

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：17501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K16127

研究課題名（和文）視床皮質系における情報の分解と統合、再構成に関する研究

研究課題名（英文）A study on decomposition, integration and reconstruction of information in thalamo-cortical systems

研究代表者

加藤 秀行 (Kato, Hideyuki)

大分大学・理工学部・講師

研究者番号：00733510

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：脳は外界情報を一度分解し、それら統合して脳内で情報を再構成していると考えられる。例えば、視覚情報処理系には色や形に特異的に反応するニューロンが存在し、これらニューロン集団により外界情報が処理されている。本研究では、このような脳の外界情報の処理の仕組みを明らかにすることを目指し、げっ歯類のヒゲからの外界情報伝達経路である視床皮質系を例に脳での外界情報の再構成性能を情報理論の観点から解析を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果では、視床皮質系を計算機上に再現し、大脳新皮質における外界情報の再構成性能を情報理論を用いて評価しており、これは脳の情報処理機構を明らかにするという神経科学の分野における最大の目標に対して貢献するものであり、学術的意義があると考えられる。さらに、脳の仕組みの理解が進むことにより、これらをもとにして発展してきた分野であるAIなどの発展をさらに加速させるという社会的意義もあると考えられる。

研究成果の概要（英文）：It is considered the brain decomposes the information of the outside and integrates and reconstructs it. For example, in the visual systems, some neurons specifically respond to colors and/or shapes and the assembly of the neurons process the information of the outside. In this study, using the thalamocortical system as an example, the performance of the reconstruction ability of the outside information in the cortex was investigated with the information-theoretic analysis to clarify the mechanisms of information processing of the brain.

研究分野：計算論的神経科学

キーワード：ニューロン 外界情報 視床皮質系 情報理論

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

生物は外界の情報を脳で処理することにより、行動の決定、思考や学習を実現している。外界の情報は感覚器官から視床を経由し、大脳新皮質に送られることが知られている (D. Feldmeyer et al., *Progress in Neurobiology*, 2013)。このような視床皮質系において、外界情報成分は一旦分解され、これら分解された外界情報は、大脳新皮質において再び統合される。例えば、ラットやマウスなどのげっ歯類はヒゲにおいて外界情報を取得し、外界情報は視床へと送られる。視床はヒゲの位置成分や速度成分、加速度成分に特異的に反応するニューロンにより構成されていることが報告されており (R. Petersen et al., *Neuron*, 2008)、これらの出力が皮質のニューロン集団への入力となる。

このような、外界情報の分解と統合は脳以外の処理系においても普遍的にみられる。視覚系では外界情報が色や明暗などの成分に分解され (R. W. Guillery & S. M. Sherman, *Neuron*, 2002)、聴覚系では音が様々な周波数成分に分解される (E. R. Kandel et al., *Principles of Neural Science 4th Ed.*, 2000)。このように、分解された情報は皮質において再び統合され、これらを処理することにより、外界情報が皮質において再び表現、すなわち、外界情報が再構成されていると考えられている。このように、外界情報の分解と統合・再構成は、脳のあらゆる領域において行われており、脳の情報処理戦略として普遍的なものであると考えられる。しかし、一方で脳がなぜこのような情報処理戦略をとっているのかは未だ明らかとなっていない状況である。

Tripathy らはニューロンの本質的性質の多様性が外界情報の表現能力、すなわち、再構成能力を向上させることを示唆する報告をしている (S. Tripathy et al., *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2013)。彼らは、ニューロン集団内の個々のニューロンの本質的特性が様でなく、完全にバラバラでもなく、ある程度の多様性を持つことが重要であるとしている。このような、ニューロン集団の多様性の再構成能力に対する有効性は嗅球 (K. Padmanabhan & N. N. Urban, *Nat. Neurosci.*, 2010) や海馬 (A. R. Graves et al., *Neuron*, 2012) などの研究において観測されており、この事実は脳が外界情報を一度分解する情報処理戦略をとっていることの一つの答えのようにも考えられる。ニューロン集団の多様性による外界情報再構成能力の向上については、先に述べたげっ歯類の視床のケースにも当てはまると推測されるが、これに関する検討は未だなされていない。加えて、げっ歯類におけるヒゲからの外界情報の場合、視床の出力がさらに皮質へとシナプス結合を介して伝達され処理される。したがって、例え視床において外界情報が再構成されていたとしても、皮質において外界情報が再構成されているかはわからない。

2. 研究の目的

上記研究背景に鑑み、申請者は電気生理学実験の発見をもとに、げっ歯類の視床皮質系を模倣するニューラルネットワークモデルを提案し、このニューラルネットワークモデルのシミュレーションから得られたデータを解析することで、ヒゲ1本からの外界情報が皮質においてどの程度再構成されているのかを検証する。その上で、視床のニューロン集団の本質的特性の比率を変えるなど、実際の系とは異なる状況におけるシミュレーションを行い比較することで、なぜ、げっ歯類の視床皮質系がこのような構成をとり、情報処理戦略をとっているのかを明らかにするための知見を得たい。

3. 研究の方法

皮質における外界情報の再構成能力を評価するために、げっ歯類の視床皮質系の数理モデルの構築を行う。構築したげっ歯類の視床皮質系は、次のような構成を有する。(1) 外界情報 (ヒゲの動き)、(2) 外界情報を皮質へと中継する視床のニューロン集団、(3) 皮質ニューラルネットワーク。(1) ~ (3) の詳細は以下のようにする。

- (1) 外界情報は、電気生理学の実験で用いられている白色ノイズおよび実際にげっ歯類のウィスキングをよく表現できるピンクノイズを用いた (R. Petersen et al., *Neuron*, 2008)。
- (2) 視床を構成するニューロン集団は、外界情報 (ヒゲ) の位置や速度、加速度などの特徴量に選択的に応答する性質を有する。そこで、簡素でありながら、これらニューロンの発火の統計量を再現することのできる線形-非線形ポアソン (LNP) モデルと呼ばれる確率モデルを用いることで視床のニューロン集団のモデル化を行った (R. Petersen et al., *Neuron*, 2008)。
- (3) 皮質のニューラルネットワークは、興奮性ニューロンと2種類の抑制性介在ニューロンから構成される。これらニューロンの異なる振る舞いは、拡張された MAT モデルにより実現された (S. Yamauchi et al., *Front. Comput. Neurosci.*, 2011)。特に、興奮性ニューロンはゆっくりと比較的規則的の反応を示すレギュラースパイキング (RS) タイプ、抑

制性介在細胞は速い応答を示すファストスパイクング (FS) タイプと発火しきい値の低い低しきい値スパイクング (LTS) タイプとした。これらニューロンをシナプス結合を介し相互作用させる。これらニューロン間の潜在的結合強度は、裾野の長い対数正規分布に従うように設定した (J. Teramae et al., *Sci. Rep.*, 2012)。さらに、ニューロン間の結合は、ニューロンの活動履歴に応じて変化する短期シナプス可塑性 (STP) を有する。そこで、M. V. Tsodyks と H. Markram により提案されたモデル (M. V. Tsodyks & H. Markram, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 1997) によりこの STP 現象を実装することを考えたが、この STP モデルでは、RS ニューロンから LTS ニューロンを結ぶシナプスの超線形的増強 (M. Beierlein et al., *J. Neurophysiol.*, 2003) が再現できないため、Tsodyks-Markram モデルに非線形性を導入し拡張した新たなモデルを提案する。

これら (1) ~ (3) を組み合わせたものを計算機上に実装し、数値シミュレーションを行い、数値シミュレーションから得られたニューロン活動のデータを解析する。ネットワーク構造の評価には複雑ネットワーク理論を用い、ニューロン活動などの時系列データの評価にはおもに情報理論やスパイク統計量を用いる。

4. 研究成果

- (1) 研究課題である「視床皮質系における情報の分解と統合、再構成に関する研究」の研究計画を遂行するための第一歩として、外界情報が提示された際の視床のニューロン集団の振る舞いについて解析を行った。外界情報として正規分布に従う白色ノイズを提示した場合、視床のニューロン集団の振る舞いは非同期的であり、個々のニューロンがランダムに発火することが確認された。次に同じ正規分布に従うが白色ノイズと比較すると低周波成分の強いピンクノイズを提示した場合、視床のニューロン集団の活動には弱い相関が生じることが確認された。さらに、時折非常に強い同期発火が生じることも明らかとなった。この傾向はピンクノイズの周波数成分のスペクトル密度を特徴づけるパラメータの値が大きくなるほど強くなる傾向がみられた。
- (2) 皮質のニューロン間を結ぶシナプスの振る舞いを再現する新たな STP モデルを提案し、提案モデルの解析を行った。提案した STP モデルは、既存のモデルに非線形関数を加えることで実現した。このモデルは微分方程式で記述されるものの、実際に計算の際に必要なのはニューロンが発火した際の値だけであるため、計算量を抑えるため離散化可能なように設計を行い、大規模なニューラルネットワークへの実装が可能となるようにした。このモデルを用いて、抑圧型シナプス、増強型シナプス、超線形増強型シナプスのランダムな入力に対する特性を解析した。その結果、抑圧型シナプスは入力の平均周波数に比例して線形にビットレートが情報することが明らかとなった。一方、増強型シナプスは1秒間に5発程度の低い周波数では急激にビットレートが増加するが、それ以上の周波数では、抑圧型と同様に入力周波数に対し線形にビットレートが上昇した。一方、超線形型のシナプスは、1秒間に5発程度の周波数までは通常の増強型シナプスと同様の振る舞いを示したものの、1秒間に5~20発程度の周波数の場合、ビットレートがほぼ横ばいであった。さらに、入力の平均周波数を上昇させると他のシナプスと同様に線形にビットレートが情報した。このことから、超線形増強型シナプスは、皮質ニューロンの活動レベルを調整する役割があることが示唆される。
- (3) 皮質のニューラルネットワークを構築するための指針を得るために、対数正規分布に従う入力に対する単一ニューロンレベルの活動の評価を行なった。この結果、RS タイプ、FS タイプ、LTS タイプのニューロンそれぞれにおいて、異なる平均結合強度において、もっとも結合強度の強い結合からの入力に対する相互情報量が最大化された。
- (4) 上記(3)の結果から得た指針をもとに(2)で提案した STP モデルを含む RS-FS-LTS 皮質ニューラルネットワークを構築し、そのネットワーク活動の解析を行なった。特にここでは、外界情報の提示がされていない場合、すなわち、皮質ニューラルネットワークの自発活動の解析を行なった。その結果、同期発火が伝搬し、その規模や継続時間がベキ則にしたがう神経雪崩現象が観測された。
- (5) (4)で構築した皮質ニューラルネットワークの構造解析に複雑ネットワーク理論を用いた結果、特に次数分布、およびネットワークモチーフを用いた解析において特徴的性質が見られ、次数分布は複数の正規分布が入れ子になったような分布を呈していた。また、皮質ネットワークにおけるネットワークモチーフの数を同じニューロン数、同じ結合数のランダムネットワークと比較すると、13種類のネットワークモチーフのうち約半数の7種類のモチーフが有意に多いことが明らかとなった。
- (6) 外界情報を提示した際の皮質ニューラルネットワークの活動を解析した結果、提示がな

い場合と比較し、各ニューロンのしきい値以下の活動の揺らぎが小さくなり、電気生理学実験と同様の現象が確認された (J. Poulet, *Nat. Neurosci.*, 2012)。さらに、皮質ニューラルネットワークにおける外界情報の再構成度を評価した。外界情報が白色ノイズの場合、外界情報は全く再構成されなかった。それに対し、外界情報がピンクノイズの場合、皮質においてある程度外界情報が再構成された。また、視床のニューロンの構成を変化させ、外界情報の再構成度を評価した実験では、ラットにおける実験データよりも外界情報の位置に選択的に応答するニューロンの割合がわずかに多い場合に外界情報再構成の精度がより高くなった。これには様々な理由が考えらるが、視床のニューラルネットワークを相互作用が無い簡素なものにしたことや視床から皮質への結合の特性が十分に再現されていないこと、抑制性介在ニューロン間のギャップジャンクションが考慮されていないことなどが考えられる。

- (7) 上記、ニューロンの活動を解析するために用いた非線形理論を応用することで、太陽光モジュールを有する DC-DC コンバータにおけるホモクリニック分岐に関する副産物的成果も得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kousaka Takuji, Osada Shoma, Kato Hideyuki, Asahara Hiroyuki	4. 巻 14
2. 論文標題 Mathematical analysis for homoclinic bifurcation in a DC-DC converter with a photovoltaic module expressed by a piecewise linear characteristic	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 1422 ~ 1423
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/tee.22945	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 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Toshichika Aoki, Hideyuki Kato, Takafumi Matsuura, Takayuki Kimura
2. 発表標題 Influence of Failures of Transmission Lines in Power Grid Using Oscillator Networks
3. 学会等名 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Wataru Kinoshita, Motoaki Sakai, Hideyuki Kato, Hiroaki Kurokawa, Haruna Matsushita, Takuji Kousaka
2. 発表標題 Application of Particle Swarm Optimization to the Calculation of Border Collision Bifurcation Point in a One-dimensional map
3. 学会等名 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤秀行
2. 発表標題 ネットワーク統計量が神経活動に与える影響
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Wataru Kinoshita, Hideyuki Kato, Hiroaki Kurokawa, Haruna Matsushita, Takuji Kousaka
2. 発表標題 Application of Particle Swarm Optimization for Calculating Local Bifurcation Point in Two- dimensional Continuous Dynamical Systems
3. 学会等名 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木俊親, 加藤秀行, 木村貴幸
2. 発表標題 慣性蔵本モデルを用いた 電力網のカスケード障害と発電機の配置の関連性
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤秀行
2. 発表標題 不均一神経回路網における最適スパイク伝達の基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 NOLTAソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木俊親, 加藤秀行, 木村貴幸
2. 発表標題 Simulated Annealingを用いた最適電力網の構築
3. 学会等名 電子情報通信学会 NOLTAソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshichika Aoki, Hideyuki Kato, Takayuki Kimura, Tohru Ikeguchi
2. 発表標題 Optimization of Synchronizability in Power Grids Using a Second-order Kuramoto Model
3. 学会等名 Metaheuristics International Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Kato
2. 発表標題 Nonlinearity in Phenomenological STP Model for Diverse Synaptic Dynamics
3. 学会等名 International Symposium on the Nonlinear Theory and Its Applications 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 M.Aoki, H.Kato, K.Fujiwara, T.Ikeguchi
2. 発表標題 Effect of connectivity weights of inhibitory neurons in neuronal avalanches
3. 学会等名 International Symposium on the Nonlinear Theory and Its Applications 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 加藤 秀行
2. 発表標題 非線形性を取り入れた短期可塑性モデルの応答特性
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会2018
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 Hideyuki Kato
2. 発表標題 Log-normal firing rate distribution during oscillation in STDP neural network with axonal conduction delays
3. 学会等名 NOLTAソサイエティ大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 青木舞優, 加藤秀行, 島田裕, 藤原寛太郎, 池口徹
2. 発表標題 数理モデルを用いた神経雪崩現象の解析
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hideyuki Kato
2. 発表標題 Connectivity analyses on self-organized neural competition networks
3. 学会等名 International Symposium on the Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2016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
---------	---------------------------	-----------------------	----