

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04180

研究課題名（和文）脳の転移可能な機能単位からみる個性とメタ学習能力

研究課題名（英文）Personality and meta-learning in terms of neural transferable factors

研究代表者

石井 信 (Ishii, Shin)

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：90294280

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：静止画観視課題を用いてトップダウン注意とボトムアップ注意に関わるfMRI神経基盤を明らかにすることに成功、論文化した(Fujimoto, et al., 2023)。これを発展させた、被験者のブライア因子に関する神経基盤を探る研究については、ベイズ型の画像認識モデルを構築し、個人ごとの行動の再現に成功した。階層的な意思決定課題に対する階層ベイズ型のモデルを構築、階層的な不確実性の解消に関わる神経基盤を明らかにした。

敵対事例学習に中枢パターン生成器強化学習を組み合わせた新しい学習法を開発、4脚のロボットシミュレータによる歩容生成課題に適用、多様な状況での適切な歩容が実現可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

覚醒脳におけるトップダウン注意の関与を実験的に調べた研究は少なく、本研究の成果は学術的意義がある。以下のように新聞報道（オンライン版）された。

<https://www.nikkei.com/article/DGXZQ0UC132QFOT11C22A000000/>

また、敵対事例学習に中枢パターン生成器強化学習を組み合わせた新しい学習法は、ロボットのみならず、自動車などの人工物の制御にも利用可能と期待される。この成果は制御系で最大級の国際会議IFAC 2023の招待セッションにて発表される。

研究成果の概要（英文）：We clarified fMRI-based neural bases involved in bottom-up and top-down attention during a still image observation task; this result has been published in (Fujimoto, et al., 2023). Extending this approach to examine prior factors of image observers, we successfully constructed a Bayesian image recognition model that could reproduce observers' behaviors well. With a hierarchical decision-making task, we developed a hierarchical Bayesian inference model and also examined neural bases in hierarchical uncertainty resolution within decision making. Moreover, we developed a new autonomous learning method that combines adversarial learning and reinforcement learning for central pattern generator, and applied it to autonomous locomotion acquisition tasks by a quadruped robot similar. We found the simulator could produce stable locomotion on a variety of terrain by this method.

研究分野：計算神経科学

キーワード：脳型人工知能 ブレイン・マシン・インターフェース 模倣学習 強化学習 ベイズ推定 意思決定

1. 研究開始当初の背景

脳研究と人工知能(AI)研究をどのように融合するのかという議論が盛んである。例えば、AI技術開発において有名な Google DeepMind 社の主要な研究テーマであり、わが国でも、東京大学ニューロインテリジェンス国際研究機構の研究目的の一つである。本研究は、研究開始当時のこうした背景に基づきつつ、研究代表者が近年その重要性を謳ってきた「脳の転移性」に関するものである。メディアなどで AI が人類を超える日が近いのではなどという議論がなされているものの、そもそもわれわれ(ヒト)を特徴づける「個性」や「情動」、あるいは「意識」の基盤は未解明であり、それらの存在意義すら十分な理解は進んでいない。本研究は、脳の転移学習にフォーカスすることで、その脳内基盤を探り、ヒトが未だに AI に対して大きく優位性がある動的環境に対する適応能を定量的に明らかにすることを旨とする。特に、こうした基盤を AI として実装可能であるかに注目しつつ研究を進めるものである。

2. 研究の目的

ヒトを含む動物は、過去の環境において獲得してきた特定の機能を新しい環境に合うように調整することで、新しい環境に素早く適応する能力がある(適応性)。その後で、昔の環境に戻ったとしても、第一の適応時よりもさらに素早く適応することができる(再適応性)。これらのことから、脳の中には再利用可能なモデルがあり、その一部を現在の環境に合うように修正(学習)し、再適応時には修正していない過去のモデルを再び呼び戻して利用しているのではないかと考えられている。すなわち、個体においても、脳機能単位の環境に応じた転移により環境変化への柔軟な対応が可能となる。こうしたモデルは、またそれを用いることで効率の良い学習にもつながると期待される。

こうした背景に基づき、本研究では、脳の転移可能なモデルの基盤を計算神経科学の手法で探り、脳の転移能を定量化する手法を開発することを目的とする。計算認知神経科学の手法を用いて、ヒト脳における神経基盤を明らかにする。さらに、高い転移能を実現する AI アルゴリズムを実現することも目的とする。新しい AI アルゴリズムは、人工物の学習に用いることで評価を進める。

3. 研究の方法

以下の3点について研究を進める。

(1) 被験者転移型デコーディングからみる個性の神経基盤

これまでにデータ集積を行った多様な状況を含む脳波データベース(50人+20人)における注意タスクでの被験者転移型デコーダを構築、その際の転移行列に基づく個人認証の基本アルゴリズムを完成させる。また、個性を脳活動から定量化するための手法の開発を進め、静止画あるいは動画の観視時の脳活動データに適用する。そこで得られた定量化指標と、個人指標(年齢や社会性)あるいは疾患リスクの相関関係を調べる。

(2) マルチタスク環境への適応からみる脳の転移学習の神経基盤

環境ダイナミクスが変化する際の意思決定過程(部分観測マルコフ決定過程:POMDP)を題材に、脳の転移学習とそれに関わる神経基盤を探る。実験課題の設計とそれを用いた行動実験を実施し、計算機シミュレーションによる学習モデルを構築する。また、機能的核磁気共鳴図(fMRI)法を用いた神経科学実験も行うことで、転移学習に関わる神経基盤を探る。さらに、異なる戦略をとる複数の相手エージェントが存在する状況を設定することで、「エージェント性」の神経基盤を探る。

(3) 転移学習の人工知能への応用

ヒトの学習が深層学習ベースの人工知能に勝る点の一つは、少量の学習データからでも適応を可能とする点である。人工知能は、完全情報ゲームにおいてヒトの意思決定を真似たうえで追加の強化学習によりそのパフォーマンスを上回ることができる。一方で、簡単な POMDP 環境であってもヒトのパフォーマンスには至らないことは、ヒトの学習には、各環境に適応しつつ環境変化時には転移可能な機能単位があることを示唆している。ここでは、時変な POMDP 環境で効率の良い見まね学習を可能とする人工知能技術の開発を進める。また、データを自ら生成することで効率の高い強化学習あるいは見まね学習を可能とする新しい学習手法の開発も進める。

4. 研究成果

研究手法に掲げた3点について、それぞれ成果を示す。

(1) 被験者転移型デコーディングからみる個性の神経基盤

被験者間転移行列に基づく個人認証アルゴリズムを開発し、転移行列には、被験者の状態に依存した雑音成分以外にも個人認証に関わる成分があることを示し、学術論文として発表した(Nishimoto, et al., 2020)。次に、機能的ネットワークに基づく脳活動エンコーディングモデルを構

築、公開された脳波(EEG)データに適用することで、トライアル間および被験者間で共通する神経基盤について定量的評価を行った(Liang, et al., 2020)。また、深層型の転移学習法を用いて作成した静止画刺激セットを用いた画像観視課題を作成した。眼球運動との関連を調べると共にfMRI 神経基盤を探索した研究は論文として発表された(Fujimoto, et al., 2022)。この成果については、京都大学からプレスリリースされ、日本経済新聞オンライン版で報道された。新型コロナウイルス感染症の影響により、fMRI ベース静止画観視課題の実施およびデータ解析に一部遅延があったが、必要な実験を終え、現在、データ解析結果のまとめ(論文執筆)に進んでいる。事前知識と観測における不確実性に関する神経基盤が明らかになると共に、被験者間の違い(個性)が行動から定量化可能であることが示されつつある。また、脳活動に基づく定量化指標と、個人指標(年齢や社会性)あるいは疾患リスクの相関関係を調べる研究については、現在課題の設定を終え、行動実験を進めているところである。

(2) マルチタスク環境への適応からみる脳の転移学習の神経基盤

強化学習と逆強化学習、それらを統合することで遂行可能なタスク(転移学習タスク)を設定し、ヒト被験者を用いた行動実験を進めた。

環境ダイナミクスが変化する際の意思決定過程(部分観測マルコフ決定過程:POMDP)を題材に、脳の転移学習とそれに関わる神経基盤を探索した。新型コロナウイルス感染症の影響により、実験実施およびデータ解析に一部遅延が生じたが、現在までに研究がまとめられ論文執筆を行っているところである。結果として、POMDP 課題を実施中の被験者は主に階層的な意思決定を行っていることが分かり、そこでの不確実性の解消には背外側前頭前野や島皮質の関与が示唆された。

さらに、自分の行動あるいは相手エージェントの教示により不確実性が解消するようなエージェントベースの推論課題を設定し、行動実験およびfMRI イメージング実験を行った。相手エージェントによって異なる推論過程を経ることが分かり、エージェント性に関わる神経基盤が明らかになりつつある。

(3) 転移学習の人工知能への応用

報酬と罰が共存する迷路探索課題において、従来の強化学習法よりも効率の良い学習を達成する学習法を開発し、学術論文として発表した(Fujita, et al., 2020)。

時変な環境においても相手エージェントの行動を見まねすることのできる、新しい逆強化学習法を開発、ロボットアームによる非線形最適軌道の見まねを課題として評価し、従来の手法を上回る見まね性能を達成した(Mitsuhashi and Ishii, submitted)。

現在のモデルにおいて不都合なデータを生成し、それに基づき正則化学習する手法(敵対事例学習)を強化学習に適用した敵対事例強化学習法について研究を進めた。正則化学習において深層学習の一種であるオートエンコーダを用いた手法は論文化された(Ohashi, et al., 2021)。この論文では、手法の自動運転シミュレーションへの応用も示している。加えて、正則化学習に直交化学習を導入した手法については二報の論文を投稿している状況である(Ohashi, et al., in revision; Ohashi, et al., submitted)。後者については、従来の SoTA 手法を大幅に上回る頑健性が得られることが分かった。さらに、敵対事例強化学習法をロボットシミュレータによるマルチタスク転移課題に適用したところ、シミュレータにおいては、従来法である SAC 法などよりも学習効率が良く、また、われわれ自身の先行研究である(Ohashi, et al., 2021)よりも安定な制御が可能であることが分かった。この成果については、制御およびロボティクスに関する国際会議で発表することになっている(Goto, et al., IFAC, 2023)。

Fujimoto, K., Hayashi, K., Katayama, R., Lee, S., Liang, Z., Yoshida, W., Ishii, S. (2022). Deep learning-based image deconstruction method with maintained saliency. *Neural Networks*, 155:224-241.

Ohashi, K., Nakanishi, K., Sasaki, W., Yasui, Y., Ishii, S. (2021). Deep adversarial reinforcement learning with noise compensation by auto-encoder. *IEEE Access*, <https://doi.org/10.1109/access.2021.3121751>

Liang, Z., Li, F., Hu, W., Huang, G., Oba, S., Zhang, Z., & Ishii, S. (2020). A generalized encoding system of alpha oscillations through visual saliency analysis. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 28(12), 2731-2743

Fujita, Y., Yagishita, S., Kasai, H., Ishii, S. (2020). Computational characteristics of the striatal dopamine system described by reinforcement learning with fast generalization. *Frontiers in Computational Neuroscience*. <https://doi.org/10.1101/2019.12.12.873950>

Nishimoto, T., Higashi, H., Morioka, H., Ishii, S. (2020). An EEG-based personal identification method using unsupervised feature extraction and its robustness against intra-subject variability. *Journal of Neural Engineering*, 17(2), 026007.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Hwang Jaepyung, Ishii Shin, Kwon Taesoo, Oba Shigeyuki	4. 巻 8
2. 論文標題 Modularized Predictive Coding-Based Online Motion Synthesis Combining Environmental Constraints and Motion-Capture Data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 202274 ~ 202285
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2020.3036449	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 Liang Zhen, Li Fangchao, Hu Wanrou, Huang Gan, Oba Shigeyuki, Zhang Zhiguo, Ishii Shin	4. 巻 28
2. 論文標題 A Generalized Encoding System for Alpha Oscillations Through Visual Saliency Analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering	6. 最初と最後の頁 2731 ~ 2743
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TNSRE.2020.3038789	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
1. 著者名 Kubo Akihiro, Meshgi Kourosh, Ishii Shin	4. 巻 101
2. 論文標題 A Meta-Q-Learning Approach to Discriminative Correlation Filter based Visual Tracking	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Intelligent & Robotic Systems	6. 最初と最後の頁 11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10846-020-01273-2	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 Fujita Yoshihisa, Yagishita Sho, Kasai Haruo, Ishii Shin	4. 巻 14
2. 論文標題 Computational characteristics of the striatal dopamine system described by reinforcement learning with fast generalization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Computational Neuroscience	6. 最初と最後の頁 66
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1101/2019.12.12.873950	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 Nishimoto Takashi, Higashi Hiroshi, Morioka Hiroshi, Ishii Shin	4. 巻 17
2. 論文標題 EEG-based personal identification method using unsupervised feature extraction and its robustness against intra-subject variability	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Neural Engineering	6. 最初と最後の頁 026007 ~ 026007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-2552/ab6d89	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 Ohnishi Shota, Uchibe Eiji, Yamaguchi Yotaro, Nakanishi Kosuke, Yasui Yuji, Ishii Shin	4. 巻 13
2. 論文標題 Constrained Deep Q-Learning Gradually Approaching Ordinary Q-Learning	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Neurobotics	6. 最初と最後の頁 103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fnbot.2019.00103	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 Liang Zhen, Oba Shigeyuki, Ishii Shin	4. 巻 116
2. 論文標題 An unsupervised EEG decoding system for human emotion recognition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 257 ~ 268
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2019.04.003	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 Ohashi Kohei, Nakanishi Kosuke, Sasaki Wataru, Yasui Yuji, Ishii Shin	4. 巻 9
2. 論文標題 Deep Adversarial Reinforcement Learning With Noise Compensation by Autoencoder	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 143901 ~ 143912
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/access.2021.3121751	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 Fujimoto Keisuke, Hayashi Kojiro, Katayama Risa, Lee Sehyung, Liang Zhen, Yoshida Wako, Ishii Shin	4. 巻 155
2. 論文標題 Deep learning-based image deconstruction method with maintained saliency	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 224 ~ 241
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2022.08.015	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

〔学会発表〕 計0件

〔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			
中国	Shenzhen University			
韓国	Hanyang University			
英国	オックスフォード大学			