

(続紙 1)

京都大学	博士（情報学）	氏名	CHENG Fan
論文題目	Deciphering the Neural Representations of Visual Illusions （錯視の神経表現の解説）		
(論文内容の要旨)			
本論文は、視覚的錯視の神経表現を、ヒトの脳画像解析、機械学習による神経活動のデコーディング、画像再構成技術を組み合わせた新しいアプローチを用いて調査したものである。従来の神経生理学的研究は、錯視と相関する神経活動を明らかにしてきたが、ミクロな神経活動と視覚経験の対応関係は明らかでなかった。また、これまでの心理物理学的研究は、錯視の特定の特徴に特化した判断を被験者にボタン押し等で反応させるもので、知覚の全体像を明らかにするものではなかった。そこで、本研究では、自然画像刺激で訓練した知覚像再構成モデルを用いて、錯視刺激を見ているときの脳活動を解析し、知覚される錯視イメージの内容に対応する画像を生成することを試みた。また、再構成された画像を定量的に分析することで、視覚階層の異なる領域における錯視知覚の表現の強度と実刺激との表現の共有度を調べた。 本論文は、9章からなる。第1章では、視覚的錯視の紹介、分類、およびこれらの現象の測定と理解における課題について述べ、心理物理実験、計算モデリング、および神経イメージング技術を組み合わせるアプローチを提案している。第2章では、視覚的錯視の分類法と、主観的輪郭とネオン色拡散に関する「外的」および「内的」心理物理学的研究の既存の文献をレビューしている。第3章では、デコーディングと再構成の方法の導入を含む研究設計の概要と、方法の選択の根拠について説明している。第4章では、心理物理学および神経イメージング研究の実験設計、使用された視覚刺激、fMRI実験手順、およびデータの前処理手順について詳しく説明している。第5章と第6章では、fMRIデータから錯視知覚を再構成することに焦点を当てている。第5章では、デコーディングと再構成の分析結果を示し、脳活動パターンから主観的輪郭とネオン色拡散を再構成することが実現可能であることを示している。第6章では、再構成プロセスにおけるさまざまな要素の役割を調べ、これらの要素の変動に対する結果の頑健性を評価している。第7章と第8章では、視覚階層に沿った主観的輪郭とネオン色拡散の再構成について調べている。これらの章では、初期視覚野から高次視覚野までの異なる視覚処理段階でのfMRIデータから錯視知覚を再構成した結果を示している。視覚階層全体での再構成を比較することで、錯視体験の表現における異なる視覚野の貢献を明らかにしている。最後に、第9章では、主観的輪郭とネオン色拡散の神経メカニズムについて得られた主要な洞察、視覚知覚の理論に対する結果の含意、および認知神経科学の他の領域へのアプローチの応用の可能性について議論している。 本研究は、錯視という特殊な視覚体験を手がかりとして、意識的知覚の神経基盤に迫るための新たな研究の枠組みを提示するものである。脳活動から知覚体験を再構成するという本研究のアプローチは、主観的な感覚を客観的に評価する画期的な方法論であり、感覚の本質に関する哲学的な問いにも示唆を与えるものである。本研究の再構成フレームワークは、内部の脳表現と外部の物理的世界での発現との間のギャップを埋めるものであり、意識体験の神経基盤のさらなる探求への道を開くものである。今後のさらなる研究によって、意識がどのように脳内の情報処理から生み出されるのかという謎の解明が期待される。			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

Cheng氏の論文に関する審査結果について、以下の通り報告する。

本研究の目的と意義について：

錯視の神経表現を解読し錯視イメージを外在化することで、人間の視覚における主観的な側面と客観的な側面の複雑な関係を明らかにしようとする意欲的な研究テーマである。

研究方法の妥当性について：

本研究では、主観的輪郭とネオンカラー拡散の2つの錯視現象に焦点を当て、主観的な錯覚体験をfMRIデータから再構成している。具体的には、深層ニューラルネットワーク (DNN) を用いて視覚的特徴の階層的表現を取得し、脳活動パターンをDNNの特徴にマッピングするデコードモデルを訓練する。このデコードモデルを用いて錯視を見ているときの脳活動からDNN特徴を解読し、学習済みの生成器に投入することで、脳活動から錯視イメージの再構成を行っている。さらに、Radon変換等を用いて、再構成画像に含まれる主観的知覚特徴を定量的に評価している。これらの手法は、過去に開発された手法をベースにしながら独自の工夫を加えたものであり、統制実験や頑健性解析も多数行われているため、信頼性は高い。

論文の主張とサポートするエビデンスについて：

本論文の主な主張は、ヒトの脳活動から視覚的錯覚体験を再構築できるというものである。そのエビデンスとして、主観的輪郭とネオンカラー拡散という2つの錯視現象を用いたfMRI実験とその解析結果が示されている。再構成された画像には、被験者が実際に体験した錯視と一致する特徴が見られ、さまざまなコントロール条件により、この錯視イメージの再構成が用いたモデルのアーチファクトでないことが示されている。モデルが複雑であるため、今後さらなる検証が必要であることが指摘されたが、概ね論文の主張をサポートする結果が示されたと考えられる。

脳認知科学における本研究の位置づけについて：

本論文では、フェヒナーのinner psychophysicsとouter psychophysicsという分類に則り、これまであまり進展のなかったinner psychophysicsの新たなアプローチを提示するものとして、位置づけが議論されている。野心的な取り組みであるが、従来手法との補完が必要であり、どの程度このアプローチが他の問題に適用可能であるかは未知数であることなどが議論された。

全体として、本研究は野心的なテーマに対して、堅実な方法を適用して、説得的な結果を示している。さまざまな解釈の余地は残されているが、ヒトの脳活動から視覚的錯覚体験を再構成するという目的は十分達成しており、学術的意義も極めて高い。以上の点から、この博士論文は高く評価でき、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6年6月13日に実施された論文内容と関連する口頭試問においても合格と認定された。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。