

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12165

研究課題名（和文）感覚運動連関におけるバイアスを利用したミクロスコピックな確率的情報処理の解明

研究課題名（英文）Microscopic probabilistic information processing inferred from a macroscopic bias in sensory-motor interaction

研究代表者

坪 泰宏 (Tsubo, Yasuhiro)

立命館大学・情報理工学部・准教授

研究者番号：40384721

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）：持続可能な社会の実現のために、低エネルギー型情報処理装置の代表である脳を模倣した新しい計算原理の解明が求められている。本研究課題では、人間の情報処理と機械学習の違いの一つである周期的感覚刺激に対するタッピング運動における誤差に着目し、その統計的性質と脳活動との関係を計測し、また関連脳領域の神経回路構造を調べることで、その誤差を再現するような確率型神経回路モデルの構築に必要な要件を調査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで脳を模倣した新しい計算原理の探索が様々なアプローチで行われてきたが、脳の低エネルギー性を生かすような確率型情報処理様式の解明には至らなかった。本研究課題では、確率型情報処理の足がかりとなる、最適化を用いない新しい数理モデルを考察し、その数理モデルの改良の評価方法としてのタッピング誤差分布、内部状態分布を与えたことで、今後の脳型確率情報処理様式の解明に向けた研究の前進に貢献した。

研究成果の概要（英文）：For realization of a sustainable society, it is necessary to elucidate new computational principles that mimic the brain, which is a representative energy-efficient information-processing device. In this research project, we focused on the bias of timing in tapping motion to periodic sensory stimuli, which is one of the typical differences between human information processing and machine learning, and investigated the requirements for constructing a stochastic neural circuit model that can reproduce the bias by measuring the relationship between statistical properties of the bias and brain activity as event-related potentials, and by examining the neural circuit structure in the relevant brain regions. We considered a new mathematical model that does not use optimization as a steppingstone to stochastic information processing.

研究分野：神経情報科学

キーワード：脳・神経 神経科学 情報工学 生体生命情報学 事象関連電位 確率型情報処理 低エネルギー バイアス

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。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

21世紀に入り、深層学習に代表される機械学習を用いた人工知能は、計算機の処理能力の増加や、計算方法の工夫により、幅広い分野で活用されてきている。一方で、従来型の機械学習による情報処理様式は、計算精度が非常に重要であるため、計算精度を維持するためのエネルギーコストが非常に大きいことが知られている。中長期的には、持続可能な社会の実現のために、次世代の情報処理計算様式として低エネルギー消費型の情報処理様式の提案が望まれている。次世代情報処理様式を開発する際の有力な手法の一つとして、低エネルギーで作動している脳の神経回路で行われている情報処理様式を模倣することが挙げられる。

神経回路及び神経細胞レベルで行われているミクロスコピックな情報処理は、主に理論神経科学分野で研究されてきた。そこではこれまで、神経回路の果たすべき機能として主に情報の記憶や分類などが設定され、その実現方法が議論されてきた。しかし、従来から研究されてきた記憶などの機能は半導体メモリなどを用いた従来型デバイスの方が優れている機能であり、神経回路を用いて果されている優位な機能ではない。また、現状での機械学習にも取り入れられている神経回路の構造上の特徴として並列性と階層性があるが、この他の特徴である素子やネットワークの多様性や確率性、ダイナミクスは、現状ではうまく取り入れられておらず、神経回路が果たしている優位な機能の探索は、有力な手がかりがないために、あまり進んでいないのが現状であった。

一方で、人間の行動レベルのマクロスコピックな情報処理は、心理学や認知科学によって精力的に研究されてきた。マクロスコピックな行動レベルの情報処理と、ミクロスコピックな情報処理を結びつけることができれば、神経回路が果たしている優位な機能の探索が可能になることが期待される。このような状況下で、Fristonらによる自由エネルギー原理などに代表される確率的情報処理が、マクロスコピックな情報処理とミクロスコピックな情報処理をつなげる記述方法として注目を浴びている。確率的情報処理の視点で、人間の行動レベルのマクロスコピックな情報処理を実現するために、どのようなミクロスコピックなシステムが必要になるのかを調べる必要がある。従って、ミクロスコピックな情報処理の制約条件につながりうるマクロスコピックな情報処理の特徴抽出をすることが重要になる。

### 2. 研究の目的

そこで本研究課題では、この方法として、これまでバイアスとして否定的に理解されてきた機械的な情報処理と人間の行動レベルの情報処理のズレを理論神経科学の視点から調べる方法を採用し、この情報処理のズレを確率的情報処理の観点から数理モデルとしてまとめることにより、ミクロスコピックな神経回路レベルのモジュールとしてのダイナミクスや入出力関係が満たすべき制約条件を導出することを目的とする。バイアスと呼ばれる、人間が示す「間違えた」応答の多くは、人間がそれを「間違い」とは知っているにも関わらず、普遍的に観測されることが報告されている。これは「間違えた」応答ではなく、機械とは異なる人間特有の情報処理様式に依存して顕在化していると考えた方がむしろ自然であり、このバイアスを解析することによって、人間の情報処理の基本様式に迫ることができると考えられる。従来の心理学や認知科学では、このバイアスの理解をマクロスコピックな現象として閉じて記述することで、現象を説明する数理モデル化がなされてきた。しかし、これらを拡張してミクロスコピックな神経回路レベルのモジュールとしての制約条件として記述するには至っていない。本研究課題では、以下の方法によりこの問題を解決することを目指す。

### 3. 研究の方法

マクロスコピックなバイアスを利用して、ミクロスコピックな制約条件を導出する際には、対象として扱うバイアスの選択が重要になる。本研究課題では、対象として周期的感覚刺激に対するタッピング運動における誤差に着目し、以下の方法によって研究課題を遂行した。

#### (1) 周期的感覚刺激に対するタッピング運動のマクロスコピックなモデル化

機械と人間の明らかな差の一つとして、感覚運動同期に関する不確定性がある。ロボットと人間に、数百ミリ秒から1秒程度の周期で提示される外界の刺激に対して同調してタッピングさせる場合を考える。ロボットは、センサー情報で外部の周期的な刺激信号を検出した後に運動指令を出すすると、タッピングの生じるタイミングは必ず刺激提示タイミングよりも遅延し、その運動の精度は刺激の種類には大きく依存しないと考えられる。一方で、人間は与えられる外界の刺激よりも一般に先行し、刺激の性質によってその精度は大きく変わることが知られている。ボールが床にはずんでいる動画(バウンシングボール刺激)において、ボールが床につくタイミングでタッピングする実験を行うと、フラッシュ刺激で一時的にタッピングタイミングを提示される実験を行った場合よりも精度が高くなることが報告されている。これは、バウンシングボール刺激では、次の刺激タイミングまでの時間情報を連続的に与えられるのに対し、フラッシュ刺激では次の刺激タイミングまでの時間情報は与えられず、突然刺激が提示されることと関係していると考えられる。バウンシングボール刺激はフラッシュ刺激に比べて、タッピングタイミングの精度と正確度は高くなると考えられるが、実際には、人間の場合、タッピングが周期的な

刺激信号に対して平均して数十ミリ秒先行してしまう負の非同期現象という正確度に関するバイアス現象が知られている。またタッピングの精度に関しては、精度が刺激のモダリティや性質に依存することが報告されている。さらに、申請者らは、タッピングの精度が高い刺激ほど正確度は低くなる傾向があり、このタッピングの精度や正確度がタッピング前後の脳活動に反映される仮説を報告した。これらの現象が、なぜ生じるのかについては十分に理解されていないが、サルなどの研究では、刺激の周期に対応する神経活動が報告されており、おそらく刺激のタイミングを確率的に予測している結果を反映していると考えられている。そこで不確定性をコントロールすることにより、タッピング精度がどのように影響を受けるのかを調査した。さらに、この課題を実行している際の刺激タイミングの予測における人間の内部状態について調査するために、マクロスコピックな確率モデルを導入し、脳のどの部位でどの時間帯で関連した脳活動として見られるのかについて調べた。

#### (2) マクロスコピックなモデル化を実現するためのミクロスコピックなモデル化

マクロスコピックなモデルを、ミクロスコピックな神経回路レベルのモデルとして確率的情報処理の形で表現する際の制約条件を明らかにするためには、基準となる数理モデルの選択及び構築が必要になる。タイミングというダイナミクスを伴う確率情報を、神経活動としてミクロスコピックな神経回路で実装する際に、どのような数理モデルを基点とすべきかを検討した。また上記のタッピングに関わる脳領域において、実際の脳神経系ではどのような神経回路構造が形成されているのかについて調べるための枠組みを構築した。

### 4. 研究成果

本研究では、最終目標である「機械的な情報処理と人間の行動レベルの情報処理のズレを、新しい神経回路の機能を探るためのヒントとして、理論神経科学的な観点から調べ直すことにより神経回路における制約条件を提案すること」を目指して、(1) 周期的感覚刺激に対するタッピング運動の行動・脳波計測実験及びマクロスコピックなモデル化 (2) マクロスコピックなモデル化を実現するためのミクロスコピックなモデル化を行った。

#### (1) 周期的感覚刺激に対するタッピング運動の行動・脳波計測実験とマクロスコピックなモデル化

バウンシングボール刺激のように次の刺激タイミングまでの時間情報を連続的に与えられる状況下と、フラッシュ刺激のように次の刺激がいきなり与えられる状況下では、前者の方が刺激に合わせてタッピングする際のタイミングの精度が高くなることが知られている。申請者らは以前、この現象は前者の方が次の刺激タイミングの予測がしやすいことが影響しているという仮説を報告した。この仮説を検証するために、2種類の不確定性の大きさを定量的に変えた実験として、周期的なフラッシュ刺激の刺激間隔に時間的な揺らぎを持たせた実験（揺らぎ幅実験、揺らぎの大きさが不確定性）と、周期的なフラッシュ刺激の出現に確率的欠損を用いることで、刺激提示そのものの出現に不確定性をもたせた実験（抜く確率実験、欠損させる確率が不確定性）を行った。結果として、揺らぎ幅実験では揺らぎが大きくなるにつれてタッピングタイミングの先行は小さくなり、精度が悪くなった。一方で、抜く確率実験では、不確定性が大きくなるにつれ刺激より先行する予測的タッピングから刺激より後続する反応的タッピングへの2峰性の移行がみられ、さらにその移行の様式は被験者に依存することがわかった。

また、この課題を実行している際の刺激タイミングの予測における人間の内部状態について調査するために、Mates (1994) (文献) によって導入されたマクロスコピックな確率モデルを導入し、前回の刺激とタッピングの同調誤差をどの程度考慮するかを表す位相補正の値と、前回の刺激提示間隔をどの程度考慮するかを表す間隔補正の値が、刺激の不確定性の大きさに対してどのような関係があるのかについて調べた。揺らぎ幅実験では不確定性の増大と共に位相補正が大きくなり、間隔補正はある程度不確定性を超えると小さくなることがわかった。一方で、抜く確率実験では、不確定性が存在すると位相補正はほぼ0となり、間隔補正が大きくなることわかった。

これらの不確定性が、脳のどの部位でどの時間帯で関連した脳活動として見られるのかについて調べるために、揺らぎ幅実験の刺激間隔の揺らぎの大きさや抜く確率実験の刺激を抜く確率（入力確率性）、その実験を行った際のタッピングの揺らぎ（出力確率性）、Matesの数理モデルで推定した内部予測における位相補正と間隔補正（内部状態の確率性）それぞれに対し、7チャンネル（国際10-20法におけるFz, Cz, Pz, O1, O2, T3, T4）から記録した事象関連電位の成分との相関関係を比較し、それぞれの過程と相関する事象関連電位の成分とチャンネルを調査した。それぞれの確率性に相関する脳活動が、事象関連電位の異なる部位、潜時でみられた。

コロナ禍の影響により、実験が延期され、最終年度に追実験結果が取得されたため、さらに追実験により得られた結果を用いて、定量的にどのような分布が得られるのかについては、現在解析中である。

揺らぎ幅実験では、正しいタッピング間隔自体も揺らいでしまうこと、また抜く確率実験では、感覚刺激が単純であったため、行動戦略の多様性を被験者に与えてしまうことや、その多様性を分離することができないことが本質的な問題として残された。今後は、beatmaniaに代表される音楽ゲームを模した刺激提示場所に不規則性を導入する課題を用いて、予測の難しさがタッピング精度に与える影響を詳しく調べていくことが望まれる。これは2022年度以降、22K12186基

盤研究(C)「不規則感覚同調運動における動的確率情報処理の脳内実装様式の解明」にて引き続き進めていく。

## (2) マクロスコピックなモデル化を実現するためのミクロスコピックなモデル化

最後に、マクロスコピックな確率モデルを、ミクロスコピックな神経回路レベルの確率モデルとして確率的情報処理の形で表現するために、実際にどのような数理モデルや神経回路ネットワークを基本として構築していくのかについて検討した。

従来の確率型情報処理の数理モデルでは、素子状態は一般に確率値をとるが、結合パラメータに関しては、学習アルゴリズムによる大域的な最適化によって緻密に計算された値を保持することが本質になっているため、低エネルギー型の確率型情報処理様式を神経回路レベルで実装するには、大きな飛躍があった。これに対し、神経細胞素子の状態だけでなく、結合パラメータも確率サンブラとして表現する数理モデルを構築することで、ミクロスコピックな神経回路で確率型情報処理を実装する方向性を検討した(シナプスニューロン二重サンプリングモデル, 文献)。

$$P(x_{dj} = 1 | \dots) = \sigma(v_{dj} + b_{dj}), \quad P(s_{ijm} = 1 | \dots) = \sigma(a_{ijm} q_{ij}), \quad v_{dk} = \sum_{k,m} s_{jkm} a_{jkm} x_{dk}$$

$$b_{dj}(t+1) = (1 - r_b) b_{dj}(t) + r_b \sum_{k,m} s_{jkm} a_{jkm} (x_{dk} - \sigma(v_{dk})),$$

$$q_{ij}(t+1) = (1 - r_q) q_{ij}(t) + r_q \sum_d x_{di} (x_{dj} - \sigma(v_{dj})).$$

ここで、 $P(x_{dj} = 1 | \dots)$ と $P(s_{ijm} = 1 | \dots)$ はそれぞれ神経細胞素子が発火する確率と神経細胞素子の結合(シナプスの要素)が繋がっている確率を表す。この数理モデルは状態と結合が全て確率的になっているが、離散的な時間で更新するために、今回のタッピングタイミングのような連続時間を表現する数理モデルに拡張することが、今後の課題として残された。

確率型情報処理の実装様式の解明を目指す局所神経回路では、ネットワーク配線のみならず、当然その構成神経細胞の機能的な特性とその配置を明らかにすることが必要となる。これまで、神経細胞は、電気生理学的、形態学的、分子生物学的な観点から「分類」され、近年この「分類」に基づくネットワーク配線が報告されてきたが、実際に神経回路内で構成素子として振る舞う状態、すなわち確率的発火状態が異なる神経細胞ごとのネットワーク特性を調べることが重要になる。そこで、運動野をはじめとしたタッピングに関連する領域に対し、神経細胞の確率的特性を考慮して局所神経回路のネットワーク構造の解析を行う方法を構築した。具体的には、行動中の動物から同時記録された複数の神経細胞の発火活動データから、Kobayashiら(2019)(文献)の関連解析に基づく方法で神経細胞間のネットワーク構造を明らかにし、そのネットワークの中に含まれる神経細胞素子を発火率と不規則性でラベリングし、それぞれの特徴を持つ神経細胞素子がネットワークの中にどのように配置されているかを調べる方法である。今後は、実際にこの手法を様々な状況下での動物の神経細胞集団の発火活動データに適用し、状況に応じた神経回路ネットワークの構造を解析することが望まれる。

本研究課題から、低エネルギーで作動している脳の神経回路で行われている情報処理様式を模倣するための条件と、今後調べて行く必要がある条件が明らかになった。これは、2022年度以降、22K12186 基盤研究(C)「不規則感覚同調運動における動的確率情報処理の脳内実装様式の解明」に引き継いでいくことも含めて、持続可能な社会に必要な低エネルギー型情報処理様式の開発の貢献につながる成果である。

### < 引用文献 >

Jiri Mates, A model of synchronization of motor acts to a stimulus sequence, *Biological Cybernetics*, 70, 1994, 463--473

Jun-nosuke Teramae, Dual stochasticity in the cortex as a biologically plausible learning with the most efficient coding, *bioRxiv*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1101/811646>232--244

Ryota Kobayashi, Shuhei Kurita, Anno Kurth, Katsunori Kitano, Kenji Mizuseki, Markus Diesmann, Barry Richmond, Shigeru Shinomoto, Reconstructing neuronal circuitry from parallel spike trains, *Nature Communications*, 10, 2019, 4468

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 田村颯樹・坪 泰宏
2. 発表標題 スパイクグリザバーネットワークにおけるスパイク遅延の効果
3. 学会等名 電子情報通信学会複雑コミュニケーションサイエンス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jun Misawa, Yasuhiro Tsubo
2. 発表標題 Effect of irregular stimulus presentation on periodic tapping
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 Yumi Fukuzawa, Hideaki Kondo, Yasuhiro Tsubo
2. 発表標題 Effects of Monaural and Binaural Beat Stimulation on EEG Power and Stroop Task Performance
3. 学会等名 2020 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2020, IEICE) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森川翔太郎, 坪泰宏
2. 発表標題 方位選択性マップの構造と機能の動物種差
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 任柏儒, 坪泰宏
2. 発表標題 逆ストループ効果における中間色が脳波に及ぼす影響
3. 学会等名 2019年度第5回電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀧下冬馬, 坪泰宏
2. 発表標題 脳波計測における個人差と課題差が脳波に与える影響
3. 学会等名 2019年度第2回電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高道悠斗, 坪泰宏
2. 発表標題 アンカリング効果における繰り返し提示の影響
3. 学会等名 2019年度第2回電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三澤準, 坪泰宏
2. 発表標題 提示間隔の不確実性が同期タッピングと事象関連電位に与える影響
3. 学会等名 2019年度第2回電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 定量化方法、演算装置、及び、コンピュータプログラム	発明者 坪泰宏，任柏儒，篠田博之	権利者 学校法人 立命館
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-191739	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

神経情報システム研究室Webページ <a href="http://www.nips.ci.ritsumei.ac.jp">http://www.nips.ci.ritsumei.ac.jp</a>
--

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
---------	---------