

研究終了報告書

「生物模倣によるロバストで効率的な深層学習の開発」

研究期間：2019年10月～2023年3月

研究者：松井 鉄平

1. 研究のねらい

現在の深層学習はノイズに対する「ロバストネス」に問題があり、ヒトの認識できないほど小さいノイズの不可に騙されてしまうことが判明している。また、深層学習の持つもう一つの問題点として、その低い「効率性」があげられる。深層学習は大規模な GPU の導入など高い計算コストを必要とし、その計算コストはムーアの法則以上のペースで増加している。ヒトの脳を始めとして、実際の生物の脳は「ロバストネス」と「効率性」の問題を、少なくとも現状の深層学習よりは高いレベルで解決しているように見える。これらの事は、現状の深層学習を改善する上で、生物の脳の特徴が大きなヒントになることを示唆している。

本研究の着想に重要な役割を果たした先行研究で、生物の脳における情報表現が、ノイズへのロバストネスと効率性を両立したデザインになっていることが明らかになっている。、脳による情報表現の幾何学的特徴を解析した先行研究では、脳の活動パターンは、複雑な自然画像の情報を表現可能にする冪分布を持つことが分かった。更に冪分布の特徴から、脳活動のパターン全体が作る多様体は微分可能なものの最大の次元を有していることが分かった。このことは、生物の脳活動パターンが、限られた神経細胞で多様な視覚情報を表現すると同時に、ロバストな視覚認識を可能にするための最適な幾何学的デザインを持つことを示唆する。また、深層学習が脳の情報表現を真似ることにより、現状よりも高い性能を獲得できる可能性も示唆する。そこで本研究では、実際の脳活動を計測し、解析することを通して、このような脳に特有の情報表現の特徴を明らかにし、更にそれを深層学習に用いることで、生物の脳による情報表現を模倣する新しい多層ニューラルネットを開発することを目指した。

本研究では申請者の専門分野であり実験的研究の経験が豊富である大脳皮質の視覚野を対象として技術開発を行うが、本研究で開発する技術の大部分は他の感覚野や運動野、意思決定などを司ると考えられている前頭葉にも適用することが可能である。将来的には、ここで開発する技術が、個々人の脳と情報機器を直結するカスタマイズドコンピューティングの基盤技術として有用となることが期待される。

2. 研究成果

(1) 概要

研究期間全体を通じて、生物の脳における画像情報表現の特徴を理解すること、およびそれを深層学習に取り込むことを目指す研究開発を行った。研究開始と同時期にコロナ禍が始まったことや、2度の研究機関の移動が生じたため、動物実験だけでなく、脳活動の公開データ

ベースや、既已取得していた脳活動データの解析をベースとした研究開発も取り入れた。こうしたデータを用いて神経細胞集団が画像情報表現を行う際の共分散構造を解析すると、マウスで発見されたものと類似した共分散構造が、ヒトやサルなどマウス以外の動物の脳皮質視覚野でも見られることが分かった。また、視覚野の階層に応じて幾何学的情報構造が変化していると考えられることを発見した。このことは視覚野の階層性を考慮して生物の脳による情報表現を理解することの重要性を示している。

並行して行った発達期マウスおよびマーモセットサルの解析からは、脳の自発的活動が階層的な視覚野ネットワークの形成と、画像情報表現の両方に重要な役割を果たしているという結果が得られた(代表的論文1)。また、自然画像を用いた生物の脳活動の計測については設備の立ち上げを完了し、更に、神経活動に基づく画像生成を行う手法を新たに開発した。この画像生成法は後述の SciFoS 活動にヒントを得て行った研究開発にも応用された(代表的論文2)。

アルゴリズム開発の面では、まず、隠れ層が1層の人工神経回路で、生物の脳と同様な共分散構造がロバストネスを向上させていることを確認した。一方で、データを丸暗記する脆弱性も強まっていた。また、これを深層神経回路に拡張する際に、階層性を考慮して各層の共分散構造を調整する必要があることが分かった。上記の生物の脳の特性を考慮すると、こういった弱点は自発的神経活動の性質を取り入れることで解決できる可能性がある。また、自発的脳活動が生物の脳の効率性に寄与している可能性も高い。そこで、自発的脳活動を深層学習に取り込むため、脳活動の公開データベースを用いて自発的脳活動の時空間構造を解析した(代表的論文3)。

他にも、さきがけ研究を通じて基礎研究と社会実装の両面で活動の幅を広げることが出来た。基礎研究の面では、さきがけ領域内外での共同研究を通じて学術変革領域や CREST 研究をスタートさせることに繋がった。また、社会実装に向けた取り組みとしては、SciFos 活動を通じて Explainable AI の重要性を認識し、さきがけ研究の成果を基にした新しい技術の開発を行うことが出来た。

(2) 詳細

この研究項目では、画像データセットと各画像に対する実際の脳の活動のデータセットを組み合わせた深層学習を計画しており、特に、従来の深層学習に無い生物の脳の特徴を明らかにすることを目指した。このため実際の生物の脳において、MNIST の画像に対する反応を大規模な神経活動イメージングにより計測することを予定していたが、研究開始と同時にコロナ禍に入り動物実験の実施が難しくなった。そこで、既已取得していた発達期マウスの神経活動データおよびマーモセット視覚野の神経活動データの再検討と、並行して公開脳活動データを用いた研究の実施を行った。

具体的な実施項目としては、本研究全体で着目する冪分布に従う画像表現について、詳細な特徴を調べた。まず、ヒト視覚野のデータを用いて各視覚野での画像に対する反応の共分散行列を計算し、その固有値が両対数グラフで直線状に見える冪分布をしていることを確認した(図1)。同様の傾向はマウスのデータでも確認された。更に興味深いことに、「特定の α をとることにより視覚野の情報表現が最適化されている」という

当初の予想と異なり、ヒト視覚野での α 指標は階層に合わせて変化していること、及び、そのパターンはCNNと類似していた(図2)。

階層的なネットワークの重要性は、マウス発達期データおよびマーマセット視覚野神経活動の再解析からも確認された。マウス発達期データからは、階層的なネットワークの形成が視床を経由した自発的神経活動によって発達の非常に初期の段階から規程されているものであることが分かった(Murkami, Matsui et al., Nature, 2022[主要論文1])。また脳の高いエネルギー効率を考慮すると、自発的神経活動の存在が脳の効率性を高めている可能性もある。

以上のように、本項目では階層性に合わせた α の変化と、自発的神経活動という2つの面が、現在の深層学習には見られない脳の情報表現の際立った特徴であることが見いだされた。

研究項目2：効率的な脳活動サンプリングによる大規模自然画像データへの拡張

本研究項目では、研究項目1で開発した多層ニューラルネットワークをベースとして、より自然な画像データ(ImageNetなど)に適用するための技術開発を行った。特にコアになる技術としては、観測された神経活動をフィードバックし、次に提示すべき画像をフレキシブルに生成するための技術開発を行った。この項目についても、公開データを用いた技術開発を行った。まず、MITが公開するサル視覚野の神経活動データを用いて転移学習により多層ニューラルネットワークを訓練し、与えられた画像に対する神経細胞の活動を予測できることを確認した(図3)。

当初の計画では、神経活動を予測するように訓練したモデルを使い、次に提示する画像を予め用意した画像セットから選ぶことでフィードバックを行う予定であったが、更にフレキシビリティが高い画像提示を実現するため、深層学習を用いた画像生成により次に提示する画像を作ることを行った。この技術開発を行う過程で、後述するSciFosの活動などの影響もあり、ここで開発した画像生成の技術を本さきがけ研究以外にも応用できる技術開発を行った(Matsui et al., Frontiers in Neuroinformatics, 2022[主要文献2])。

研究項目3：スケーラブルなパラメーター正則化法の抽出

この項目では、上記2項目を通して得られた脳の特徴をアルゴリズムとして深層学習に実装することを行った。上述の生物の脳の知見を基にすると、自発的神経活動を取り入れることで階層的な情報表現のメリットが向上することが考えられる。このため深層学習に自発的神経活動を考えたが、自発的神経活動は脳全体で関連しているため単純な乱数では良いモデルにならない。そこで、実際のヒトfMRIで計測した自発的神経活動のデータベースを用いて、自発的神経活動の時空間構造をどのようにモデル化するべきか検討した。その結果、従来の神経科学で信じられてきたような多安定状態の間の遷移を考える複雑なモデルは不要であり、自己回帰モデルで十分に時空間構造を説明できるこ

とが明らかになった (Matsui et al., Neuroimage, 2022[主要文献 3]) .

領域内外の研究者との連携や社会実装に向けた成果

さきがけ領域内では 1 期生の山本英明准教授と共同で研究領域を立ち上げ、学術変革 B に採択された。また、3 期生の鹿野豊准教授とは美的感覚の神経科学についての研究プロジェクトでも交流を深めることが出来た。このプロジェクトは KEK が主催する国立研究機構間の共同プロジェクトに採択されている。

領域外では、光操作領域のさきがけ研究者である三上秀治教授（北海道大学）と共同研究を開始し、CREST バイオ DX の研究課題として採択された。CREST 研究では、本さきがけ研究の技術を継承して発展させる予定である。

社会実装に向けた取り組みとしては、SciFos 活動に参加し、深層学習を産業応用するベンチャー企業を中心にインタビューを行った。そのインタビューを通して、Explainable AI の重要性を認識し、これが本さきがけ研究を応用した主要文献 2 の研究を実施するきっかけになった。

3. 今後の展開

基礎研究の面では、研究期間内に開発した技術を応用し、大脳皮質の中での情報処理の流れを可視化する技術開発を行う。この研究は CREST バイオ DX 領域の研究(代表:北海道大学、三上秀治、松井は主たる分担研究者)として 2022 年度に採択されており、5 年程度の期間での技術開発を目指している。この技術を用いることにより、神経回路の発達に伴う情報処理様式の変化のような、既存の技術では調べるのが難しい課題に取り組むことが可能になる予定である。

社会実装としては、本研究で開発した深層学習を用いた反事実推論の技術を神経科学以外にも適用できるように改善していきたいと考えている。具体的には、高解像度の画像にも適用できるように改良することや、MRI 画像などの医療画像以外のドメインに拡張することが必要だと考えている。これらの技術開発を 2 年程度の期間で行い、事業化などの社会実装に繋げていきたいと考えている。

4. 自己評価

研究目的の達成状況と研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

今回のさきがけ研究は開始直後から始まったコロナ禍と、異動による研究室移設が 2 回発生したことにより、色々な面で当初の計画通りに進行しない部分があった。特に生理学実験を予定通りに進めることは難しかった。一方で、既に取得していたデータを、時間をかけて深く理解することで、自発的脳活動と脳の発達、および視覚情報処理との新しい関係を見出すことが出来た (Murakami, Matsui et al., Nature, 22; Matsui et al., Nature Communications, in revision)。また、ここ 5 年程度で急速に普及した脳活動の公開データを積極的に利用することにより、画像生成技術の開発と応用 (Matsui et al., Frontiers in Neuroinformatics, 2022)、自発的脳活動の時空間構造解析 (Matsui et al., Neuroimage, 2022) を行うことが出来た。

3 年半という期間の中では、コロナへの対応以外にも昇進に伴い発生した新しい業務(授業や卒業研究生の指導など)があったが、当初の研究目標の多くは達成されており、期間内に 8 件の原著論文を出版することが出来た。これらの点から全体として予定していた成果が得られたと認識している。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

さきがけ研究を応用することで、深層神経回路をブラックボックスとしたときに、その判断根拠を可視化する技術を開発し、発表している (Matsui et al., *Front. Neuroinfo.* 2022)。この研究は、さきがけ研究の一環として行った SciFos 活動の影響を受けて行ったものである。SciFos の中で、深層神経回路の動作説明が、土木作業(建造物老朽化の判定)や農業(病害の判定)など様々な場面で必要とされていることが分かり、そこにさきがけ研究で開発していた画像生成技術が応用できる可能性に思い至った。将来的には、この技術を高解像度の画像に拡張することで、さきがけ研究で開発した技術とコンセプトを社会・経済の様々な場面で活用できる可能性がある。こうした方向性は研究当初には思ってもみなかったことであるが、個人研究者の多様な活動をサポートしてくれたさきがけの事業ならではのアウトカムではないかと自負している。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:8件

<p>1. 1. T. Murakami, T. Matsui, M. Uemura, K. Ohki, Modular strategy for development of the hierarchical visual network in mice. <i>Nature</i>, 2022, 608, 578-585.</p> <p>この研究ではマウスの大脳皮質視覚野における多層的なネットワークの形成原理を明らかにした。発達中の視覚野ネットワークで神経活動のカルシウムイメージングを行ったところ、視床を介して伝搬する自発的な神経活動が、大脳皮質視覚野の階層間を繋ぐネットワークの鑄型を作っていることが明らかになった。この結果は、さきがけ研究で着目している自発的な神経活動が情報処理だけでなく学習にも役立つ可能性を明らかにしている。松井は共同責任著者として本研究全体に主導的な役割を果たした。</p>
<p>2. 2. T. Matsui, M. Taki, TQ Pham, J. Chikazoe, K. Jimura. Counterfactual explanation of brain activity classifiers using image-to-image transfer by generative adversarial network. <i>Frontiers in Neuroinformatics</i>, 15, 79.</p> <p>近年の脳科学では MRI などで計測した脳活動のデコーディング技術の開発と、そのブレインマシンインターフェースなどへの応用が注目されている。この研究では、さきがけ研究として技術開発を行った深層学習に基づく生成モデルを用いた反事実説明により、脳活動の解読を行う深層神経回路(デコーダー)の動作を説明する新しい手法を提案した。松井は筆頭著者および責任著者として本研究全体に主導的な役割を果たした。</p>

3. 3. T. Matsui, TQ Pham, K. Jimura, J. Chikazoe. On co-activation pattern analysis and non-stationarity of resting brain activity. Neuroimage, 249, 118904.

本研究では脳活動の大規模データベースを活用した自発的神経活動の時空間構造解析を行った。さきがけ研究では大脳皮質視覚野の局所神経回路における自発的神経活動に着目しているが、自発的神経活動そのものは脳全体に大域的に相関している。そこで本研究では種々の時系列モデリングを用いて自発的神経活動の大域的な性質を明らかにした。特に、従来考えられていたような準安定状態の遍歴という描像がデータから支持されないことを見出した。松井は筆頭著者および責任著者として本研究全体に主導的な役割を果たした。

(2)特許出願

研究期間全出願件数: 0 件(特許公開前のものも含む)

1	発 明 者	〇〇 〇〇
	発 明 の 名 称	〇〇〇〇
	出 願 人	〇〇大学
	出 願 日	201x/xx/xx
	出 願 番 号	Xxxxxxx
	概 要	100 字程度
2	発 明 者	〇〇 〇〇
	発 明 の 名 称	〇〇〇〇
	出 願 人	〇〇大学
	出 願 日	201x/xx/xx
	出 願 番 号	Xxxxxxx
	概 要	100 字程度

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 「Spatiotemporal activity in the biological neural network: properties, functions, and potential applications.」松井鉄平、東北大学電気通信研究所、The 8th RIEC International Workshop on Brain Functions and Brain Computer、於東北大学(オンライン開催)(2022年2月)
2. 「Calcium imaging of spontaneous and visually evoked activity in the marmoset visual cortex.」松井鉄平、生理学研究所、生理学研究所研究会、於生理学研究所(オンライン開催)(2020年8月)
3. 「Multiscale calcium imaging of spontaneous activity in the primate visual cortical network.」松井鉄平、日本神経科学学会、Neuro2020 国際シンポジウム、於神戸国際会議場(オンライン開催)(2020年7月)
4. 「Development and Application of Multi-Scale Ca²⁺ Imaging in the Primate Visual Cortical Network.」松井鉄平、東北大学電気通信研究所、The 8th RIEC International Workshop on Brain Functions and Brain Computer、於東北大学(2020年2月)
5. 「Multiscale calcium imaging of spontaneous activity in the primate visual cortical

network.」松井鉄平、神経ダイナミクスミニワークショップ、於京都大学 (2019年10月)