脳内メカニズム、とりわけ自然視覚経験下における空間認識に関わる脳内情報表現を定量的に同定することを目的とする。具体的には、(1) 高空間解像度かつ非侵襲なヒト脳活動計測手法である fMRI 撮像下で広視野映像を提示可能な独自システム[5]を用いて、日常に極めて近い広視野自然動画観視下のヒト脳活動データを取得する。さらに、(2) 空間認識用 DNN を対照モデルとする符号化モデル解析[6]をこれに適用し、空間認識に関わる脳内情報表現の同定を試みる (図 1)。

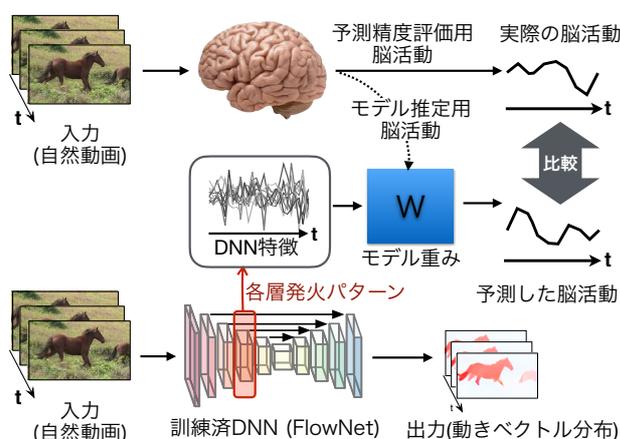


図 1 空間認識用 DNN を用いた符号化モデル解析

3. 研究の方法

健全な被験者 3 名を対象として広視野自然動画への fMRI 脳活動応答を計測した。視覚刺激には多種多様な映像クリップから成る自然動画を用い、独自開発した fMRI 用広視野提示装置を用いて広視野 (対角 90°) 提示した。空間認識に関わる脳内視覚処理の対照モデルとして、自然動画中の 2 次元動きベクトル分布を高精度で推定可能な FlowNet [7]を用いた。FlowNet は、物体認識用 DNN と異なり、入力として与えられた時間的に隣接する動画フレームのペアから 2 次元速度ベクトル分布を推定して出力する。これは環境中の自己や他者の運動を推定する空間認識の中間処理段階に対応すると考えられる。FlowNet の内部表現を代表する 10 層それぞれに対して、刺激動画を FlowNet に入力した際の内部ユニットの活性化パターンを特徴量として抽出し、実測した脳活動応答をボクセル毎に予測する符号化モデル[8]を構築した。ここで、脳活動応答の予測精度 (実測値と予測値の相関係数) が高ければ、脳と FlowNet の情報表現が互いに類似していることを意味する。

4. 研究成果

広視野自然動画へのヒト脳活動応答に対して、FlowNet を対照モデルに用いた符号化モデル解析を適用した結果、大脳視覚皮質上の広範な領域において高い予測精度が得られた (図 2 右)。これは、FlowNet が自然視覚経験下の脳内情報表現を有効にモデル化できていることを示す。次に、ボクセル毎に最も高い予測精度を示した FlowNet 層 (最適層) のインデックスを大脳皮質上にマップした (図 2 左)。その結果、視覚皮質上の低次から高次領域に移るにつれて、最適層が入力に近い浅層から出力に近い深層に移行するグラデーションが見られた。これは、視覚皮質における階層的な情報表現を、同じく階層的な構造をもつ FlowNet によりモデル化できる可能性を示している。さらに、FlowNet 層それぞれに対する予測精度を視覚野毎に比較した結果 (図 3)、低次視覚野 (e.g., V1)、腹側視覚野 (e.g., PPA)、そして背側視覚野 (e.g., V6)、それぞれ互いに異なる特徴的なプロファイルを示した。とりわけ、背側視覚経路上の中間段階に位置する視覚野 V6・V7 において FlowNet 深層が最も高い予測精度を示した。FlowNet 深層では、ネットワークの中間に位置する高次層で抽出された大域的な文脈情報と入力に近い低次層に保持された高解像度情報が統合されることで 2 次元速度ベクトル分布を精度よく推定しているが、この

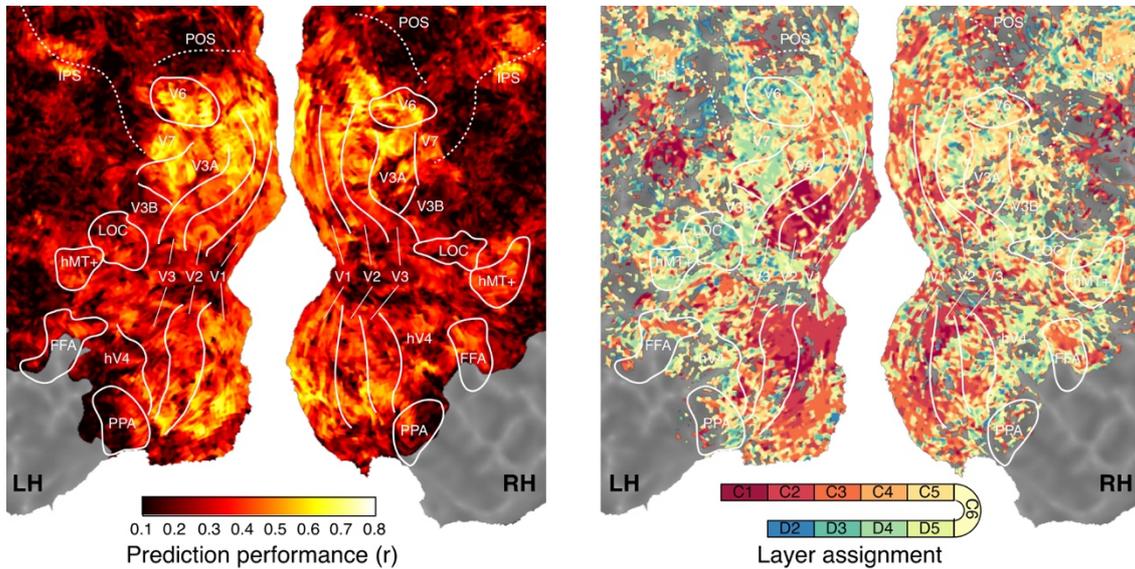


図 2 大脳皮質上にマップした FlowNet に基づく符号化モデル解析結果.

結果は背側視覚経路の中間段階においても同様の情報統合が行われている可能性を示唆している. 本研究では, 空間認識 DNN を用いて日常に極めて近い自然視覚経験下の脳内情報表現を定量的にモデル化した結果, 両者の間の興味深い類似性を示す結果が得られた. 今後, 自然視覚経験下の自己運動推定や3次元空間構造推定など, より高度な空間認識処理についても同様のアプローチを適用することで, 高次空間認識の脳内情報処理を精緻かつ定量的に解明できる可能性が示唆された.

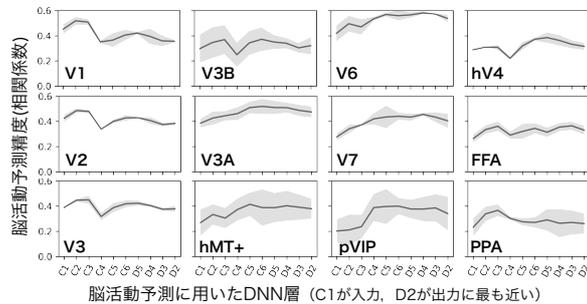


図 3 視覚野・FlowNet 層毎の予測精度

1. [1] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, "Deep learning," *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436–444, May 2015.
2. [2] U. Güçlü and M. A. J. van Gerven, "Deep Neural Networks Reveal a Gradient in the Complexity of Neural Representations across the Ventral Stream," *J. Neurosci.*, vol. 35, no. 27, pp. 10005–10014, Jul. 2015.
3. [3] H. Wen, J. Shi, W. Chen, and Z. Liu, "Deep Residual Network Predicts Cortical Representation and Organization of Visual Features for Rapid Categorization," *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, p. 333, Feb. 2018.
4. [4] D. L. K. Yamins and J. J. DiCarlo, "Using goal-driven deep learning models to understand sensory cortex," *Nat. Neurosci.*, vol. 19, no. 3, pp. 356–365, Feb. 2016.
5. [5] A. Wada, Y. Sakano, and H. Ando, "Development of wide-view stereoscopic visual presentation system for fMRI," in *The 21st Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping*, 2015, p. 4345.
6. [6] T. Naselaris, K. N. Kay, S. Nishimoto, and J. L. Gallant, "Encoding and decoding in fMRI," *Neuroimage*, vol. 56, no. 2, pp. 400–410, May 2011.
7. [7] A. Dosovitskiy *et al.*, "FlowNet: Learning Optical Flow with Convolutional Networks," in *2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2015, pp. 2758–2766.
8. [8] S. Nishimoto, A. T. Vu, T. Naselaris, Y. Benjamini, B. Yu, and J. L. Gallant, "Reconstructing visual experiences from brain activity evoked by natural movies," *Curr. Biol.*, vol. 21, no. 19, pp. 1641–1646, Oct. 2011.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sakano Yuichi, Wada Atsushi, Ikeda Hanako, Saheki Yuriko, Tagai Keiko, Ando Hiroshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Human brain activity reflecting facial attractiveness from skin reflection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-82601-w	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 Ikeda Hanako, Saheki Yuriko, Sakano Yuichi, Wada Atsushi, Ando Hiroshi, Tagai Keiko	4. 巻 43
2. 論文標題 Facial radiance influences facial attractiveness and affective impressions of faces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Cosmetic Science	6. 最初と最後の頁 144 ~ 157
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/ics.12673	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 和田充史	4. 巻 331
2. 論文標題 広視野・自然映像を用いた空間認識の脳メカニズム解 ~VRと脳科学を融合した新たな情報通信を目指して~	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電波技術協会報FORN	6. 最初と最後の頁 14-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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3件（うち招待講演 2件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 坂野 雄一, 和田 充史, 池田 華子, 佐伯 百合子, 互 恵子, 安藤 広志
2. 発表標題 肌の光沢に由来する顔の魅力度を反映するヒトの脳活動
3. 学会等名 第26回日本顔学会大会(フォーラム顔学2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Wada
2. 発表標題 Neural mechanisms of spatial cognition during natural visual experience
3. 学会等名 13th Anniversary International Symposium on Nano Medicine (ISNM2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田充史
2. 発表標題 AIで紐解く空間認識の脳内処理
3. 学会等名 第19期金曜サイエンスサロン (招待講演)
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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------