

令和元年6月24日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02873

研究課題名（和文）階層並列モデルによる運動学習とブレイン・マシン・インターフェースへの応用

研究課題名（英文）Decision making model based on hierarchical networks and its applications to brain machine interface

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） 12,200,000円

研究成果の概要（和文）：階層型逆強化学習を、動物行動およびヒト意思決定過程に適用した。線虫には記憶に依存した戦略と記憶に依存しない戦略があることを発見、ヒトのメタな学習戦略を変化させながら環境適応するモデル化が可能になった。ヒトの脳波および機能的核磁気共鳴図からのデコーディング研究を進めた。動画観視時のヒト脳波から動画に含まれる顕著度が 解読可能であることが分かった。視覚注意に関わる被験者間転移デコーディング法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

動物や人間の環境適応能力の同定は、自然科学のみならず、人間と共存する機械（人工知能）の開発（工学）において重要である。本研究では、動物の見まね学習を数理モデル化した「順逆強化学習」のアルゴリズムを導出し、それを、動物および人間の行動データに適用することに成功した。また、モデルを用いたデコーディング法を開発し、視覚注意課題に適用した。その成果は、脳と機械を直接つなぐブレイン・マシン・インターフェースの開発につながる。

研究成果の概要（英文）：By applying hierarchical inverse reinforcement learning techniques to worm and human behavioral data, we found worms (*C. elegans*) has two kinds of adaptation strategies, exploration and exploitation, enabling adaptation to dynamic environments, and human has hierarchical decision makers to make appropriate decisions in uncertain environments. By performing decoding studies based on human EEG and fMRI data, we found saliency features of movies can be decoded from human EEG, and moreover, DTI-based transformation is effective in subject-transfer decoding of visual attentions.

研究分野：人間情報学

キーワード：脳型人工知能 インテグレーション ブレイン・マシン・インターフェース 順逆強化学習 模倣学習 ソフトコンピューティング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

動物は、多自由度、可変な身体における運動系列を、経験に基づき学習実行し、かつ、類似した運動系列に対しても汎化することができる。可変な力学システムに対して、経験に基づき自律的に運動単位を設定し、かつ、運動単位の系列を実行しえる機械学習モデルとして、階層型強化学習がある(Wiering & Schmidhuber, 1997; Sun & Sessions, 2000)。階層型強化学習は、ゲームや簡単な制御課題において成功を収めてきた(Morimoto & Doya, 2001; Miyamoto, et al., 2004)が、しばしば運動単位の設定が不安定となり、そのことで汎化性能が十分でないという問題点があった。一方で、近年成功を収めている「徒弟学習」によれば、「弟子」である学習エージェントは、「先生」となるエージェントの行動系列から、その行動系列を報酬最大化系列として生成しえる報酬関数を推定(逆強化学習、すなわち、行動系列から報酬関数の学習)し、その推定された報酬関数を用いて今度は自ら試行錯誤学習することで、先生エージェントを見まねながら行動系列を学習生成(順強化学習)することができる(Pieter & Ng, 2004; Gergely & Szepesvari, 2012)。徒弟学習は、逆強化学習器と順強化学習器の対により実現する。逆強化学習によれば、先生エージェントが複数の戦略を混在しながら環境適応している際に、その戦略(運動単位)の抽出を報酬関数の推定の枠組みで実現できる可能性がある。本研究では、このアイデアに基づき、順逆強化学習器を基本モジュールとして、それを複数個配置した階層学習モデル(階層型順逆強化学習モデル)を考え、それを用いた徒弟学習(あるいは模倣学習)の手法の導出を試みる。

2. 研究の目的

相手の行動系列から模倣学習を行うための階層型順逆強化学習の手法を開発する。複数の学習器から構成される階層型順逆強化学習器を統計モデルとして定式化し、比較的少ないデータ量からでも安定した模倣学習を可能とすることを旨とする。特に、相手が動的な環境で適応していることを前提とした手法の開発を進める。開発した学習法は、ヒトおよびモデル生物の行動学習データの解析に用いることで機械学習法としての評価を行う。また、階層モデルに基づきヒト脳活動からのブレイン・マシン・インターフェース(デコーディング)を行い、その性能を用いることで脳情報処理モデルとしての評価を行う。

3. 研究の方法

強化学習モデルの階層化と、動的戦略に対する逆強化学習法の導出により、階層型順逆強化学習モデルの開発を行う。特に、学習者が、動的な環境において、探索戦略と搾取戦略を切り替えながら適応している動的適応過程を想定した手法の開発を進める。一方で、当初の計画では、ヒト一般手指運動についてモデルベースのデコーディング解析を行うこととしていたが、MEGによる実験データの精査により、動作に伴うノイズ(アーチファクト)が大きすぎて脳内電流源からのデコーディングが難しいことが分かった。そこで、研究計画の変更を行うことで、別途進めていた視覚注意のデコーディングに展開した。その際に、fMRI と EEG の両方の計測モダリティでのデータを用いることとして、特に被験者間での違いをできる限り吸収した手法(被験者間転移デコーディング)に注目して開発を進めることとした。これら両者の研究による評価を合わせることで、階層型学習モデルと脳情報処理モデルの類似性を調べる。

4. 研究成果

(1) 階層型順逆強化学習モデルの開発

自由行動下での動物の探索行動データおよびヒト意思決定データへの、階層型逆強化学習法の適用を進めた。共同研究者から線虫の自由行動下での探索行動データの提供を受け、逆強化学習法を適用した結果、線虫の行動には記憶に依存した搾取戦略と記憶に依存しない探索戦略があり、感覚細胞を欠失した個体では前者が存在しないことを見出した(Yamaguchi, et al., 2018)。動的環境において意思決定課題を行っている際のヒト行動データに階層型逆強化学習法(Uchida, et al., 2017)を適用することで、メタな学習戦略を規定する逆温度を動的に変化させながら環境適応するヒト行動のモデル化を行った。このモデルを用いた順強化学習を行うことで、ヒトの動的な環境適応の模倣学習を可能とした。加えて、高次元環境に適応可能な深層強化学習向けの敵対的事例に基づく正則化法を開発した(Sasaki, et al., submitted)。

(2) ヒトイメージングからの視覚注意のデコーディング

視覚注意課題を対象に、ヒトの脳波(EEG)および機能的核磁気共鳴図(fMRI)からのデコーディング研究を進めた。ヒト動画観視時の EEG データの解析を進めた結果、動画に含まれる特徴量(顕著度)が EEG データに含まれる特徴量からデコード可能であることが分かった(Liang, et al., 2018)。また、視覚注意に関わる被験者間転移デコーディング法の開発を進めた。提案手法では、ヒト脳の構造的結合について非剛体変換を行うことで転移を可能とする。この手法は、従来の脳の構造に基づく被験者間転移デコーディング法よりも精度が高いことが分かった(Fuchigami, et al., 2018)。加えて、これまでに、辞書学習に基づき、視覚注意の被験者間転移デコーディングの手法の開発を進めてきた。今回の科研費の中では、この手法をさらに拡張し、辞書学習により同定される転移行列が、被験者の特定(個人認証)に使えるかどうかを定量的に調べた。同日の計測実験内で認証器を構築する場合、非常に高精度で個人認証が可能であることが分か

った(Nishimoto, et al., 2017; Nishimoto, et al., submitted)。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

Shikauchi, Y., & Ishii, S. (2016). Robust encoding of scene anticipation during human spatial navigation. *Scientific Reports*, 6, 37599. doi:10.1038/srep37599.

Meshgi, K., Maeda, S., Oba, S., & Ishii, S. (2017). Constructing a meta-tracker using dropout to imitate the behavior of an arbitrary black-box tracker. *Neural Networks*, 87, 132-148.

Takenouchi, T., & Ishii, S. (2017). Binary classifiers ensemble based on Bregman divergence for multi-class classification. *Neurocomputing*, 273(17), 424-434.

Yamaguchi, S., Naoki, H., Ikeda, M., Tsukada, Y., Nakano, S., Mori, I., & Ishii, S. (2018). Thermotactic behavioral strategy of *C. elegans* identified using inverse reinforcement learning. *PLoS Computational Biology*, 14(5), e1006122. doi.org/10.1371/journal.pcbi.1006122.

Liang, Z., Hamada, Y., Oba, S. & Ishii, S. (2018). Characterization of electroencephalography signals for estimating saliency features in videos. *Neural Networks*, 105, 52-64.

Fuchigami, T., Shikauchi, Y., Nakae, K., Shikauchi, M., Ogawa, T., & Ishii, S. (2018). Zero-shot fMRI decoding with three-dimensional registration based on diffusion tensor imaging. *Scientific Reports*, 8(1), e12342. doi:10.1038/s41598-018-30676-3.

Miyato, T., Maeda, S., Koyama, M., & Ishii, S. (2018). Virtual adversarial training: a regularization method for supervised and semi-supervised learning. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, doi: 10.1109/TPAMI.2018.2858821.

Ito, R., Nakae, K., Hata, J., Okano, H., & Ishii, S. (2019). Semi-supervised learning of brain tissue segmentation. *Neural Networks*, 116, 25-34.

〔学会発表〕(計 19 件)

Fuchigami, T., Shikauchi, Y., Nakae, K., Shikauchi, M., & Ishii, S. (2016). Brain decoding can be improved by diffusion imaging based registration. 4th AINI and 14th INCF Nodes Workshop, PS-19.

Meshgi, K., Oba, S., & Ishii, S. (2016). Robust discriminative tracking via query-by-bagging. *IEEE Advanced Video and Signal-based Surveillance 2016*, 8-14.

Meshgi, K., Oba, S., & Ishii, S. (2017). Active discriminative tracking using collective memory. *IAPR International Conference on Machine Vision Applications*.

Meshgi, K., Oba, S., & Ishii, S. (2017). Efficient version-space reduction for visual tracking. *14th Conference on Computer and Robot Vision*.

Meshgi, K., Mizaei, M. S., Oba, S., & Ishii, S. (2017). Efficient asymmetric co-tracking using uncertainty sampling. *International Conference on Signal and Image Analysis Applications*.

Nishimoto, T., Morioka, H., & Ishii, S. (2017). Individual identification by resting-state EEG using common dictionary learning. *Artificial Neural Networks and Machine Learning - ICANN 2017*, LNCS10613, 199-207.

Uchida, S., Oba, S., & Ishii, S. (2017). Estimation of the change of agents behavioral strategy using state-action history. *Artificial Neural Networks and Machine Learning - ICANN 2017*, LNCS10614, 100-107.

濱田 恭行, 石井 信. (2017). Saliency に基づく動画観視時の事象関連電位解析. 電子情報通信学会技術報告.

内田 滋穂里, 大羽 成征, 石井 信. (2017). 行動履歴データによる行動方策学習者の探索戦略変化の推定. 電子情報通信学会技術報告.

Ishii, S. (2017). Data-driven mimicking neural encoding/decoding systems. *CRCNS 2017*. (keynote).

Ishii, S. (2017). Decoding neural decision making. *Okinawa Computational Neuroscience Course 2017 (2017 年 6 月, 沖縄)*, (invited).

石井 信. (2017). データベースに基づくブレインマシンインタフェース. 電子情報通信学会音声研究会. (招待講演).

Meshgi, K., Oba, S., & Ishii, S. (2018). Efficient diverse ensemble for discriminative co-tracking. *Computer Vision and Pattern Recognition 2018 (CVPR)*, 4814-4823.

Liang, Z., Oba, S., & Ishii, S. (2018). Inherent feature connection (I-Con) Map for linking emotion detection: an EEG study. *32nd Human Computer Interaction Conference (BHCI 2018)*.

Fujita, Y., & Ishii, S. (2018). Reproducing the cognitive function with the robustness

against the brain structure and with the efficient learning algorithm. Computational Neuroscience 2018.

Sasaki, W., Yasui, Y., Nakanishi, K., & Ishii, S. (2018). Deep Q-network regularized by adversarial examples. The 28th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society.

Katayama, R., Yoshida, W., & Ishii, S. (2019). Decoding the scene prediction and its confidence during maze exploration. 第 19 回脳と心のメカニズム冬のワークショップ.

Ishii, S. (2019). Artificial intelligence methods for identification of large-scale brain structures. International Symposium of Brain/MINDS. (invited).

石井 信. (2019). 計測と情報科学の融合による新しいサイエンスの展望. SPRUC 第 1 回 BLs アップグレード検討ワークショップ, (2019 年 3 月, 佐用町). (招待講演).

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、研究者個人に帰属されます。