

令和 7 年 5 月 29 日現在

機関番号：63905

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2022～2024

課題番号：22K07325

研究課題名（和文）小型霊長類を対象とした他者の内的状態に応じた行動調整の神経機構の解明

研究課題名（英文）Neural mechanisms underlying behavioral adjustment based on others' internal states in nonhuman primates.

研究代表者

兼子 峰明（Kaneko, Takaaki）

生理学研究所・システム脳科学研究領域・特任助教

研究者番号：50744372

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：私たちは、他者の行為を観察する際、その背後にある意図や感情などの心の状態を推定することができるが、これを実現する神経機構は未解明である。本研究は、小型霊長類マーモセットを用いて、新規行動解析システムを構築して、これにより、他者の内的状態推定と行動調整の神経基盤を明らかにすることを目的とした。深層学習技術を用いた3次元姿勢推定システムを構築し、社会的相互作用下の行動の大規模行動解析を実現した。さらに、内側前頭前野（MPFC）の機能を薬理的に抑制することで、他者の状態に応じた柔軟な行動調整が減弱することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

私たちは、他者の行為を観察する際、その背後にある意図や感情などの心の状態を推定する。このような能力は、他者との円滑な社会的相互作用に不可欠であり、発達障害や精神疾患ではこの機能の障害が対人関係に困難をもたらすことが指摘されている。このため、その神経基盤について精力的に研究が行われており、ヒト脳機能イメージングなどにより関連の深い脳領域や神経ネットワークが同定されている。一方で、細胞レベルでの詳細なメカニズムは不明であった。本研究により、モデル動物を用いた検証が可能となり、様々な侵襲的研究手法を導入することができる。これにより、他者理解の神経機構とその破綻についてさらなる研究の進展が期待される。

研究成果の概要（英文）：The neural mechanisms underlying the cognitive capacity to infer the internal states of others, such as intentions and emotions, remain poorly understood. The present study aimed to elucidate the neural basis of such inference and the associated behavioral adjustments by establishing a novel analytic methodology to quantify the behavior of freely moving marmosets. Using multiple deep neural networks trained on large-scale datasets, we developed an evaluation system capable of reconstructing and estimating the 3D poses of marmosets, a small non-human primate well-suited for analyzing complex natural behaviors in laboratory settings. We also established a behavioral paradigm to investigate marmosets' flexible behavioral adjustments based on others' internal states. Furthermore, pharmacological inactivation experiments demonstrated a causal role of the medial prefrontal cortex in supporting such behavioral flexibility.

研究分野：システム神経科学

キーワード：社会的認知 心の理論 深層学習 マーモセット データ駆動解析 姿勢推定 内側前頭前野

1. 研究開始当初の背景

私たちは、他者の行為を観察する際、その背後にある意図や感情などの心の状態を推定する。他者の心の状態は外部から直接観察できないが、相手の内的状態を推定し、それに基づいて自らの行動を調整している。このような能力は、他者との円滑な社会的相互作用に不可欠であり、発達障害や精神疾患ではこの機能の障害が対人関係に困難をもたらすことが指摘されている。このため、その神経基盤について精力的に研究が行われており、関連の深い脳領域や神経ネットワークがヒト脳機能イメージング等によって同定されている。

しかし、これまでの研究では、ヒトを対象とした非侵襲的アプローチが一般的であり、それらの神経回路がどのように他者の内的状態理解を実現するのか、その詳細は不明であった。すなわち、当該回路の詳しい入出力関係や神経細胞レベルの情報表現、機能障害に伴う行動への因果的影響が未解明のままである。これについては、非ヒト霊長類を対象とした行動課題や研究手法が限定的であることが大きな障壁となっている。また、これまでの研究では、実験的統制のため、人工的な場面における検証が主たる実験手法であった。一方で、近年の研究から、実験的に制限された文脈では、社会的シグナル (Jovanovic et al. 2022, Lanzarini et al. 2025) 等の脳内表現が大きく変化することが知られている。このため、脳機能イメージングなどで同定された各脳部位が、自然でダイナミックな社会的相互作用においてどのように機能しているのかを検証することが望まれている。

2. 研究の目的

そこで本研究では、小型霊長類であるマーモセットをモデル動物として、深層学習による人工知能 (AI) を用いた行動解析法を開発し、これにより、特定の脳部位が自然な社会的相互作用において果たす機能を明らかにすることを目的とする。第一に、自由行動下のマーモセットから頑健に観察可能な社会交渉行動を見出し、他者の動作や内的状態に対する自己の行動調整を定量可能とする行動課題と解析システムの構築を目指す。第二に、薬理的介入により、脳部位特異的な機能的障害を行うことで、社会的相互作用における機能的役割を明らかにすることを目標とする。

3. 研究の方法

自由行動下の複数マーモセットの行動を、人工知能を用いて定量的に解析する手法を確立した。8台の同期記録が可能なカメラを用いて、2頭のマーモセットが同居する場面を撮影した。人工知能による特徴点検出技術 (姿勢推定) を用いて、各個体の位置や四肢の運動を解析することで、自然な社会的相互作用の定量化を行った。

この技術を用いた行動解析系の構築を行った。2頭のマーモセットのうち一個体の内的状態を実験的に操作し、もう一頭において他者の状態に応じた行動変容を定量化することを試みた。このため、食物競合場面における2頭のマーモセットの相互作用を記録した。2個体のうち1個体 (被験個体) にのみ嗜好性の高い餌を与えることで、もう一方の個体 (刺激個体) が餌の共有を求めたり、奪取を試みたりする状況が生じると考えられる。このような食物競合場面では、相手の行動や状態に注意が必要な文脈となる。このときの刺激個体の餌に対する要求を、事前に空腹もしくは満腹状態にしておくことで変化させた。すると被験個体の行動が、相手の内的状態に応じて変化することが期待される。このような行動課題において2頭の動作を定量的に解析す

ることで、他者の内的状態に応じた行動調整の神経メカニズムに実験的に迫ることが可能となる。

続いて、他者の内的状態に応じた行動調整に関連が深いとされる脳部位を薬理的に機能抑制することで、自然な社会的相互作用における影響を検証した。ヒト fMRI の研究から大脳皮質の内側前頭前野 (MPFC) が他者の内的状態に応じた行動調整に最も関連が深いと推測される。本研究では、GABA 作動性ニューロンの作動薬であるムシモールを MPFC に注入し、同部位の機能抑制を行い、これによる行動変容を解析した。

4. 研究成果

集団で生活する霊長類動物を、個体識別しながら各個体の 3 次元姿勢推定を実現するシステムを構築した。このシステムでは、複数台のビデオカメラによる記録映像から姿勢推定を行う。集団飼育において 97%での個体認識精度を達成した。このシステムでは、目や鼻、肘の位置など霊長類動物の行動解析に有用な 18 点の特徴点を 3 次元的に推定することが可能である。最も精度の良い特徴点では平均 5 mm の誤差、最も誤差の大きい点でも 15 mm の精度に到達した。このような高精度を実現するために、解析パイプラインには複数の深層学習を用いた画像解析モジュールを導入している。このネットワークの学習のため、56,000 体の姿勢教師データを作成した。これらの学習済みモデルや訓練用データセットは、マーモセットの行動解析を実施する多様な研究において有用な研究基盤となると期待される。

これらの技術を用いて新規行動課題を開発し、他者の状態に応じた行動調整を定量的に評価することのできるダウンストリーム解析技術を開発した。ここでは、姿勢推定ニューラルネットワークの出力に対して、状態推定を行うニューラルネットワークを追加した。これにより、姿勢データのみから動物の内的状態を予測することを試みた。この解析ではリカレントニューラルネットワークの一種である Long Short Term Memory (LSTM) ネットワークを用いて、マーモセットの内的状態を姿勢データから予測した。刺激個体の状態(空腹・満腹)を教師ラベルとして、これを予測するよう LSTM を訓練した。LSTM は約 800ms の姿勢系列を入力として受け取り、その時点での「空腹度確率」をスカラー値として出力するため、可視化が難しい心的変数をフレーム単位で定量化できる。得られた時系列スコアを被験個体の行動指標と比較することで、行動調整がどのタイミングで内的状態の推定値と連動するのかを客観的に検証できた。これにより、マーモセットが他者のその時々運動に応じた単純な反応を示すのではなく、一定の交渉履歴から予測しうる他者の内的状態に応じて柔軟に自己の行動を調整していることが示された。

さらに、MPFC にムシモールを注入した個体では、他者の状態に応じた柔軟な行動調整が減弱することが見出された。実験個体の行動を高精度で予測することのできるニューラルネットワークを構築し、その挙動を詳しく解析したところ、ムシモール注入時には、社会的相互作用の履歴に対する参照が減少していることが見出された。一方で、同ニューラルネットワークには、瞬間毎の他者の行動は内部的に正しく表象されていることが確認された。これらの結果は、MPFC が自然な社会交渉場面において短期的に交渉履歴を保持することで、社会的相互作用における文脈の解析を可能にし、これにより他者の状態に応じた行動調整を実現している可能性を示唆する。

本研究によって構築された技術と新たに見出された知見により、他者の行為の背後にある意図や感情といった心の状態を理解する神経機構の解明に向けて、非ヒトモデル動物を用いた実験的検証が今後ますます進展することが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 岩田 康希、兼子 峰明、中江.健	4. 巻 40
2. 論文標題 コモンマーモセットのAIによる行動解析	5. 発行年 2025年
3. 雑誌名 人工知能	6. 最初と最後の頁 200 ~ 206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11517/jjsai.40.2_200	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 Kaneko Takaaki, Matsumoto Jumpei, Lu Wanyi, Zhao Xincheng, Ueno-Nigh Louie Richard, Oishi Takao, Kimura Kei, Otsuka Yukiko, Zheng Andi, Ikenaka Kensuke, Baba Kousuke, Mochizuki Hideki, Nishijo Hisao, Inoue Ken-ichi, Takada Masahiko	4. 巻 34
2. 論文標題 Deciphering social traits and pathophysiological conditions from natural behaviors in common marmosets	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Current Biology	6. 最初と最後の頁 2854 ~ 2867.e5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cub.2024.05.033	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Zhao Xincheng, Takaaki Kaneko, Jumpei Matsumoto, Lu Wanyi, Louie Ueno, Takao Oishi, Kensuke Ikenaka, Kousuke Baba, Hisao Nishijo, Hideki Mochizuki, Ken-ichi Inoue, Masahiko Takada
2. 発表標題 An AI system for quantification of common marmoset natural behaviors using markerless 3D pose estimation
3. 学会等名 Neuroscience 2023, Society for Neuroscience (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Lu Wanyi, Takaaki Kaneko, Jumpei Matsumoto, Zhao Xincheng, Louie Ueno, Takao Oishi, Ken-ichi Inoue, Masahiko Takada
2. 発表標題 Behavioral adjustment in response to others' internal state in common marmosets: AI based quantification using neural networks that predict the internal state solely from actions.
3. 学会等名 Neuroscience 2023, Society for Neuroscience (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------	---------