

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 2 年度 10 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 1 : 顔特徴チューニングの神経機構
  - 1-2. ML ニューロンのデータ解析 (ATR)
- 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	1
	その他研究発表	13	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1：顔特徴チューニングの神経機構

顔ニューロンの神経活動からその計算過程を解析するため、すでに開発したモデル指向データ解析プログラムを用い、米国側から提供を受けた実験データを用いて解析を行った。なお、本項目の顔特徴表現の解析は、次項目の顔カテゴリ選択性の解析と、作業を統合することにしたため、詳細は以下に記す。

### 研究開発項目2：顔カテゴリ選択性の神経機構

米国側チームで行なっている、サルの fMRI・単一細胞の連携計測から得られた実験データを用い、データ解析を進めた。まず、前年度に提供を受けた暫定的なデータに関して、詳細を解析した。このデータは、顔領野 ML および AL における合計 266 細胞の、顔画像と物体画像（全 144 画像）への応答データである。当初想定していたより画像数は少ないが、多数の試行により応答ノイズは少ない。解析では、ニューロンの応答データから、その計算過程を表すモデルが推定できる。モデルはまず、低次視覚野を模した固定の前処理ステージがあり、その出力を並行に設置された2つの線型フィルタを通し、それぞれ異なる非線形の活性化関数を通したのち、最後にそれらの積を取るという形をしている（「積あり」）。モデルの訓練では、この2つの線型フィルタの重みを神経データで推定し、予め分けておいた試験データで予測性能を測定する。その結果、平均的な予測性能は高く（相関係数で ML 平均：0.82、AL 平均：0.72）、推定されたモデルの一定の妥当性が示された。しかし、この結果を、フィルタが一つのみと仮定した場合（「積なし」）のベースラインケースと比較した結果、大多数のニューロンに関して「積あり」と判定されたものの、予測性能の平均差は0.02程度と非常に低く、積を含む計算が行われている証拠は弱かった。しかし、「積あり」と判定されたニューロンをより詳細を調べたところ、両ケースに最も差が出る視覚刺激は、「顔のような特徴がありながらも顔ではない」画像で、そのような画像は少数しかいないために、平均性能の差が小さかったのではないかと考えた。したがって、より多数の刺激画像を使ったデータで実験をできないかと、米国側チームにフィードバックした。

次に、今年度米国側で行われた新たな実験のデータの提供を受け、同様の解析を行った。このデータは、顔領野 AM における15細胞の応答データである。刺激セットはより当初計画に沿った多数の顔画像と、様々なノイズでマスクされた顔画像（全 6000 画像）への応答データである。しかし、対象のサルの解剖学的特性から、当初想定していた領野 ML ではなく AM に行われた。また、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い。このデータを解析した結果、平均的な予測性能はやはり高かった（平均0.62）。しかし、「積あり」と判定されたニューロンはごく少数（2つのみ）で、平均予想性能ではベースラインとの差がほとんどなかった。これから、積を含むような計算が行われているという強い証拠は見出せなかった。しかし、元になる理論は、領野 AM ではなく領野 ML に関して積計算があるという予測をしていたため、あらためて ML を対象にした実験にできないかと、米国側チームにフィードバックした。

### 研究開発項目3：顔特徴チューニング変換の神経機構

前年度までに進めていた深層生成学習モデル Group-based variational autoencoder をさらに発展させたモデル、Mixture of group-based variational autoencoder の開発を進めた。これまでのモデルでは、顔領野のように、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することができていた。今回はさらに、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内包できるモデルを目指した。具体的には、複数の生成モジュールからなるネットワークを考え、一つのモジュールが一つのカテゴリに対応し、物体の形と向きの変数を持つようにする。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。全体として、カテゴリ・形・向きの3変数の推定を順方向のネットワークで、それらから画像の再構成を行う逆方向のネットワークからなる、オートエンコーダ型のモデルとなった。ま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 of 物体画像を、ほぼ教示を与えずることなく訓練させた結果、カテゴリ・形・向き of 表現を獲得できることを確認した。

(8) 今後の研究開発計画

引き続き、米国側より提供されるであろう神経データの解析を進め、積計算の有無など、顔認識系の計算原理の特定を図っていく。また、開発している一般カテゴリの深層生成学習モデルについて、既存モデルとの比較も含めて、定量評価を進め、優位性を検証していく。

(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>