

(続紙 1)

京都大学	博士 (情報学)	氏名	Ho, Jun Kai
論文題目	Hierarchical Visual Representation Shared Across Individuals (個人間で共有される階層的視覚表現)		
(論文内容の要旨)			
<p>Ho氏の博士論文は、ヒトの脳における視覚情報表現の個別性と普遍性についての研究である。</p> <p>ヒトの脳には共通の解剖学的特徴が存在する一方で、異なる発達環境や経験に由来する脳構造や脳活動パターンの違いがある。ある刺激が提示されたとき、異なる個人は異なる脳活動パターンを示すが、同じ情報を表現する脳活動パターン間の対応関係をモデル化することで、ある個人の脳応答から、同じ刺激に対する他者の脳応答を予測できると考えられる。構造によらず脳活動パターンを対応づける機能的アライメント法は、個人間で共有される神経表現の存在を調査する手段として近年研究されてきた。しかし、コード化された知覚内容を保持したまま、階層的神経表現を個人間で変換できるかどうか、またどのように変換できるかは不明であった。</p> <p>本研究では、脳コード変換器と呼ばれる機能的アライメントのための機械学習モデルを用い、個人間で変換された脳活動パターンが保持する知覚情報を解析した。2人1組に提示された同一の自然画像セットに対するfMRI応答について、1次視覚野から腹側物体野までをカバーする視覚野全体の信号を用いて変換器を訓練し、独立データでその変換精度を評価した。つづいて、変換された脳活動パターンを用いて、深層ニューラルネットワーク (DNN) の階層的視覚特徴を予測 (デコード) し、さらに、デコードされた視覚特徴を介して画像を再構成した。これらの結果から、視覚階層に関する明示的な情報がなくても、変換器は視覚野間の対応関係を自動的に学習することが示された。各層におけるDNN特徴デコーディングの結果から、変換後も階層的な表現が保存されていることが明らかとなった。また、比較的少ない訓練データでも、物体のシルエットが認識可能な視覚像が再構成できることが示された。コード変換により複数の被験者のデータをプールしてデコーダを再訓練したところ、1被験者のデータで訓練したデコーダより、わずかではあるが精度の向上が見られた。これらの結果は、視覚像再構成を可能にするのに十分な視覚情報を保持したまま、個人間の脳コード変換が実現できることを示している。</p> <p>論文は以下のように構成されている。1章では、脳の個人差、機能的アライメント法、個人間で共有される視覚特徴、および、当該分野の現状について述べられている。2章では、この研究で用いられた人間の脳活動データと実験デザインについて説明されている。3章では、脳活動パターンの変換方法とその評価結果が示されている。4章では、変換された脳活動のパターンが保持する情報を、DNN特徴デコーディングと視覚像再構築を通して解析している。5章では、視覚階層を無視して訓練された脳コード変換器と、視覚階層を考慮したものとの比較が行われ、前者のデータ駆動型アプローチの有効性が示されている。6章では、複数の被験者からのデータを一つの被験者の空間に集約することにより、デコード精度がわずかながら向上することが示されている。7章では、脳コード変換器の意義や個人間の視覚像再構成に関する今後の方向性について考察が行われている。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

Ho氏の博士論文に対する審査結果について、以下の通り報告する。

研究の新規性について

従来の研究では、大まかな物体カテゴリーや意味内容を保ったコード変換の可能性が示されていたが、本研究により、詳細な視覚特徴表現の変換が可能であることが確認された。特に、脳活動パターンからの視覚像再構成によってその有効性を示したことは、本分野における重要な貢献である。

脳コード変換手法について

本研究では、事前に脳部位情報を与えないデータ駆動型の脳コード変換手法が取り入れられ、その結果、事前に脳部位情報を与える場合よりも高い脳コード変換精度が得られた。この手法の成功は、近年報告されている脳表現のドリフトや視野再現マップの個人差を考慮すると、興味深いものである。今後、従来の脳部位の定義の見直しにもつながる結果である。

データプーリングの効果に関して

本研究では、個人間のデータプーリング効果は限定的であったと述べられている。刺激画像の多様性が十分でなかったことが原因の一つと思われるが、今後、この問題の詳細な説明が期待される。

研究手法と統計的評価について

本研究では、機械学習手法を駆使した手堅い研究アプローチが採用されており、結果の統計的評価も熟慮された方法が用いられている。特に、統計的なバイアスを補正する手法など、堅実性が見られる。このような研究手法や評価手法の採用は、今後の研究においてベンチマークとして採用されることが予想される。

応用面での評価

本研究の結果は、脳デコーディングモデルの訓練データ取得のための時間を大幅に削減できることを示唆しており、実世界での脳デコーディング・再構成の応用の可能性を広げるものである。この点において、研究の応用的価値は高いと考えられる。今後は、より実践的な研究が進展することが期待される。

今後さらなる探求が期待される点は残るが、これまで実現が困難と思われていた詳細な知覚情報の個人間脳コード変換が原理的に可能であることを示し、今後の研究や応用への道筋を拓いた点で、博士(情報学)の学位取得に相応しいものと評価される。

令和5年7月25日に行われた口頭試問において本博士論文は合格と判断された。また、本論文のインターネットでの全文公表についても支障がないことを確認した。