

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：94301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11517

研究課題名（和文）混合スパース符号化理論に基づく下側側頭野の顔ネットワーク計算モデル

研究課題名（英文）Computational model of face network in inferotemporal cortex based on mixture of sparse coding models

研究代表者

細谷 晴夫（Hosoya, Haruo）

株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報通信総合研究所・主任研究員

研究者番号：50335296

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：脳の高次視覚野の顔ネットワークから着想した2つの深層生成学習モデル group-based variational autoencoder (GVAE) およびその拡張である混合GVAEを開発した。これらの人工知能性能および、サルの顔ニューロンの応答特性の再現性を定量的に評価し、既存モデルとの優位性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

複雑の高次視覚野の計算原理の解明に向けて、重要な一歩を踏むことができた。また、構築した深層生成学習モデルは一般性があり、物体画像以外のデータセットにも幅広く適用可能性がある。

研究成果の概要（英文）：Inspired by the face-processing network in the primate higher visual cortex, we developed two deep generative models, group-based variational autoencoder (GVAE) and its extension, mixture of GVAEs. We quantitatively evaluated their performance in artificial intelligence tasks and their reproducibility of response properties of face neurons in macaque brain and thus showed advantages over existing models.

研究分野：計算神経科学

キーワード：深層生成学習 顔ニューロン 下側側頭野

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

複雑な物体など、高次の視覚情報を担当する脳領域が高次視覚野である。その情報処理原理が解明できれば幅広い応用性が期待できるが、実世界には途方もなく多種多様な物体があることを考えると、高次視覚野の仕組みを理解することは不可能にも思える。しかし、近年それを解く鍵として「顔ニューロン」が注目されている。すなわち、下側側頭野 (IT 野) において顔刺激に特に強く反応するニューロンのことであり、IT 野内の複数の小領域にクラスタ形成し、それら小領域が互いに密に結合して「顔ネットワーク」を作り、小領域ごとに固有の応答特性を示す。このような顔ニューロンの知見を足がかりに、高次視覚野における一般物体認識の解明へ、道が開けるかも知れない。しかし、このシナリオを完結させるためには、顔ネットワークの数理モデルの構築が、重要な要素になる。それも、(1) できるだけ実際の脳の計算と近く (すなわち神経生理学の実験事実と合致する)、かつ (2) 顔というドメインに依存せずに、入力画像の統計的性質を符号化できる一般性のあるもの、という条件を満たす数理モデルが求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、前項の2条件をみたす顔ネットワークのモデルを構築することである。その足がかりとして、申請者が、IT 野のモジュール性から着想を得て考案した「混合スパース符号化」という理論を出発点とする。このモデルでは、顔や物体などのカテゴリに特化したパーツ表現 (目鼻口など) が獲得され、顔モジュールと物体モジュールが競合的に入力を解釈するという仕組みになっている。このモデルは、サル ML という顔領域における「顔パーツの配置」に関する実験事実 (文献①) をほぼ全て再現できる。本研究では、この理論をさらに拡張し、まだ説明できていないものも含み、顔ネットワークの様々なチューニング性質をより幅広く説明できるモデルを考案するとともに、検証可能な理論予測を提示することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、神経生理学の実験事実と合致するような、顔ネットワークのモデルを構築することを目指し、またこれまでに開発した混合スパース符号化モデルの経験を活かし、深層生成学習という理論的枠組みを用いて、モデル構築を行うこととした。深層生成学習は、従来型の深層学習のように入力 (画像など) のクラス判別性能を最適化するものではなく、入力の生成能力を最適化する学習理論であり、スパース符号化モデルの拡張にもなっている。深層生成学習を効率よく安定的に実行するのに適した Variational Autoencoder (VAE) 法をベースにして構築することにした。

まず主要な性質である顔の3次元的な向きに関する恒常性を再現できるモデルを目指した。そのため、group-based VAE という新しい理論を開発した。これは、内容と変形という2独立変数と、ニューラルネットで生成過程を定義する深層生成学習モデルであり、順方向にもニューラルネットを併せ持つオートエンコーダ型のモデルである。また、確率的生成モデルとして定義され、不確定性の扱いも考慮してある。画像のような個別データを、内容が共通するものでグループ化したデータセットを入力とする。そして、グループ共通因子を内容、差分因子を変形として分離推定するように学習する方式を開発した。

次に、GVAE をさらに拡張して、顔以外の高次視覚野の一般物体に関する系を、深層生成学習モデルとして構築した。ここでは、混合スパース符号化モデルでも用いたアイデアを応用し、深層学習モデル GVAE の混合モデルとして構築した。すなわち、高次視覚野の物体のカテゴリに対応して混合コンポーネントを考えることにし、それぞれのコンポーネントの GVAE が、各カテゴリの恒常的な表現となっている。このようなモデルを生成モデルとして定式し、VAE の方法論で学習するというアルゴリズムを構築した。混合 GVAE と呼ぶことにする。

4. 研究成果

まず、GVAE について、人工知能モデルとしての性能を調査した。まず、定性的な性能を観察するため、顔画像やその他の3次元物体の画像データセットなどを適用した。その結果、内容と変形の2つの因子が分離して推定できることを確認した (図1)。また、定量的に評価するため、K ショット学習問題を用いて、潜在空間における恒常性強度を数値的に測定し、既存モデル MVAE や VAE と比較した (表1)。その結果、ほとんどのデータセットで GVAE が性能を上回った。この成果は、人工知能に関する国際会議 IJCAI で発表した (Hosoya, IJCAI 2019)。

次に顔ニューロンの性質を再現できるかを調査するため、3次元頭部モデルから生成された顔画像セットを用意し、GVAEをVAEの上に積層する階層的モデルを構築して、上記画像セットに適用した。これに対して、過去の生理学実験をシミュレートして、結果を比較したところ、顔領野AMとMLの複数のチューニング、すなわち「顔パーツの配置」に関する特性(文献①)、「顔の向き恒常性」に関する特性(文献②)は定性的・定量的に再現することができた(図2)。この成果は、計算神経科学に関する国際会議CCNで発表した(Hosoya, CCN, 2019)。一方、「顔パーツ間のコントラスト」に関する特性(文献③)については、定性的な類似点があったものの、定量的には実験事実と乖離があり、再現されたとは言えず、これについては課題が残るという結果になった。

混合GVAEを、一般物体に関する表現としての人工知能性能を評価するため、ShapeNetという物体画像のデータセットを用いて訓練した。その結果、物体カテゴリがラベルなしで現れ、かつカテゴリごとに内容と変形の情報が分離して表現されることが確認された(図3)。また恒常的クラスタリングおよび1ショット学習のタスクで、既存のモデルであるInvariant Information Clustering法や、GVAEとk-meansの組み合わせなどと比較し、性能を凌駕することがわかった。この成果は、人工知能系のワークショップにて発表した(Hosoya, WEASUL, 2021)。

<引用文献>

- ① Freiwald WA, et al. A face feature space in the macaque temporal lobe. Nature neuroscience. 2009;12:1187-96.
- ② Freiwald WA, Tsao DY: Functional compartmentalization and viewpoint generalization within the macaque face-processing system. Science 2010, 330:845-851.
- ③ Ohayon S, et al. What Makes a Cell Face Selective? The Importance of Contrast. Neuron. 2012;74:567-81.

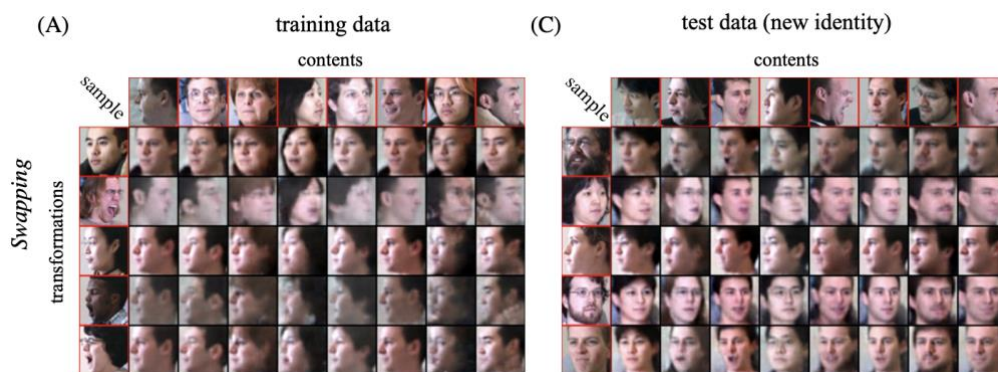


図1：顔画像にGVAEを適用した内容変形分離の例

success rate (%)	1-shot classification			5-shot classification			chance
	GVAE	MLVAE	VAE	GVAE	MLVAE	VAE	
MultiPIE	44.3 ±3.2	24.5±3.9	9.1±0.8	64.0 ±2.0	48.5±4.3	19.0±1.6	0.3
Chairs	58.4 ±6.7	53.3±5.2	18.4±3.0	82.7 ±3.9	80.7±4.3	41.3±6.3	0.6
KTH	27.1±1.6	30.1 ±0.6	14.2±1.7	48.9±1.8	55.3 ±0.8	35.6±3.1	0.4
Sprites	81.3 ±7.4	53.5±16.7	5.0±1.4	84.7 ±4.8	65.0±14.6	9.5±3.1	1.0
NORB	37.5 ±1.3	31.2±1.9	12.9±3.7	44.7 ±2.1	42.7±2.9	21.8±7.0	4.0

表1：Kショット学習によるモデル間の性能比較結果

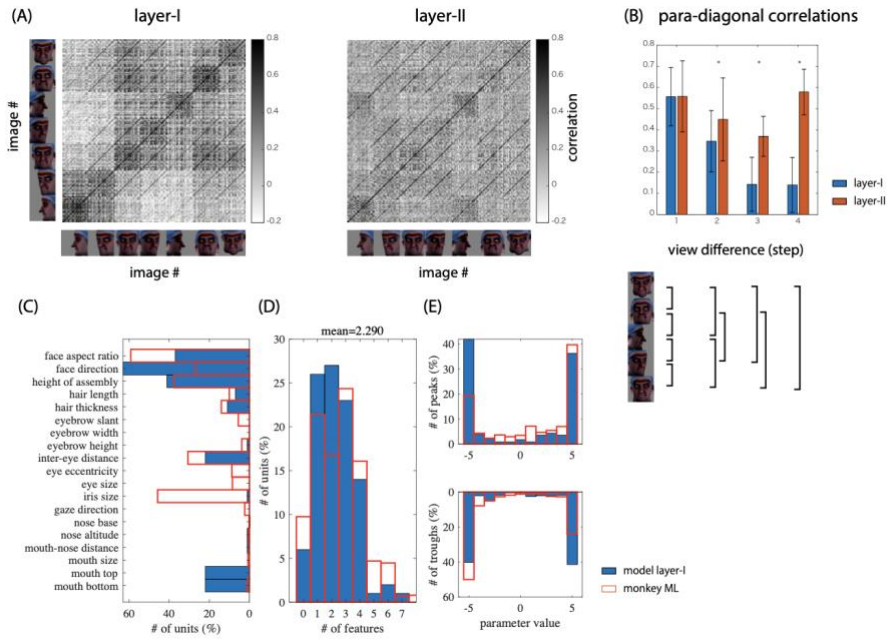


図2：GVAE-VAE ネットワークで再現された AM と ML の顔ニューロン特性

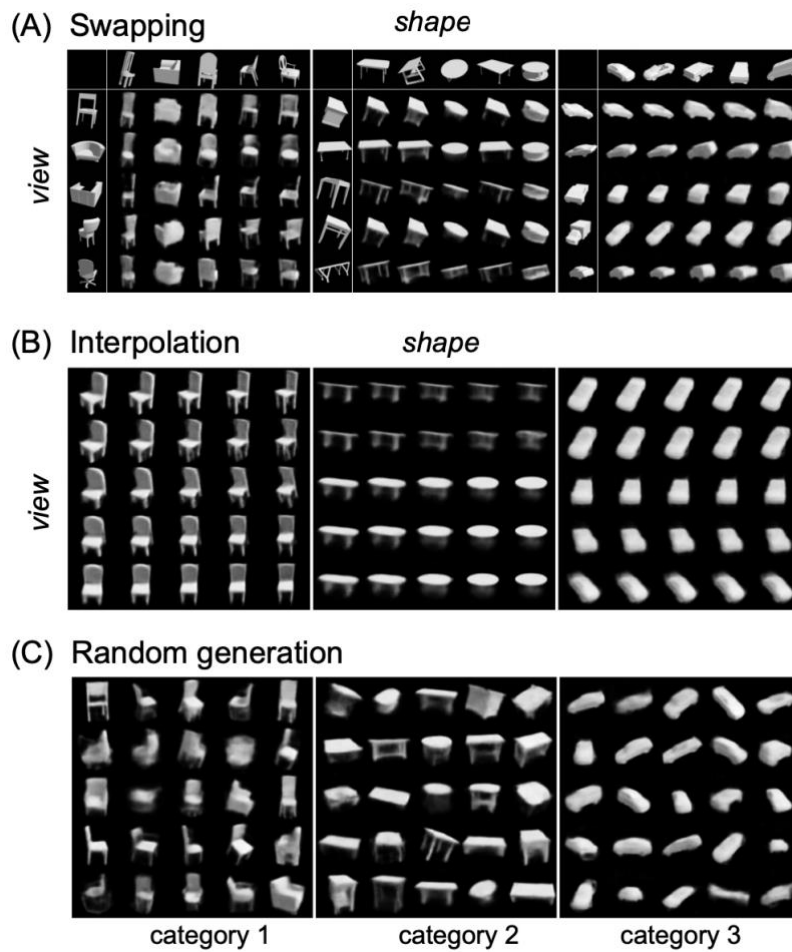


図3：混合 GVAE を ShapeNet に適用した結果例。3つのカテゴリごとに内容変形分離に成功している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Raman Rajani, Hosoya Haruo	4. 巻 3
2. 論文標題 Convolutional neural networks explain tuning properties of anterior, but not middle, face-processing areas in macaque inferotemporal cortex	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Biology	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42003-020-0945-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Freiwald Winrich A., Hosoya Haruo	4. 巻 31
2. 論文標題 Neuroscience: A Face 's Journey through Space and Time	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Current Biology	6. 最初と最後の頁 R13 ~ R15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cub.2020.10.065	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Haruo HOSOYA	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Group-based learning of disentangled representations with generalizability for novel contents	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 28th International Joint Conference on Artificial Intelligence(IJCAI2019)	6. 最初と最後の頁 N/A
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Raman RAJANI, Haruo HOSOYA	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Does CNN explain tuning properties of macaque face-processing system?	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Conference on Cognitive Computational Neuroscience(CCN2019)	6. 最初と最後の頁 N/A
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Haruo HOSOYA	4. 巻 N/A
2. 論文標題 A deep generative model explaining tuning properties of monkey face processing patches	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Conference on Cognitive Computational Neuroscience(CCN2019)	6. 最初と最後の頁 N/A
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計8件(うち招待講演 3件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Haruo Hosoya
2. 発表標題 A deep generative model explaining tuning properties of monkey face processing patches
3. 学会等名 第43回日本神経科学大会(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Haruo Hosoya
2. 発表標題 CIGMO: Learning categorical invariant deep generative models from grouped data
3. 学会等名 ICLR Workshop on Weakly Supervised Learning(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Raman RAJANI, Haruo HOSOYA
2. 発表標題 Evaluating CNNs as a model of face processing network of the macaque
3. 学会等名 第42回日本神経科学大会(Neuro2019)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 細谷 晴夫
2. 発表標題 Towards computational understanding of facial coding in the macaque
3. 学会等名 Cinet Friday Lunch Seminar (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 細谷 晴夫
2. 発表標題 霊長類脳における顔認識系の計算論
3. 学会等名 京都大学「脳科学に関わる数理」セミナー (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 細谷 晴夫
2. 発表標題 Computational models of the face processing system in the primate brain
3. 学会等名 科学研究費新学術領域「脳と人工知能」第5回領域会議 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 細谷 晴夫
2. 発表標題 Generalizability of disentangled representations for novel contents
3. 学会等名 脳と心のメカニズム第19回冬のワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 RAJANI Raman, Haruo HOSOYA
2. 発表標題 Does CNN explain the properties of the middle face patch area of primate?
3. 学会等名 Society for Neuroscience 48th Annual Meeting(Neuroscience2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	ラマン ラジャニ (Raman Rajani)		
研究協力者	フライヴァルト ヴィンリッヒ (Freiwald Winrich)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	ロックフェラー大学		