

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24300114

研究課題名(和文)ブレインデコーディングに基づくヒト意思決定過程の神経基盤の解明

研究課題名(英文)Uncovering neural correlates in human decision making based on brain decoding

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) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：環境状態が部分的に見えるようにした迷路課題を用いて、前頭 - 頭頂葉の機能的核磁気共鳴(fMRI)活動から「次に現れるシーンの推論」の脳内表現の解読に成功した。多人数にわたるfMRI活動データに対して深層学習を用いて、ヒトがいかなるタスクを行っているのか解読する解読器を開発し、その特徴量の可視化を進めた。また、ナビゲーションに応用可能な空間注意課題を用いて、脳波計測に基づくオンラインデコーディングシステムを構築した。安静時脳活動を用いて実験参加者間の脳内表現の違いを吸収することができた。

研究成果の概要(英文)：We performed a decoding study of next scenes to be predicted by human subjects from their frontal-parietal fMRI activities when the subjects were performing a navigation task in partially observable maze environments. We performed a decoding study of various kinds of cognitive tasks by a deep neural network trained by large-scale fMRI data, and visualized high-dimensional features embedded in the trained deep network. Moreover, we constructed an online decoding system of spatial attention based on EEG (electroencephalography), which is applicable to real-world navigation. Using resting-state activities, we could calibrate the difference in neural correlates between human subjects.

研究分野：計算神経科学、人工知能、機械学習、ニューロインフォマティクス

キーワード：意思決定 ブレインデコーディング ブレインマシンインターフェース 非侵襲脳活動計測 強化学習

## 1. 研究開始当初の背景

複雑な環境におけるヒトの高次意思決定過程については、これまでに、モデル同定型強化学習法のフレームワークにしたがい、価値関数(各状態の良さをスカラーとして評価した関数)およびその動的な操作(学習)に関する神経基盤が論じられてきた。これは、高次意思決定過程がモデル同定型強化学習法でも説明できることを示してきたが、モデルがどの程度の汎化性・信頼性があるのかを定量的に示すものではない。環境の複雑性への対処と方策の学習という二つの互いに関連する要素を同時に扱おうとした旧来の研究手法の限界を示している。また、これまでの機能的核磁気共鳴画像法(fMRI)による解像度では詳細な脳内情報処理を同定できず、相関解析とその統計的仮説検定に頼らざるを得なかった。申請者は、本研究の先行研究となる科研費研究において、環境の複雑性への対処の一つである「推論」にフォーカスし、その処理過程およびそのための階層的な脳内表現が前頭前野回路にあることを計算論的手法により明らかにしてきた。

こうした背景に基づき、複雑な環境での推論および学習の過程を、相関解析を超えて再現性のある(すなわち行動予測に用いることができる)システムとして同定する必要がある。そのため、本研究では、fMRIからのブレインデコードとそれを用いた行動予測の手法を用いる。デコードされた変数を用いたモデルの行動予測性能を用いることで、モデルの信頼度を定量的に評価できる。一方で意思決定過程を含んだ確率モデルを行動に基づき同定する。このアプローチのメリットは、これまで行われてきた、fMRI画像とモデルから求めた内部変数との単純な相関解析を超えて、行動予測性能という客観的指標に基づき、推論あるいは意思決定のモデル性能を評価できる点にある。

## 2. 研究の目的

推論の脳内表象  
環境の不確実性の解消(すなわち推論)については、主に前頭前野回路において行われていることを相関解析の手法で明らかにしてきたが、本研究ではその脳内表象をブレインデコーディングの手法で解読し、行動予測に用いる。具体的には、fMRI画像からの個人レベルのデコードを作成し、推論を伴う行動決定タスクを課した被験者のMRI内行動実験において、実際に推論に関わる表象を読み出す。

### 方策学習の神経基盤

マルチエージェント環境での意思決定過程については、モデルフリーあるいはモデル同定型の強化学習を仮定した研究が行われてきた。本研究では、特に方策の学習にフォーカスし、方策ベース学習と価値ベース学習を中心に、新しいアルゴリズムの開発を進める。

タスクとしてはマルチエージェントゲームなどの観察学習課題を用いる。観察学習課題は、相手の状態(または、価値などの内部状態)が不観測であるため推論を要し、また相手の方策を同定するため学習を要し、この二つの要素を持つ最小のテストベッドである。

### オンラインブレインデコーディングを用いたナビゲーションシステム

ヒト脳の内部状態をオンラインで解読するオンラインブレインデコーディングを用いたナビゲーションシステムを作成する。上記、「推論の脳内表象」により被験者の意思決定に関わる脳内表象がデコードできるので、それをオンライン処理することで、被験者の意図にしたがい空間移動で可能とするナビゲーションシステムを試作する。これはブレインデコードの工学応用のみならず、その検証のために用いることを想定している。これは、ブレイン・マシン・インターフェース(BMI)と共通する研究課題であり、BMIで用いられている技術も場合により援用する。当初fMRIに基づき開発を進めるが、場合により、実環境を想定して脳波計測(EEG)も用いる。

## 3. 研究の方法

### 推論の脳内表象

部分観測迷路課題(Yoshida, Ishii, 2006)を改変したヒト認知タスクを設定し、fMRI実験を行う。迷路上での次状態推論に対するデコードを作成し、上記認知タスク内でのデコード性能の検証を行う。また、部分観測迷路課題を遂行する確率モデルを構築し、パラメータを行動データから決定する。ここでの確率モデルとして、推論を行うベイズ最適モデルと行動決定を行う隠れマルコフモデル(行動選択に関して内部状態を持つ)との組み合わせを候補としている。この確率モデルを用いて、被験者の行動予測を行い、予測性能に基づきモデルの定量的評価を行う。第二年度以降は、被験者数を増やすことで、デコード性能の向上を図りつつ、確率モデルの洗練化を進める。

### 方策学習の神経基盤

特に方策の学習にフォーカスし、方策ベース学習と価値ベース学習を中心に、新しいアルゴリズムの開発を進める。マルチエージェントゲームを題材に、内部状態を有する方策に関する方策勾配法(方策ベース法)と、従来の価値ベース法の比較を行う。次に観察学習課題を用いて、相手の内部状態(報酬関数や価値関数)を推定しながら意思決定を行う方策学習アルゴリズムを開発する。同様のアイディアは徒弟学習(apprenticeship learning)などでも用いられているので、それら既存のアルゴリズムとの比較を行うことで評価する。また、この観察学習を行う計算機エージェントを、ヒト行動実験からのヒト内部状態の推定に用いる。ヒトの学習法は未知である

ので、いくつかの強化学習モデル（方策ベースの学習モデルおよび価値ベースの学習モデル）などを仮定して、学習プロファイルおよび学習後の行動予測性能により評価を進める。

オンラインブレインデコーディングを用いたナビゲーションシステム

「推論の脳内表象」の研究において、意思決定に関わる脳の内部状態（脳内情報表現）の理解が進んでいるので、それに基づき、被験者の意図にしたがい空間移動が可能となるナビゲーションシステムを作成する。このテストベッドはそのまま、空間移動に関わるブレイン・マシン・インターフェースとしても使えることを想定している。当初 fMRI を用いて研究を進める予定であるが、研究状況によっては、脳波計測 (EEG) の代用を検討する。EEG 装置は国際電気通信基礎技術研究所 (ATR) が所持しているもの (BIOSEMI, Active Two System, 64ch) を借用する予定である。申請者は、ATR において脳波 - 近赤外分光法による脳信号解析法の研究を別途行っているため、この時点までに EEG からの脳情報の抽出ができていれば、その手法を用いることができる。EEG 計測を行うことで、実環境において、脳情報も入れた形でのナビゲーションの研究に展開することが可能である。

#### 4. 研究成果

##### 推論の脳内表象

部分観測迷路課題を改変したヒト認知タスクを用いた機能的核磁気共鳴 (fMRI) 計測実験を実施し、迷路上での fMRI デコーダによる「次に現れるシーンの推論」に関し、脳の解剖学的領野ごとの性能評価を行った。予測期間（選択刺激が呈示される前の期間）における前頭 - 頭頂葉の fMRI 脳活動から、次シーン推論の解読が可能であることが分かり、これはナビゲーション中の推論の脳内表象であると考えられた (Shikauchi and Ishii, submitted)。成果の一部は国際会議 Cosyne 2015 で発表した (Shikauchi and Ishii, 2015)。推論の脳内表象の研究の発展として、新たに通信理論に基づく推論解読器の開発を行い、それを用いることで自由意思決定課題における解読性能を向上させた。また、多人数にわたる fMRI 活動データに対して深層学習を用いて、ヒトがいかなるタスクを行っているのかを読み出す解読器を開発し、深層学習器が獲得した高次元特徴量の可視化を進めた (Koyamada, et al., 2014)。さらに高次元特徴量と脳内ネットワークとの関連について議論を加え、論文投稿を行っている (Koyamada, et al, submitted)。

方策学習に関わる脳情報解読  
マルチエージェントゲームである繰り返し囚人のジレンマ問題に対し、内部状態を有す

る方策を方策勾配法により学習することで、最適解を安定して得られることが分かった。複雑な環境、特に非ホロノミック拘束を持つ最適制御問題に対しても動作する方策学習アルゴリズムを開発した。このアルゴリズムは、経路積分強化学習法を拡張したもので、状態依存でなく時間依存の価値関数を求めている。典型的な非ホロノミック制御問題である、ネコの空中姿勢制御問題に適用した結果、本手法が従来の方策勾配法よりも効率良い学習を実現することを示した (中野, 他, 2014)。ヒトの意思決定および方策学習の過程を、観察学習により同定することのできる、逆強化学習法を開発を進めた。対象がマルコフ決定過程であり、かつ確率の方策を用いているものとして、状態・行動系列に基づき未知の報酬関数を推定した結果、従来の徒弟学習 (apprenticeship learning) よりも優れた性能を示すことが分かった。これは、対象が学習する過程の情報を有効利用していることによると考えられた (Sakurai, et al., submitted)。現在、この観察学習エージェントを用いて、ヒトの学習過程の同定を継続実施している。また、多自由度力学系であるヒト多指運動をテストベッドとして、脳磁図 (MEG) からの再構成のための新しい解析手法を開発した。独立成分分析で脳活動特徴量を抽出し、隠れマルコフモデルと線形回帰モデルでモデリングすることで、従来法に比べ少数の特徴量で高い再構成性能が得られることが分かった。

オンラインブレインデコーディングを用いたナビゲーションシステム

ナビゲーションに応用可能な課題として、眼球運動を伴わない空間注意を用いた脳波 - 近赤外分光 (EEG-NIRS) 計測実験を実施し、そのデータに基づきブレインデコーディング法を開発を進めた。ベイズ統計を用いた両計測モダリティの統合により、80% 程度と高い解読性能を得るとともに、空間注意に関する脳内表象を得た (Morioka, et al., 2014)。また、EEG 計測に基づくオンラインブレインデコーディングシステムを構築した。特に、辞書学習の手法に基づき、安静時脳活動を用いて、実験参加者間の脳内表象の違い、また計測システムのずれなど実験条件の違いを吸収することで、利用者にとって利便性の高いデコーディングシステムとして完成させた (Morioka, et al., 2015)。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

Meshigi, K., & Ishii, S. The state-of-the-art in handling occlusions for visual object tracking. *IEICE Transactions on Information & Systems*, (to appear). (2015). 査読有。

Morioka, H., Kanemura, A., Hirayama, J., Shikauchi, M., Ogawa, T., Ikeda, S., Kawanabe, M., & Ishii, S. Learning a common dictionary for subject-transfer decoding with resting calibration. *NeuroImage*, **111**, 167-178. DOI: 10.1016/j.neuroimage (2015). 査読有.

Hayashi, Y., Ishii, S., & Urakubo, H. A computational model of afterimage rotation in the peripheral drift illusion based on retinal ON/OFF responses. *PLoS ONE*, **9**(12), e115464. DOI:10.1371/journal.pone.0115464 (2014). 査読有.

中野大智, 前田新一, 石井信. 状態非依存の方策を用いた新しい強化学習手法の提案. システム制御情報学会論文誌, **27**(8), 327-332. DOI:10.5687/iscie.27.327 (2014). 査読有.

Morioka, H., Kanemura, A., Morimoto, S., Yoshioka, T., Oba, S., Kawanabe, M., & Ishii, S. Decoding spatial attention by using cortical currents estimated from electroencephalography with near-infrared spectroscopy prior information. *NeuroImage*, **90**, 128-139. DOI: 10.1016/j.neuroimage (2014). 査読有.

Ueno, T., Maeda, S., & Ishii, S. Asymptotic analysis of value prediction by well-specified and misspecified models. *Neural Networks*, **31**, 88-92. DOI:10.1016/j.neunet.2012.03.004 (2012). 査読有.

Fukushima, M., Yamashita, O., Kanemura, A., Ishii, S., Kawato, M., Sato, M. A state-space modeling approach for localization of focal current sources from MEG. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **59**(6), 1561-1571. DOI: 10.1109/TBME.2012.2189713 (2012). 査読有.

Ihara, M., Maeda, S., Ikeda, K., Ishii, S. Low-dimensional feature representation for instrument identification. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, **5**(4), 249-258. DOI: http://doi.org/10.9746/jcmsi.5.249 (2012). 査読有.

Kouno, M., Nakae, K., Oba, S., & Ishii, S. Microscopic image restoration based on tensor factorization of rotated patches. *Artificial Life and Robotics*, **17**(3-4), 417-425. DOI: 10.1007/s10015-012-0077-6 (2012). 査読有.

〔学会発表〕(計 46 件)

Ogawa, T., Hirayama, J., Pankaj, G., Moriya, H., Yamaguchi, S., Ishikawa, A., Inoue, Y., Kawanabe, M., Ishii, S. Brain-machine interfaces for assistive smart homes: A feasibility study with wearable near-infrared spectroscopy. 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, to appear.

Koyamada, S., Nakae, K., Koyama, M., & Ishii, S. Principal sensitivity analysis. Pacific-Asia conference on knowledge discovery and data mining, 2015.5.19.-5.22, Ho Chi Minh(Vietnam) Ishii, S. Data-driven brain decoding techniques. 10th AEARU Workshop on Computer Science and Web Technology, 2015.2.25-2.27, 筑波大学国際会議室(茨城県つくば市), (招待講演)

Ishii, S. Data-driven brain computer interface in real environments. The 3rd International Winter Conference on Brain-Computer Interface, 2015.1.12-1.14, Gangwon Province (South Korea), (招待講演)

Koyamada, S., Shikauchi, Y., Nakae, K., & Ishii, S. Construction of subject-independent brain decoders for human fMRI with deep learning. International Conference on Data Mining, Internet Computing, and Big Data, 2014.11.17-11.19, Kuala Lumpur(Malaysia)

石井信. 全脳シミュレーションに向けて:大規模計算技術と大規模構造 マップ. 第7回スーパーコンピュータ「京」と創薬・医療の産学連携セミナー, 2014.10.17, 梅田センタービル(大阪府大阪市), (招待講演)

Ishii, S. A system identification-based approach to neural system. Nagoya International Symposium on Neural Circuit, 2014.3.24, 名古屋大学(愛知県名古屋市), (招待講演)

Kanemura, A., Morales, Y., Kawanabe, M., Morioka, H., Kallakuri, N., Ikeda, T., Miyashita, T., Hagita, N., & Ishii, S. A waypoint-based framework in brain-controlled smart home environments: brain interfaces, domotics, and robotics integration. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2013.11.4, 東京国際展示場(東京都江東区)

石井信. ベイズ法に基づく顕微鏡画像超解像. 第22回日本パイオイメージング学会学術集会, 2013.9.15, 東京大学(東京

都文京区), (招待講演)  
Okadome, Y., Nakamura, Y., Shikauchi, Y., Ishii, S., & Ishiguro, H. Fast approximation method for Gaussian process regression using hash function for non-uniformly distributed data. 23rd International Conference on Artificial Neural Networks, 2013.9.10, Sofia (Bulgaria)

Ishii, S. System identification of cellular information processing. IEEEEMBC Workshop on Systems Biology of Cellular Signaling, 2013.7.3, Osaka International Convention Center(大阪府大阪市), (招待講演)

Ishii, S. Brain machine interface and decoding in mobile environments. Modeling Neural Activity: Statistics, Dynamical Systems, and Networks, 2013.6.28, Island of KAUAI (The United States of America), (招待講演)  
石井信. ネットワーク型ブレイン・マシン・インターフェースと一般生活環境への応用可能性. 第28回低消費電力・高速LSI技術懇談会, 2013.3.11, 東京大学(東京都目黒区), (招待講演)

Ishii, S. Network-based BMI: toward brain machine interface in real environments. IPAM Workshop on Multimodal Neuroimaging, 2013.3.7, Los Angeles(The United States of America), (招待講演)

Nakano, D., Maeda, S., Ishii, S. Control of a free-falling cat by policy-based reinforcement learning. International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN), 2012.9.14, Lausanne (Swiss)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:

出願年月日:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等  
研究代表者(石井信)ホームページ  
<http://ishiilab.jp/member/ishii/publications/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者  
石井 信 (ISHII, Shin)  
京都大学 大学院情報学研究科・教授  
研究者番号: 90294280

(2) 研究分担者 ( )

研究者番号:

(3) 連携研究者 ( )

研究者番号: