

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K11485

研究課題名（和文）背景脳活動が遍歴する下でも恒常的に感覚認識できる神経計算機構の解明

研究課題名（英文）Computational study of neural information processing for perceptual constancy under changing environments

研究代表者

三浦 佳二 (Miura, Keiji)

関西学院大学・生命環境学部・教授

研究者番号：60520096

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：脳の神経細胞による神経符号化が変動に対して恒常性を持つ仕組みを、情報幾何学やトロピカル幾何学を活用して明らかにすることを目的とした。特に、長期背景活動成分を分離除去した残さ活動が、神経細胞間でどの程度短期間に同期しているか、を情報幾何学の直行性に基づいて推定できる相関の指標を新規開発した。また、通常のユークリッド距離を用いる機械学習法を、トロピカル距離を用いる設定へと改良することで、時系列入力を持つトレンドに対し頑健な機械学習法を新規開発した。13報の論文出版を通して、成果発表を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脳の研究においては、ある神経細胞がどんな感覚刺激に応答するのかを調べるのが慣例であるが、近年は何も刺激が無い時の活動も注目されつつある。そして意外なことに、この背景活動は大きく変動する一方、刺激に対する応答は実は相対的に小さい事が報告された。本課題では、はたして脳は、背景活動が大変動する中、どのようにして感覚刺激を認識できるのか、の解明を目指した。背景活動を考慮した新規脳情報処理モデルの導出は、より精度の高い脳信号解釈を可能とし、深層学習の設計指針を与え、脳疾患の病因解明にも繋がりと期待される。

研究成果の概要（英文）：We investigated the homeostasis of neural coding under changing environments by using information geometry and tropical geometry. Especially, we developed a new measure of correlations which is orthogonal to the background baselines of two time series. Also, we extended various machine learning methods to the tropical geometric setting in order to treat the time series with trends. We published 13 research articles.

研究分野：Computational Neuroscience

キーワード：tropical geometry information geometry deep learning default mode networks neural coding

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

脳の研究においては、ある神経細胞がどんな感覚刺激に応答するのかを調べるのが慣例であるが、近年は何も刺激が無い時の活動も注目されつつある。そして意外なことに、この背景活動は大きく変動する一方、刺激に対する応答は実は相対的に小さい事が報告された。はたして脳は、背景活動が大変動する中、どのようにして感覚刺激を認識できるのか、という難問が残されていた。

### 2. 研究の目的

本課題では、はたして脳は、背景活動が大変動する中、どのようにして感覚刺激を認識できるのか、の解明を目指す。背景活動を考慮した新規脳情報処理モデルの導出は、より精度の高い脳信号解読を可能とし、深層学習の設計指針を与え、脳疾患の病因解明にも繋がると期待される。

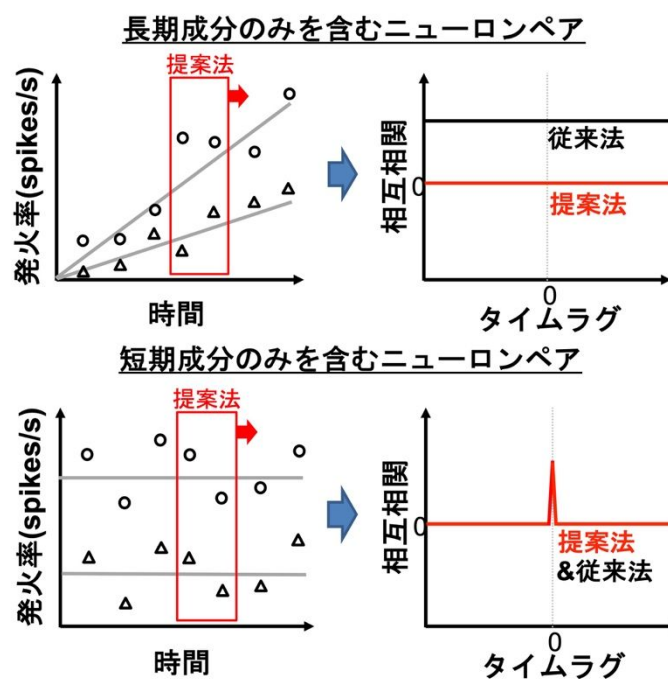
### 3. 研究の方法

(1) 変動に対して恒常性を持つ脳の仕組みを明らかにする目的で、特に、背景活動成分を分離除去した残さ活動が、細胞間でどの程度同期しているか、を情報幾何学に基づいて推定できる相関の指標を新規開発した。

(2) 入力の変動に対し頑健なため、視覚情報処理のモデルとして最も性能が高いとされる深層学習の性能を、トロピカル幾何学を用いて理論的に評価する試みも行った。ReLU型の活性化関数はトロピカル幾何学を用いて手計算により理論解析が可能であるため、ある問題を解くのに何層必要となるかを、試行錯誤ではなく、理論的に予言することを目指した。

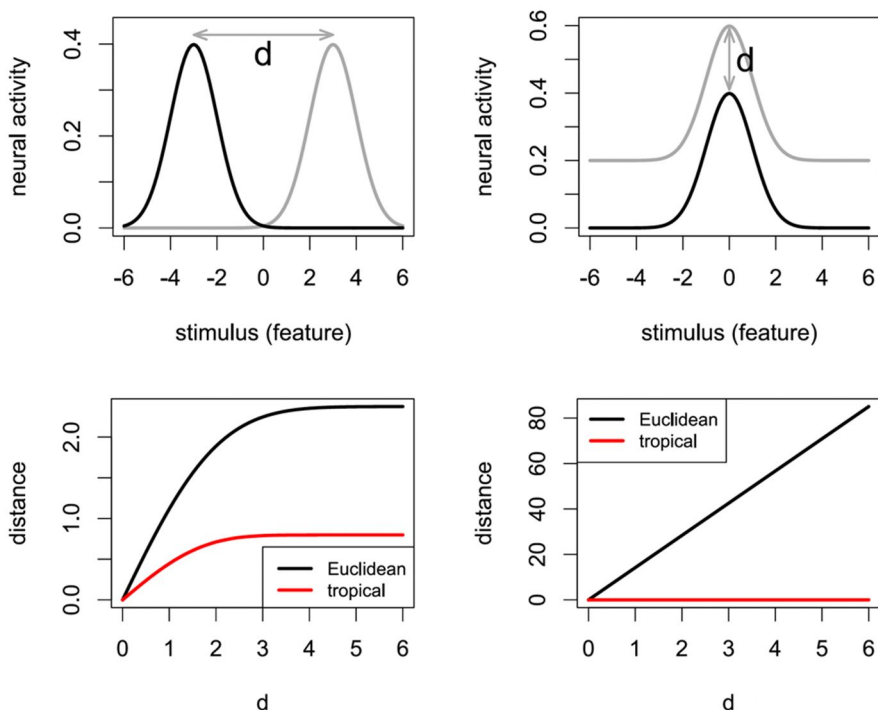
### 4. 研究成果

(1) 新規開発した指標により、背景活動由来の長期成分の相関と、固有の短期成分の相関とを別々に見積もることができるだけでなく、機械学習を用いたデコーディング解析と組み合わせることで、それぞれの成分の存在が神経情報表現にとって得なのか損なのかを解明できるようになった。我々は、一次視覚野の神経活動データを例にして、このような解析が実際にできることを実証した。



図：提案法による相互相関関数の計算例。本研究成果として、2本の時系列データ間の相関を推定する、情報幾何学に基づいた新規手法を提案したので、それを従来の相互相関関数と比較した。従来の相互相関関数は、神経細胞間の相関関係を捉える上で、ある時点での相関関係を見るのではなく、時系列的に見ることで細胞間の相関関係性をより深く観ることができる方法である。しかしながら、細胞間の時間相関には一般には二種の成分が含まれ、「時間経過すると複数の細胞の活動レベルが上昇することで生じる長期成分」と「発火の同時性により生じる短期成分」が考えられるのであるが、従来法では必ずしもそれらを区別できない。一方、提案法では、一言で言えば、隣り合う2試行の時間範囲で前試行より上がったか下がったかにより2細胞の相関があるかどうかを見るため、長期相関を無視して、短期相関成分のみを取り出すことができる。

(2) トロピカル幾何学を(深層学習に必ずしも限定しない広い意味の)機械学習において利用する研究成果をあげることで、方法論としての道具立てを整えた。一般に機械学習は類似度をもとに予測するものであるため、異なる距離の指標を用いるということは、新規な機械学習法を開発することに他ならない。事実、慣習的なユークリッド空間とは異なる距離を、適切な場面で用いることで、従来の機械学習法よりも精度を向上させられる例が存在する。下の図においては、ユークリッド距離ではなくトロピカル距離を用いることでメリットがある例を示している。ここで挙げた神経応答の例の他にも2つの系統樹の間の距離を測る場合にも、トロピカル距離は優れていることが知られている。さらに今後は、これまでに出版した論文において開発されたトロピカル代数の手法をさらに発展させることで、深層学習がなぜ高い性能を発揮できるのかを理論的に解明する研究にも役立てていく予定である。



図：トロピカル距離 (Tropical Distance) により、感覚刺激に対する神経細胞の応答の非類似度を測る例。(左段) 黒色線と灰色線の2つの神経細胞の応答の違いが、並進移動で説明されるような場合には、並進移動した長さ  $d$  が、ユークリッド距離にもトロピカル距離にも反映される。(右段) 黒色線と灰色線の2つの神経細胞の応答の違いが、上下方向の持ち上げとして説明されるような場合には、持ち上げた長さ  $d$  が、ユークリッド距離には反映されるが、トロピカル距離には反映されない。

これらの結果からわかるように、例えば、脳のベースライン活動(持ち上げに相当する時系列トレンド)には関心が無く、細胞を分類できれば良い場合などには、トロピカル距離を用いることが適している。すなわち、左段上の黒色線と灰色線は異なる神経細胞であると想定する一方で、右段上の黒色線と灰色線は同じ神経細胞ではあるが時間経過後に差が出たものと想定すれば、トロピカル距離では同じ細胞の間の距離は0となるため細胞分類に都合が良い。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yoshida Ruriko, Takamori Misaki, Matsumoto Hideyuki, Miura Keiji	4. 巻 157
2. 論文標題 Tropical support vector machines: Evaluations and extension to function spaces	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 77~89
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2022.10.002	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 該当する
1. 著者名 Miura Keiji, Yoshida Ruriko	4. 巻 -
2. 論文標題 Plucker coordinates of the best-fit Stiefel tropical linear space to a mixture of Gaussian distributions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Information Geometry	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/s41884-023-00098-w	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 該当する
1. 著者名 Akiho Nakata, Keiji Miura	4. 巻 -
2. 論文標題 Computing Euler Characteristics as Topological Invariants of Binary Images Rapidly with Python and R	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of IW-FCV2022, The 28th International Workshop on Frontiers of Computer Vision	6. 最初と最後の頁 564-571
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 Ishikawa Tsuyoshi, Matsumoto Hideyuki, Miura Keiji	4. 巻 -
2. 論文標題 Identification of midbrain dopamine neurons using features from spontaneous spike activity patterns*	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)	6. 最初と最後の頁 2990-2993
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/EMBC.2019.8857574	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 NAKADA Kazuki、MIURA Keiji	4. 巻 E103.A
2. 論文標題 Mathematical Analysis of Phase Resetting Control Mechanism during Rhythmic Movements	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 398 ~ 406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2019MAI0002	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 Takahashi Toshiyuki、Maruyama Yoshiko、Ito Hiroyuki、Miura Keiji	4. 巻 6
2. 論文標題 Assessing the impacts of correlated variability with dissociated timescales	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 eneuro	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) 10.1523/ENEURO.0395-18.2019	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 Tsuyoshi Ishikawa、Hideyuki Matsumoto、Keiji Miura	4. 巻 -
2. 論文標題 Discriminating dopamine from non-dopamine neurons based on the spontaneous electrical activities	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc of IEEE Brain Initiative Workshop on Advanced NeuroTechnologies 2018	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) なし	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 中田一紀、三浦佳二	4. 巻 41
2. 論文標題 機械学習アルゴリズムのデータフロー表現とハードウェアアクセラレータの実装	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 多値論理研究ノート	6. 最初と最後の頁 1-8
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 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 -

1. 著者名 中田一紀, 三浦佳二, 小林真, 村井保之, 関田巖, 巽久行	4. 巻 41
2. 論文標題 位相幾何学的アプローチに基づく特徴抽出と音響ペンへの応用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 多値論理研究ノート	6. 最初と最後の頁 1-8
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 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 -

1. 著者名 中田一紀, 三浦佳二	4. 巻 118
2. 論文標題 データフロー表現と機械学習アクセラレータへの応用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 信学技報 IEICE-RECONF	6. 最初と最後の頁 73-78
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 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 -

〔学会発表〕 計29件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 23件)

1. 発表者名 Saki Uchibori, Hiroyuki Shimoji, Keiji Miura
2. 発表標題 Detection of ant positions with distinguished species for behavioral tracking by PyTorch SSD
3. 学会等名 Neuro2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ayame Kabumoto, Miura Keiji
2. 発表標題 Exploring deep network structures that maximize classification performance of CIFAR10 images
3. 学会等名 Neuro2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ambi Maeno, Keiji Miura
2. 発表標題 Generation of CG images of insects by DCGAN
3. 学会等名 Neuro2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中田 あきほ, 三浦 佳二
2. 発表標題 画像の連続変形に対して不変な特徴量を計算する神経回路モデルは、IT野の複雑な神経活動を説明しうる
3. 学会等名 第44回日本神経科学大会 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三浦 佳二
2. 発表標題 トロピカル幾何学を用いた神経活動解析
3. 学会等名 生理研研究会「力学系の視点からの脳・神経回路の理解」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Misaki Takamori, Hideyuki Matsumoto, Ruriko Yoshida, Keiji Miura
2. 発表標題 Classifying neural responses by tropical distances
3. 学会等名 Fusion of Mathematics and Biology (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Misaki Takamori, Hideyuki Matsumoto, Ruriko Yoshida, Keiji Miura
2. 発表標題 Classifying neural responses by tropical distances
3. 学会等名 The 43rd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Risako Morikawa, Hokto Kazama, Keiji Miura
2. 発表標題 Elucidating neural codes by explaining behaviors with a minimum number of units
3. 学会等名 The 43rd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahiro Sakane, Keiji Miura
2. 発表標題 How many layers are required in deep neural networks for discriminating a sawtooth boundary in two-dimensional input data?
3. 学会等名 The 43rd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuta Tanisumi, Kazuki Shiotani, Keiji Miura, Junya Hirokawa, Yoshio Sakurai, Kensaku Mori, Hiroyuki Manabe
2. 発表標題 Association of Odor Signals with Subsequent Behavioral Scene Signals in Piriform Cortex
3. 学会等名 第18回国際シンポジウム「味覚嗅覚の分子神経機構」(国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 T. HIWATASHI, A. Y. WANG, N. UCHIDA, K. MIURA
2. 発表標題 Distinguishing value-coding neurons from random walk neurons in block-structured experiments
3. 学会等名 Neuroscience 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. TANISUMI, K. SHIOTANI, K. MIURA, J. HIROKAWA, Y. SAKURAI, K. MORI, H. MANABE
2. 発表標題 Association of cue odor signals with predicted behavioral scene signals in piriform cortex neurons
3. 学会等名 Neuroscience 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中田一紀, 三浦佳二
2. 発表標題 リズム運動における位相リセット制御の機能的役割とその工学的応用 ~ 歩行制御に最適な位相反応曲線の数理設計 ~
3. 学会等名 IEICE MSS 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三浦佳二, 中田一紀
2. 発表標題 Neural Networks for Computing Touch Topology
3. 学会等名 APCV 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷岡勇太, 塩谷和基, 三浦佳二, 廣川純也, 櫻井芳雄, 眞部寛之
2. 発表標題 ラット梨状皮質ニューロンは匂いと「匂い経験」を紐づける: Go/No-Go学習および逆転学習における多彩な応答様式と、そのポピュレーションGo/No-Go相関表現
3. 学会等名 NEURO 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 樋渡峰透, Wang Y Alice, 内田直滋, 三浦佳二
2. 発表標題 ブロック毎に変動する価値を符号化した神経活動と酔歩を見分ける統計検定
3. 学会等名 NEURO 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三浦佳二, 石川剛史, 松本英之
2. 発表標題 自発電気活動に基づくドーパミンと非ドーパミンニューロンの判別
3. 学会等名 NEURO 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 京野秀, 圓山由子, 伊藤浩之, 三浦佳二
2. 発表標題 一次視覚野の方位判別能はトレンド除去により恒常性を保つ
3. 学会等名 NEURO 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三浦佳二
2. 発表標題 Estimating Effective Dimensions of Experimentally Recorded Spike Trains by Neural Ring
3. 学会等名 ICIAM 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三浦佳二
2. 発表標題 Selecting Minimum Explaining Variables by Pruned Primary Ideal Decomposition with Recursive Calls
3. 学会等名 SIAM AG 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsuyoshi Ishikawa, Hideyuki Matsumoto and Keiji Miura
2. 発表標題 Identification of midbrain dopamine neurons using features from spontaneous spike activity patterns
3. 学会等名 IEEE EMBC 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三浦佳二
2. 発表標題 タッチスクリーン手入力のトポロジーの実時間並列計算
3. 学会等名 ものづくり技術 新技術説明会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiyuki Takahashi, Yoshiko Maruyama, Hiroyuki Ito, Keiji Miura
2. 発表標題 Assessing the impacts of correlated V1 activities with dissociated timescales
3. 学会等名 Society for Neuroscience - Neuroscience 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三浦佳二
2. 発表標題 テンソル分解を用いたデータのノイズ除去
3. 学会等名 軽井沢グラフと解析研究集会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋利幸, 圓山由子, 伊藤浩之, 三浦佳二
2. 発表標題 異なる時間スケールでの1次視覚野同期発火の視覚刺激判別への影響
3. 学会等名 ネットワーク科学セミナー (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mana Osaki, Ju Tian, Naoshige Uchida, Mitsuko Watabe-Uchida, Keiji Miura
2. 発表標題 報酬系における非ドーパミンニューロンからドーパミンニューロンへのグレンジャー因果解析
3. 学会等名 第41回日本神経科学大会 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keiji Miura
2. 発表標題 Binarization of Spontaneous Neural Activities for Neural Ring Analysis
3. 学会等名 SIAM AN18 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Usui, Ayaka Onishi, Keiji Miura
2. 発表標題 Topological data analysis of across-sniff habituation in olfactory cortex
3. 学会等名 EASIAM2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三浦佳二
2. 発表標題 トポロジカル・データ・アナリシスの神経活動データへの応用
3. 学会等名 大阪市立大学 水関研セミナー (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>論文紹介：長期相関と短期相関を区別する  <a href="https://youtu.be/Ketc68vuFbQ">https://youtu.be/Ketc68vuFbQ</a></p> <p>Supplementary R-code, Takahashi et al (2019)  <a href="https://github.com/toshi-0415/eNeuro">https://github.com/toshi-0415/eNeuro</a></p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

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	Naval Postgraduate School			
米国	Harvard University			