

様式VI

博士学位論文調査報告書

論文題目

Top-down Modulation in Human Visual Cortex
ヒト視覚皮質におけるトップダウン変調

申請者氏名 Mohamed Abdelhack

最終学歴 平成 27 年 9 月
沖縄科学技術大学院大学 修士課程 修了
平成 30 年 9 月
京都大学大学院情報学研究科 知能情報学 専攻博士後期課程
研究指導認定見込・退学

学識確認 平成 年 月 日（論文博士のみ）

論文調査委員 京都大学大学院情報学研究科
(調査委員長) 神谷之康 教授

論文調査委員 京都大学大学院情報学研究科
熊田孝恒 教授

論文調査委員 京都大学大学院情報学研究科
西野 恒 教授

(続紙 1)

京都大学	博士（情報学）	氏名	Mohamed Abdelhack
論文題目	Top-down Modulation in Human Visual Cortex （ヒト視覚皮質におけるトップダウン変調）		
（論文内容の要旨）			
本論文では、深層ニューラルネットワーク（DNN）の画像表現を利用して、ヒトの視覚皮質脳活動におけるトップダウン処理を特徴づける方法を提案している。この方法を用い、劣化画像を知覚したときの脳内の画像特徴表現が「シャープ化」することや、画像を誤認識したときに視覚皮質の高次領野と低次領野で異なる物体カテゴリーの特徴表現が併存することを示した。本論文は以下の6章から構成されている。 第1章は序論であり、本論文の背景とアプローチを概観している。視覚情報は、明確な視野再現マップで特徴づけられる低次視覚野で処理を経た後、腹側経路と背側経路に分かれて高次な処理が行われていると考えられる。この処理の流れは一方方向ではなく、高次から低次へのトップダウン処理も存在することも知られている。近年急速に研究が進展したDNNは、フィードフォワードネットワークで構成されることが多いが、その階層的情報表現は、ヒトやサル的大脑との相同性を示すことがわかっている。これらの知見を概観した後、ヒトのトップダウン処理をDNN情報表現を用いて階層的に分析するアプローチが提示される。 第2章では、実験方法と基本的な解析手法について解説している。本研究でヒトの脳活動を計測するために用いた磁気共鳴画像法（functional MRI, fMRI）、劣化画像として多段階のボケを施した画像を被験者に呈示するfMRI実験のデザイン、脳画像データの解析手法、深層ニューラルネットワークモデルの特性、および、DNN特徴を脳から解読（デコード）する方法が説明されている。 第3章では、視覚皮質におけるDNN特徴表現の「シャープ化」を示した研究を記述している。先行研究に従い、まず、入力画像のDNN特徴量を同じ画像を刺激として用いた時のヒトの脳活動パターンから予測するデコーダを構築する。このとき刺激としては、ボケのないオリジナル自然画像（写真）を呈示し、訓練ラベルとして、画像の物理的なDNN特徴量を用いる。このデコーダを用いて、多段階のボケを施した刺激画像に対するfMRI脳活動からDNN特徴量をデコードした。その結果、脳からデコードされたDNN特徴量は、ボケを施した刺激画像のDNN特徴量よりも、ボケを施す前の元画像のDNN特徴量に類似することが分かった。この効果を「シャープ化」と呼ぶ。シャープ化の強さを「特徴ゲイン」という指標で定量化し、脳部位やDNN階層ごとに比較している。また、事前知識の効果によってシャープ化が促進されることも示している。 第4章では、画像を誤認識したときの低次・高次視覚皮質のDNN特徴表現を解析している。fMRI実験では、各呈示画像に対して認識した物体名（物体カテゴリー）を被験者に答えさせている。ボケ度が高い画像では誤認識が高い頻度で生じる。ここでは、誤認識した物体カテゴリーに対応するDNN特徴量と正しい物体カテゴリーに対応するDNN特徴量を、脳の各部位からデコードしたDNN特徴量と比較した。その結果、低次のDNN階層については、デコードされる特徴量は、被験者の反応にかかわらず、正しい物体のカテゴリーに近く、高次のDNN階層については、被験者が誤認識した物体カテゴリーに近いことが分かった。また、中側頭回において、被験者の誤認識に対			

応する情報表現が試行をまたいで持続する現象が観察された。

第5章では、上記のシャープ化を説明するニューラルネットワークモデルを提示している。リカレント結合やトップダウン結合を付与したニューラルネットワークモデルを構築することにより、ヒトの脳で見られたシャープ化と同様の現象を再現することができた。ボケ画像だけでなく、ピクセル値を二値化した画像（ムーニー画像）においても、同様のシャープ化が生じた。

第6章は、本論文の手法を応用した予備研究の概略を示している。精神疾患患者の病態の解明など、応用の可能性を示唆している。

注) 論文内容の要旨と論文審査の結果の要旨は1頁を38字×36行で作成し、合わせて、3,000字を標準とすること。

論文内容の要旨を英語で記入する場合は、400～1,100 wordsで作成し
審査結果の要旨は日本語500～2,000字程度で作成すること。

(論文審査の結果の要旨)

1) 本論文は、深層ニューラルネットワーク (DNN) の情報表現を活用して、階層的視覚情報処理におけるトップダウン効果を定量化する方法を提案し、磁気共鳴画像法 (fMRI) で計測したヒト脳活動データの解析および数理モデリングに応用したものである。大脳視覚野は階層構造をもち、低次野から高次野に処理が進むにつれ、単純でローカルな特徴から複雑でグローバルな特徴が抽出されることが知られている。しかし、事前知識や思い込みといったトップダウン情報がどのように視覚野の階層的情報表現に反映されるかは明らかでなかった。本研究では、大規模画像データで訓練したDNNの階層的情報表現がヒト視覚野の階層的情報表現と相同性をもつことを利用して、劣化画像の脳内特徴表現が「シャープ化」することや、誤認識時に高次野と低次野で異なる物体特徴表現が併存することを示した。また、これらの現象の一部をフィードバック結合やリカレント結合をもつニューラルネットワークで再現することにも成功している。

2) 第3章で示される脳内における画像特徴のシャープ化は、物理的には存在しない画像特徴を脳内情報で補っていることを示す極めて興味深い現象である。詳細な画像特徴表現のレベルで、かつ、脳部位・DNN階層特異的にトップダウン効果を顕在化させることにはじめて成功した成果である。画像特徴のシャープ化を定量化するために開発した「特徴ゲイン」は、トップダウン効果がない状態を推定してそれをベースラインとするもので、単純に相関係数を比較することによって生じる問題を回避した優れた指標である。

3) 第4章で議論される誤認識時の脳情報表現は、高次野と低次野で異なる物体特徴表現が併存することを示した新しい発見である。被験者の反応とは独立に正しい物体情報が低次野に表現されていること、トップダウンの影響の及ぶ範囲が限られていること、また、試行初期の誤認識に対応する脳活動が持続する脳部位が存在すること等が示されており、神経科学や心理学に与える示唆は大きい。トップダウンとボトムアップの情報が高次視覚野でベイズ的に統合されるという解釈も興味深い。

4) 第5章では、第3章で実験的に示されたシャープ化現象をニューラルネットワークで再現している。リカレント結合やトップダウン結合を付与したニューラルネットワークモデルで、ボケ画像のシャープ化を再現したほか、ムーニー画像にも汎化できることを示している。実験的な検証が待たれるが、シャープ化をより一般的な枠組みに拡張できる可能性を示した結果として興味深い。また、6章では、精神疾患の病態解明への応用の可能性も示唆している。

よって、本論文は博士(情報学)の学位論文として価値のあるものと認める。また、平成31年2月19日に実施した論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果合格と認めた。

注) 論文審査の結果の要旨の結句には、学位論文の審査についての認定を明記すること。更に、試問の結果の要旨（例えば「平成 年 月 日論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果合格と認めた。」）を付け加えること。

Webでの即日公開を希望しない場合は、以下に公開可能とする日付を記入すること。
要旨公開可能日： 年 月 日以降