

令和3年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 : 19402
 研究開発課題名 : 国際共同研究プログラムに基づく日米連携による脳情報通信研究
 副 題 : 脳の顔認識系の計算原理

(1) 研究開発の目的

高度な知能を実現する霊長類の脳において、その仕組みを統一的に説明できる計算原理を探求するため、マカクザルの高次視覚野における顔認識系に焦点を当てて、最新の実験・理論技法を駆使した計算神経科学研究によって、同系の計算原理の解明に挑む。特に、これまでの実験事実から発生した以下の疑問に焦点を当てる。

- a) 顔認識系ニューロンは、顔の部分や全体に関する様々な特徴を表現している。それを創発させる計算原理は何か？
- b) 顔認識系ニューロンには、顔刺激に特に強く反応する顔カテゴリ選択性という基本特性がある。その信号の発生の仕組みや、顔認識系における計算論的な役割は何か？
- c) 顔認識系では、顔の様々な特徴をネットワークで分散表現している。その相互作用と表現変換の計算原理は何か？

(2) 研究開発期間

平成 30 年度から令和 3 年度 (36 カ月)

(3) 実施機関

株式会社国際電気通信基礎技術研究所 (ATR) <代表研究者>

(4) 研究開発予算 (契約額)

総額 30 百万円 (令和 3 年度 5 百万円)
 ※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

- 研究開発項目 2: 顔カテゴリ選択性の神経機構
 - 2-2. ML ニューロンの非線形データ解析 (ATR)
- 研究開発項目 3: 顔特徴チューニング変換の神経機構
 - 3-1. 顔認識系ネットワークの新理論開発 (ATR)

(6) 特許出願、外部発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	0	0
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	1	0
	その他研究発表	15	2
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	0	0
	受賞・表彰	0	0

(7) 具体的な実施内容と成果

研究開発項目 2：顔カテゴリ選択性の神経機構

研究開発項目 2-2 ML ニューロンの非線形データ解析

米国側から実験データが提供された。顔領域 AM13 細胞であるが、今回は空間周波数の選択性が同定され、対応したガボールノイズを刺激に付加して実験された。この空間周波数に対応した前処理ステージを用意し、解析プログラムを適用した。その結果、記録された細胞のうち 7 細胞については、推定したモデルの平均予測性能は高く（平均 0.66）、かつ積なしの場合よりも有意に高かった（平均 0.50、 $p=1.6 \times 10^{-6}$ ）。さらに、それらの細胞のフィルタを調べたところ、一方のフィルタは、顔の輪郭や目鼻口など「顔特徴」のようなパターンを持っており、もう一方のフィルタは、ガボールノイズの量が多くなると抑制性が強まる特性を持っており、「顔カテゴリ」に対応すると考えられた。一方、残りの 6 細胞については、上記のような特性は見られず、二つのクラスタがあるとも考えられた。以上は、混合スパース符号化理論で予測された「顔特徴と顔カテゴリの積計算」仮説を支持するような有望なデータが集まり始めたと言える。しかし、コロナ禍で、米国側で実験室が長期に閉鎖されていたこともあり、計測細胞数がまだ少なく、仮説の証明にはまだ至っていない。

研究開発項目 3：顔特徴チューニング変換の神経機構

研究開発項目 3-1 顔認識系ネットワークの新理論開発

次に、当初計画にはなかったが、既に関与したモデル GVAE をさらに発展させたモデル CIGMO (Categorical Invariant Generative Model) の開発を行った。これまでのモデルでは、顔領域のように、単一のカテゴリに関して恒常性を生成型のモデルの中で実現していた。今回はさらにこれを一般化し、高次視覚野の一般物体表現のように、複数のカテゴリに関して、恒常的な特徴表現を含むモデルを目指した。具体的には、カテゴリに対応して複数の生成モジュールからなるネットワークを考え、それぞれで物体の形と向きを分離して表現するようにする。さらに、カテゴリを別のネットワークで推定し、対応するモジュールの活動を制御するようにした。モジュールの制御は、上記の研究開発項目 2 から着想して「積演算」によって行うようにした。このモデルに対し、様々なカテゴリの様々な形・向きの物体画像データセット ShapeNet を用い、ほぼ教示を与えることなく訓練させた結果、カテゴリ・形・向きの表現を獲得できることを確認した。また、ワンショット学習や、恒常的クラスタリングといった挑戦的な下流タスクを実行したところ、既存のモデルを凌駕する性能を示した。これらから、高次視覚に見られる「カテゴリ化された恒常的表現」は、人工知能モデルの性能向上にも寄与できることがわかった。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

1. 計画

研究開発項目 1 および 2 の顔認識系の実験検証に関しては、コロナ禍で未完了な部分も含め、引き続き進めていく。特に、100~200 個程度の細胞数、対象領域 ML からの記録、混合スパース符号化モデルなどの学習モデルとの定量比較、などは重要な課題として残されており、今後取り組んでいく。また、本研究の当初計画をさらに拡張して、より強い検証ができるように実験を改良していく。具体的には、データから推定したモデルを用い、そこから新規画像を生成し、サルに再提示し、反応予測の検証を行うというオンライン実験を行う。これにより、「顔特徴と顔カテゴリの積計算」が行われていることのより強い証拠が得られることになると思われる。ここまでの手法では、顔特徴と顔カテゴリに関する計算過程を明らかにすることはできても、他の特性、特に高次の顔領域 (AM) の重要な性質である、「顔の向きに関する恒常性」は捉えることはできない。そこで、これに対応するためにより発展させた実験パラダイムや、データ解析手法も考案していきたいと考えている。一方、研究開発項目 3 で開発した深層生成学習モデル GVAE や、CIGMO について、より内容を深めた研究を行なっていく。特に、CIGMO の一般物体表象について、下流タスクの性能を高めることができるというこれまでの知見を踏まえ、モデルを改善しながらさらに性能向上を試みたい。例えば、学習過程に正則化を行い、例えば敵対的学習や、半教師あり学習と呼ばれる仕組みなどを導入して、より表現の精度を上げることが考えられる。

2. 展望

本研究は、顔領野という最も解明が進んでいる脳領域の一つを起点とし、幅広い認知的な皮質領野の計算原理に迫りたいという動機から始まっていた。したがって、本研究の成果がどのように一般化できるかが、次の興味となるだろう。本研究は、実験そのものは顔領野を対象に行なったが、方法論は顔に限定せず、一般物体に適用することにより高次視覚野の普遍的な計算原理も明らかになることも期待できる。さらには、本研究で同定した計算過程、特に表現のカテゴリ化に重要な役割を果たす「積計算」は、高次視覚野に限らず、他の感覚系や頭頂連合野など、大脳皮質に広く使われている可能性もある。本研究を出発点に、認知的な脳領野の計算原理が明らかになっていくことが期待される。一方、本研究で開発した深層生成学習モデル、特に一般物体表現に関する CIGMO モデルは、高次視覚野の持つカテゴリによるモジュール性と、恒常性を同時に反映した初めてのモデルであり、物体画像を用いたさまざまな下流タスクのための特徴表現として、コンピュータビジョンやロボティクスなどで有用になる可能性がある。また、ヒトの脳機能画像計測などの技術と組み合わせることにより、例えば高次視覚野から人間がイメージした物体を、脳情報から解読するようなブレイン・マシン・インタフェース技術など、医療応用へつながることも期待される。

(9) 外国の実施機関

ロックフェラー大学（アメリカ）〈代表研究者〉