

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12149

研究課題名(和文) カテゴリー分類におけるTE野内の処理過程の解明

研究課題名(英文) Process of categorical information in area TE

研究代表者

松本 有央 (Matsumoto, Narihisa)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究グループ長

研究者番号：00392663

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)：本研究では、TE野内に複数の電極アレイを埋め込み、犬と猫の画像を分類するタスクを課している時のニューロン活動を記録し、線形デコーダーによりカテゴリーの正答率を計算した。その結果、実験日が進むにつれて、正答率が向上した。また、AlexNetの各層と顔画像を呈示した時に記録したTE野のニューロン活動を比較した。その結果、AlexNetの全結合層がTE野のニューロン活動の情報表現に似ていることが分かった。さらに、深層ネットと連想記憶モデルを組み合わせたモデルを構築し、複数のカテゴリー情報を異なった時間に出力することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々は、全く同じものに出会ったことが無くても、その形状等の特徴からその性質を推測することができる。それゆえ、カテゴリー分類機能は、人間にとって重要な機能である。しかし、脳内においてどのようなメカニズムでカテゴリー分類が行われているかは不明である。本研究により、TE野のニューロン集団の活動がカテゴリー分類タスクにより変化することが分かった。さらに深層ネットとTE野の比較をおこなうことで、TE野のリカレント結合が深層ネットに足りないことを明らかにした。これらはTE野がカテゴリー分類において重要であることを示唆している。

研究成果の概要(英文)：In this study, multiple electrode arrays were implanted in area TE, and neuronal activity were recorded during the task of classifying dog and cat images. Using a linear SVM decoder the correct rate of the category were obtained. As a result, the correct rate improved as the experiment day progressed. In addition, information representation of TE neuronal activity for facial images and that of each layer of AlexNet were compared. As a result, information representation in fully-connected layers of AlexNet was similar to that of TE neuronal activity. Furthermore, combined model of a deep neural network and an associative memory model were made, and the model could output multiple category information at different times.

研究分野：計算論的神経科学

キーワード：ニューロン カテゴリー ニューラルネット

1. 研究開始当初の背景

人間のカテゴリー分類機能は、生活する上で非常に重要な機能である。我々は、全く同じものに出会ったことが無くても、その形状等の特徴からカテゴリー分類をし、その性質を推測することができる。しかし、脳内でどのようなメカニズムでカテゴリー分類を行っているかは不明である。米国MITのMiller教授は、カテゴリー分類には脳の前側にある前頭葉が重要だと主張している (Freedman et al., 2001)。それに対して米国NIHのRichmond博士のグループは、前頭葉は重要ではないと主張している (Minamimoto et al., 2010)。サルの脳内で物体情報は初期視野のV1野から腹側経路を通してTE野に到達することが知られている。以前、イヌやネコなどのカテゴリー分類にはTE野は重要ではないが、イヌとネコの境界付近での細かい違いによるカテゴリー分類にはTE野が重要であることを示した (Matsumoto et al., 2016; Eldridge et al., 2018)。この結果から、物体情報がTE野に到達する前の脳部位でイヌやネコを大まかに分類でき、TE野でイヌやネコの境界付近の細かい特徴の差から分類できるようになっていると仮説をたてた。本研究課題では、「カテゴリー分類の情報がどのようにTE野で処理されているか」という問いに対して、TE野内に複数の電極アレイを埋め込み、ニューロン活動記録とニューラルネットワークモデルの両面から明らかにする。

2. 研究の目的

本研究の目的は、サルの脳のTE野内におけるカテゴリー情報の処理過程を明らかにすることである。これまで多数の研究者がこの問題に取り組んできたが、まだ解決には至っていない。それには、ニューロン活動記録のみならず、脳領域破壊実験やニューラルネットワークモデルからのアプローチが必要になってくる。以前、TE野を含む領域を破壊し、TE野を破壊した時にカテゴリーの境界から離れた部分は影響がないが、境界付近での分類能力が落ちることを発見した (Matsumoto et al., 2016; Eldridge et al., 2018)。それゆえ、TE野がカテゴリー境界付近でのカテゴリー分類に重要である可能性を示唆した。しかしながら、TE野内でカテゴリー分類の情報がどのように処理されるかはまだ分かっていない。そこで本研究では、TE野内に複数の電極アレイを埋め込み、多数のニューロン活動を同時に記録した。デコーディング手法により、記録したニューロン活動からコードしている情報を抽出した。さらに、ニューラルネットワークモデルによりモデル化した。

3. 研究の方法

本研究では、以下の3つの課題に取り組んだ。

課題1	サルの脳から多数のニューロン活動を同時に記録
	サルが注視タスクとカテゴリータスクの2種類のタスクの実行中に、TE野に埋め込んだ3個の電極アレイ(96本の電極)によりニューロン活動を記録した。
課題2	デコーディング手法の適用
	記録したニューロン活動からカテゴリー情報に関する情報を解読し、解読した情報の内容の日々の変化を調べた。
課題3	ニューラルネットワークモデルの構成
	深層ネットとTE野のニューロン活動の情報表現の比較を行った。さらに深層ネットとリカレントネットワークを組み合わせ、複数のカテゴリー情報を異なる時間に出力するモデルを構築した。

4. 研究成果

本プロジェクトにおいて、各課題について以下のような成果が得られた。

[課題1]サルの脳から多数のニューロン活動を同時に記録

サルが次の2つのタスクを実行中に、TE野に埋め込んだ3個の電極アレイからニューロン活動を同時に記録した。注視タスクは、カテゴリータスクの前後におこなった。

タスク1 注視タスク	<p>サルは画面を注視すると、イヌかネコかそのモーフィング画像が350-400ms間に呈示され350msの間隔をあけて5枚連続呈示される。最後まで注視を続けていると注視点青に変わりサルは報酬がもたらされた(図1)。</p> 
タスク2 カテゴリー	<p>サルはチェアについているバーを触り、画面を注視すると、イヌかネコかそのモーフィング画像が350-400ms間呈示される。その後、画像の上に緑色の四角形</p>


一タスク	が現れ、2-3 秒後に赤色に変わる。サルは赤色に変わってからバーを放すと、青色に変わり報酬または 4-6 秒間の待ち時間（報酬無し）が与えられた(図 2)。報酬が待ち時間のどちらが与えられるかは、刺激画像がイヌかネコかのカテゴリーで決まった。赤色でバーを放すと待ち時間と報酬無しで次の試行に進んだ。
	

図 2

### [課題 2]デコーディング手法の適用

課題 1 において記録したニューロン活動を用いて、それぞれの画像を呈示した試行での時間窓中での個々のニューロンの平均発火率を要素とするポピュレーションベクトルを構成し、線形デコーダーによりカテゴリーの正答率を計算した(図 3)。カテゴリータスクの実験日が進むにつれて、正答率が向上した。これは、カテゴリータスクにより、TE 野の結合が変化した可能性を示唆している。この結果は、北米神経科学学会において発表した。また、カテゴリータスクの前の注視タスクにおける正答率より、後の注視タスクにおける正答率の方が高かった。それゆえ、注視タスクにおいてもカテゴリータスクによる TE 野の結合変化が保持されている可能性を示唆する。この結果は、第 46 回日本神経科学大会において発表予定である。

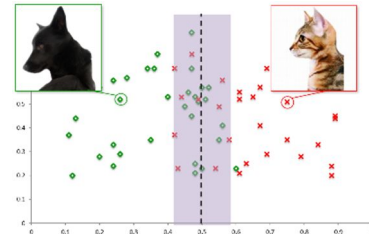


図 3

### [課題 3]ニューラルネットワークモデルの構成

深層ネットワークと TE 野のニューロン活動の比較を行うために、深層ネットワークである AlexNet を用いた。TE 野のニューロン活動は正立と倒立の 56 枚の顔画像（ヒト、サル）を注視タスクにおいて呈示して記録された 119 個のものを使用した(Sugase-Miyamoto et al., 2014)。各画像に対するニューロン活動を要素とした 119 次元のポピュレーションベクトルを作成し、画像間の距離行列を表す非類似度行列を構成した。実験で用いた画像を AlexNet にも入力し、各層での特徴ベクトルから非類似度行列を計算した。TE ニューロンの非類似度行列と AlexNet の非類似度行列のスピアマンの順位相関係数を計算した結果、AlexNet の全結合層で相関が最も高くなっていることが分かった。これは TE 野の情報表現と AlexNet の全結合層の情報表現が似ていることを意味している。しかしながら、TE 野のニューロンは顔画像を時間的に階層的に処理しているが、AlexNet では時間的に情報表現は変化しなかった。これらの成果は Journal of Computational Neuroscience 誌(Matsumoto et al., 2021)で発表した。さらに、AlexNet と TE 野を除去したサルの行動を比較し、AlexNet の畳み込み層までが TE 野を除去した脳における物体情報処理に似ていることを示した。この成果は Journal of Computational Neuroscience 誌(Matsumoto et al., 2023)で発表した。

AlexNet の全結合層が TE 野の情報表現に近いので、全結合層までの畳み込み層を低次視覚野のモデルとして使用できる可能性がある。物体情報が TE 野に到達する前の脳部位でだまかに分類し、TE 野内のリカレント処理により、詳細に分類できるようになっているという仮説を検証するために、深層ネットとリカレントネットワークである連想記憶モデル(Hopfield, 1982)を組み合わせたモデルを構築した。深層ネットとしては Xception ネット(Chollet, 2017)を用いて、最上位層を除いた出力を二値化ネットワーク(Hubata et al., 2016)に入力して、連想記憶モデルに入力した。その出力を全結合層に入力してカテゴリーの確率を計算した。その結果、女性画像にガウスノイズを加えた画像を入力すると、初めに日本人カテゴリーと出力してから、女性カテゴリーを出力した。これは、時間的に変化するカテゴリー分類には TE 野のリカレント結合が重要であることを示唆した。この結果は Frontiers in Systems Neuroscience 誌(Matsumoto et al., 2022)で発表した。

### < 引用文献 >

- Minamimoto, T. Saunders, R.C., Richmond, B.J. (2010). Monkeys quickly learn and generalize visual categories without lateral prefrontal cortex, *Neuron* 66:501-7.
- Matsumoto, N., Eldridge, M. A., Saunders, R. C., Reoli, R., & Richmond, B. J. (2016). Mild Perceptual Categorization Deficits Follow Bilateral Removal of Anterior Inferior Temporal Cortex in Rhesus Monkeys. *Journal of Neuroscience*, 36(1), 43-53.
- Eldridge, M. A., Matsumoto, N., Wittig, J. H. J., Masseau, E. C., Saunders, R. C., & Richmond, B. J. (2018). Perceptual processing in the ventral visual stream requires area TE but not rhinal cortex. *Elife*, 7.
- Sugase-Miyamoto, Y., Matsumoto, N., Ohyama, K., & Kawano, K. (2014). Face inversion decreased information about facial identity and expression in face-responsive

neurons in macaque area TE. *Journal of Neuroscience*, 34(37), 12457-12469.

Matsumoto, N., Mototake, Y. I., Kawano, K., Okada, M., & Sugase-Miyamoto, Y. (2021). Comparison of neuronal responses in primate inferior-temporal cortex and feed-forward deep neural network model with regard to information processing of faces. *J Comput Neurosci*, 49(3), 251-257.

Matsumoto, N., Taguchi, Y., Shimizu, M., Katakami, S., Okada, M., & Sugase-Miyamoto, Y. (2022). Recurrent Connections Might Be Important for Hierarchical Categorization. *Front Syst Neurosci*, 16, 805990.

Matsumoto, N., Eldridge, M. A. G., Fredericks, J. M., Lowe, K. A., & Richmond, B. J. (2023). Comparing performance between a deep neural network and monkeys with bilateral removals of visual area TE in categorizing feature-ambiguous stimuli. *J Comput Neurosci*.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Matsumoto Narihisa, Taguchi Yusuke, Shimizu Masaumi, Katakami Shun, Okada Masato, Sugase-Miyamoto Yasuko	4. 巻 16
2. 論文標題 Recurrent Connections Might Be Important for Hierarchical Categorization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Systems Neuroscience	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnsys.2022.805990	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 Matsumoto Narihisa, Mototake Yoh-ichi, Kawano Kenji, Okada Masato, Sugase-Miyamoto Yasuko	4. 巻 49
2. 論文標題 Comparison of neuronal responses in primate inferior-temporal cortex and feed-forward deep neural network model with regard to information processing of faces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Computational Neuroscience	6. 最初と最後の頁 251 ~ 257
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10827-021-00778-5	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Matsumoto Narihisa, Eldridge Mark A. G., Fredericks J. Megan, Lowe Kaleb A., Richmond Barry J.	4. 巻 -
2. 論文標題 Comparing performance between a deep neural network and monkeys with bilateral removals of visual area TE in categorizing feature-ambiguous stimuli	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Computational Neuroscience	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10827-023-00854-y	査読の有無 有
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

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 林和子, 松本有央, 松田圭司, 三浦健一郎, 山根茂, 松尾真, 柳井啓司, Eldridge Mark, Saunders Richard, Richmond Barry, 永井裕司, 宮川尚久, 南本敬史, 岡田真人, 河野憲二, 菅生康子
2. 発表標題 Effects of differences in facial surface properties on temporal cortical neuronal activity and discrimination learning in macaque monkeys
3. 学会等名 第44回日本神経科学大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林和子, 松本有央, 松田圭司, 三浦健一郎, 山根茂, 松尾真, 柳井啓司, Eldridge Mark, Saunders Richard, Richmond Barry, 永井裕司, 宮川尚久, 南本敬史, 岡田真人, 河野憲二, 菅生康子
2. 発表標題 Effects of different facial surface properties on neuronal activity in the temporal cortex and on discrimination learning in macaque monkeys
3. 学会等名 日本動物心理学会第81回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林和子, 松本有央, 松田圭司, 三浦健一郎, 山根茂, 松尾真, 柳井啓司, Eldridge Mark, Saunders Richard, Richmond Barry, 永井裕司, 宮川尚久, 南本敬史, 岡田真人, 河野憲二, 菅生康子
2. 発表標題 Effects of differences in physical surface properties on facial expression discrimination in macaque monkeys
3. 学会等名 第43回日本神経科学大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林和子, 松本有央, 松田圭司, 三浦健一郎, 山根茂, 松尾真, 柳井啓司, Eldridge Mark, Saunders Richard, Richmond Barry, 永井裕司, 宮川尚久, 南本敬史, 岡田真人, 河野憲二, 菅生康子
2. 発表標題 Effects of different physical surface properties on face discrimination learning in macaque monkeys
3. 学会等名 日本動物心理学会第80回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本有央, 田口優介, 岡田真人, 菅生康子
2. 発表標題 Recurrent connections in anterior inferior temporal cortex might be important for hierarchical categorization
3. 学会等名 第42回日本神経科学大会・第62回日本神経化学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林和子, 松本有央, 松田圭司, 三浦健一郎, 山根茂, 松尾真, 柳井啓司, Eldridge Mark, Saunders Richard, Richmond Barry, 永井裕司, 宮川尚久, 南本敬史, 岡田真人, 河野憲二, 菅生康子
2. 発表標題 Neural coding of facial images with different skin textures in the temporal lobe of macaque monkeys
3. 学会等名 第42回日本神経科学大会・第62回日本神経化学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林和子, 松本有央, 松田圭司, 三浦健一郎, 山根茂, 松尾真, 柳井啓司, Eldridge Mark, Saunders Richard, Richmond Barry, 永井裕司, 宮川尚久, 南本敬史, 岡田真人, 河野憲二, 菅生康子
2. 発表標題 Neural representation of physical surface properties of faces in the temporal lobe of macaque monkeys
3. 学会等名 日本動物心理学会第79回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Wenliang Wang, Bing Li, Mark Eldridge, Narihisa Matsumoto, Kazuko Hayashi, Martinez Gomez, Yasuko Sugase-Miyamoto, Barry Richmond
2. 発表標題 Neural activity in area TE, not TE0, correlates with monkeys' learning in a visual categorization task
3. 学会等名 Neuroscience 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keisuke Shioya, Shun Katakami, Kazuko Hayashi, Keiji Matsuda, Narihisa Matsumoto, Shotaro Akaho, Kenji Kawano, Masato Okada, Yasuko Sugase-Miyamoto
2. 発表標題 Are receptive field sizes of area TE neurons related to encoding information about categories of face images?
3. 学会等名 Neuroscience 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林 和子, 松本 有央, 松田 圭司, 三浦 健一郎, 山根 茂, Eldridge MA, Saunders RC, Richmond BJ, 永井裕司, 宮川尚久, 南本敬史, 岡田真人, 河野 憲二, 菅生(宮本) 康子
2. 発表標題 Neural and behavioral correlates of discriminating facial expressions with different skin textures in macaque monkeys
3. 学会等名 日本生理学会 第100回記念大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河野 憲二, 林 和子, 松本 有央, 松田 圭司, 三浦 健一郎, Eldridge MA, Saunders RC, Richmond BJ, 菅生(宮本) 康子
2. 発表標題 Effects of saccadic eye movements on face-responsive neurons in the inferior temporal cortex of macaque monkeys
3. 学会等名 日本生理学会 第100回記念大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 菅生(宮本)康子, 塩谷 佳介, 林 和子, 松田 圭司, 片上 舜, 松本 有央, 赤穂 昭太郎, 岡田 真人, 河野 憲二
2. 発表標題 Correlations between receptive-fields of face-responsive neurons in monkey area TE and their coded facial information
3. 学会等名 Neuro2022
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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	米国国立衛生研究所 (NIH)			