

令和 4 年 5 月 25 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K20355

研究課題名（和文）脳・行動融合計測からのヒトの未来状態予測法の開発

研究課題名（英文）Predicting human behavior by combining brain and behavioral measurements

研究代表者

森岡 博史（Morioka, Hiroshi）

国立研究開発法人理化学研究所・革新知能統合研究センター・特別研究員

研究者番号：20739552

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）：脳のように複雑な非線形性をもつダイナミクスに対する新たな機械学習に基づく解析法を開発した。従来の解析法の多くは線形のダイナミクスや潜在成分を仮定したものがほとんどであった。そのような中この研究課題においては、より一般的な形の非線形ダイナミクスを対象とする新たな解析法として、深層学習に基づくデータ駆動型の教師なし表現学習法を開発し、その理論的な保証を与えることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般形の非線形ダイナミクスは不定性が高いことが知られており、同定性を保証した解析法はこれまで存在しなかった。提案法はそのような一般形非線形ダイナミクスの解析を理論的な保証を与えた上で実現するものであり、大きな学術的意義がある。また、提案法は汎用性の高いものであり、様々な対象に広く適用可能なものである。今後様々な理論的拡張が考えられるなど、社会的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：We developed a novel analysis framework for general nonlinear dynamics. The conventional frameworks generally assumed linear dynamics or additive innovation models, which can be restrictive for their applications to complex dynamics including the human brain. Our new framework, unsupervised representation learning based on deep learning with theoretical justification, is designed for such general dynamical models, and gives very general tools for analyzing them.

研究分野：情報学

キーワード：機械学習 計算神経科学 時系列予測 非線形解析 深層学習

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。

1. 研究開始当初の背景

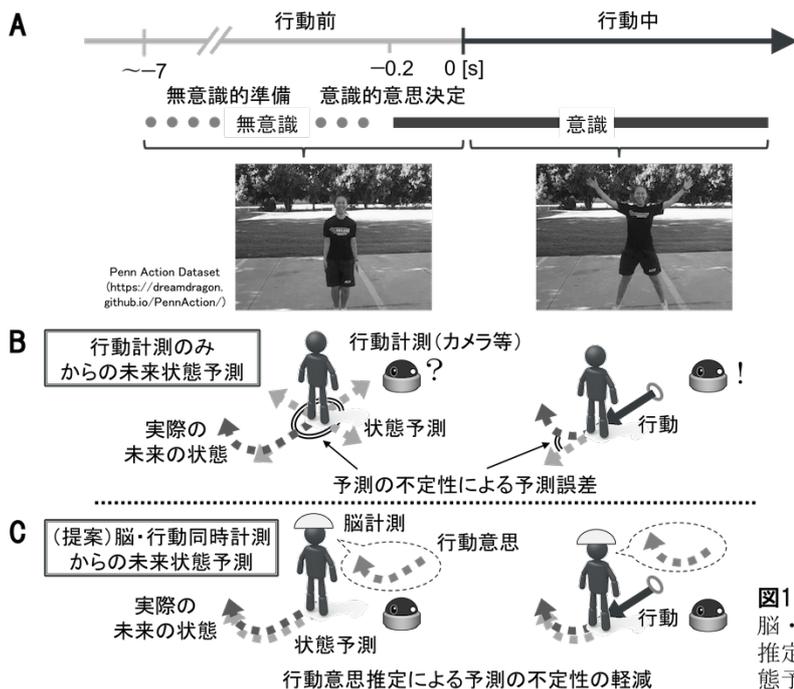


図1. 提案研究のコンセプト：脳・行動計測からの行動意思推定と、それに基づく未来状態予測。

近年、行動計測器（カメラ等）の性能の向上・小型化・低価格化にとまらないあらゆる場所（監視カメラ・車載カメラ・スマートフォン等）への設置が進む中で、それらの観測データからのヒトの未来状態予測（位置や姿勢）が注目を浴びている。そのような技術は、行動の先読みに基づくスマートサポートシステム（身の回りのデバイスの制御や、動作補助など）や、危険予測・回避システム（車載カメラからの歩行者の行動予測、回避など）など広く応用が考えられ、来る高度情報処理社会において必須の技術になると期待される。

しかし、そのような外部からの観測に基づく状態予測には不良設定性がある。すなわち、ヒトの行動は意思と文脈によって変わるため、行動開始前の状態（ポーズ）・または過去の状態時系列のみからの予測は困難（または不可能）となる（図 1A, B）。そのため、近年における最新の機械学習手法（深層学習）をもってしても、扱われる予測時間幅は 1~2 秒程に限られたものであり、ヒトの行動予測の難しさを物語っている。

2. 研究の目的

本研究では、行動計測に脳計測を融合し、それら統計的性質の異なる二つの計測モダリティからの統合的なダイナミクス解析・予測手法を開発することで、これまで捉えることが困難だった、ヒトの「潜在的な行動意思」に基づいた「未来状態」の推定・予測を目指す。それにより、行動計測のみから予測するよりも高精度、かつ長期間未来の行動予測が可能であることを、実データを用いて検証する。脳計測データには行動を開始する 7 秒前にはすでに無意識的な意思決定にともなう活動が含まれていることなどが先行研究で言われており（図 1A）、脳計測の融合によってその潜在的情報を抽出することで不定性が解消され、未来状態予測の精度が飛躍的に向上すると期待される（図 1C）。

このように本研究は、ヒトの未来状態予測という極めて困難な課題に、脳・行動計測の融合的解析手法の開発により挑戦するという独創性を持つ。行動・脳計測のそれぞれで状態予測の研究が行われ始めている中で、本研究はそれらを相補的に統合することで、より長期・高精度に未来状態を予測するという、国際的に見ても極めて新規性の高いものである。

3. 研究の方法

本研究の実現には、「脳計測」・「行動計測」データ、それらを生じさせる潜在的な「行動意思」、さらに「未来状態」の間の複雑な対応関係・ダイナミクスを学習する必要がある。しかし、それには主に以下のような課題がある：

問題点①：潜在行動意思は、脳・行動計測のいずれからも直接観測できない未知の潜在変数であるため、機械学習において一般的である教師あり学習手法では推定できない。

問題点②: 脳・行動計測いずれも、潜在脳活動との関係が極めて複雑・非線形であることが予想され、一般的な信号解析手法で仮定しているような線形の関係で表せない。

問題点③: 未来を予測するには、潜在行動意思のダイナミクスに基づく未来予測が必要。

本研究ではそれらの課題に対して、近年目覚ましい発展を遂げている深層学習手法を、提案者のこれまでの研究を元にさらに拡張・昇華することで解決を目指す。具体的には以下のような計画で研究を遂行する。

(1) 脳・行動同時計測マルチモーダルデータベース

研究遂行には、ヒトの行動とそのときの脳活動を同時に計測したデータベースが必要となる。本研究では、(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)内にそのような目的のために特別に建てられた実環境実験用住宅において計測された行動・脳波(EEG)同時計測データを用いる。さらに必要であれば、新たにリアルタイムに脳・行動マルチモーダル計測が可能な仮想現実(VR)環境を整備し、より自由度の高い状況下でのデータを取得することも検討する。

(2) 非線形な関係を持つ脳・行動計測モダリティから、共通する潜在行動意思基底の抽出法の開発

まず、問題点①、②の解決に向け、提案者がこれまでに開発した深層学習に基づく非線形独立成分分析法(ICA)を元に、複数の計測モダリティ(脳・行動)から、それらに共通する潜在行動意思基底を、非線形教師なし学習により抽出する手法の開発を目指す。それには、先行研究で扱っていたような単一の非線形ネットワーク構造に対して、それぞれの計測モダリティに対応するネットワークを並列・階層的に統合するネットワーク構造へと拡張したマルチモーダル学習で実現できると予想される。このような構造により、複数の性質の異なる入力を並列・相補的に扱うことが可能となり、上層部において、被験者の行動とそれに対応する脳活動とに共通する潜在状態、すなわち「行動意思」がロバストに抽象化された表現が獲得されると期待される。ここではさらに、時空間的な構造(複雑に変動するダイナミクス、ヒトのキネマティクスモデルなど)をモデルに陽に組み込むことで、潜在状態を解釈可能な形で抽出するという、先駆的な機械学習手法を開発する。また、ここで提案したモデルを前項で述べたデータセットに適用することで、理論モデルの妥当性と神経科学的妥当性の双方を評価する。

(3) 推定された潜在行動意思とそのダイナミクスに基づく未来状態予測手法の開発

次の段階として、上で推定した潜在行動意思の情報に基づいて、未来状態を予測するための手法を開発する(問題点③)。その実現のためには、行動意思をもとに次のステップの状態を出力する階層的な非線形ニューラルネットワークデコーダーに加え、行動意思のダイナミクス自体の学習が必要となる。ここでは、再帰的なネットワーク結合により過去に計算された情報を保持する記憶力を持ち合わせたニューラルネットワークをモデルに統合することでダイナミカルモデルを表現する。それらをデータから統一的に学習することで、未来状態予測を実現する手法を提案する。以上で学習したモデルを生成モデルとし、現時刻の脳・行動計測データを入力した際の未来の状態時系列を人工的に生成することで、未来の状態予測が可能となる。モデル評価の際には、そこで生成された状態時系列と、実際の行動観測データとを比較することで、生成・予測モデルの妥当性を評価し、従来手法よりも予測性能が高いことを確認する。

4. 研究成果

研究期間全体を通じた成果として、脳のように複雑な非線形性をもつダイナミクスに対する新たな機械学習に基づく解析法を開発した。提案法の一つは研究実施計画における「非線形な関係を持つ脳・行動計測モダリティから、共通する潜在行動意思基底の抽出法の開発」の要素技術となる、「非線形ダイナミクスの背後にある潜在成分の推定法」である。提案法は独立イノベーション分析と呼ばれるものであり、従来では線形性を仮定していた自己回帰モデルを、一般的な非線形自己回帰モデルに拡張したものである。非線形性を陽に仮定することにより、従来法では困難だった、非線形な脳・行動ダイナミクスの背後にある潜在成分の推定が可能になると期待され、当該分野に大きなインパクトを与えた。提案法の有効性を示すため、脳磁図により計測された、外部刺激(視覚・聴覚)下におけるヒトの脳活動計測データに適用した結果、脳ダイナミクスが実際に外部刺激に依存する形で駆動されていることが示された。これらの結果はヒトの脳・行動ダイナミクスを理解・予測する上で重要な知見であり、本研究を遂行する上でも重要な足がかりとなる。

より最近では、そこで開発した解析法をさらに発展させることにも注力した。具体的には、単純な自己回帰的な時間構造よりもさらに高度な構造を考慮するものであり、脳と行動ダイナミクスの背後にある潜在成分の統合的な推定が可能になると期待される。

以上のように本研究課題では、脳・行動データのように複雑な非線形性をもつダイナミクスに対する新たな機械学習に基づくデータ駆動解析法の開発に貢献したといえる。従来解析法の多くは線形のダイナミクスを仮定するか、非線形ダイナミクスであっても線形の潜在成分モデルを仮定したものがほとんどであった。そのような中、この研究課題においてはより一般的な

形の非線形ダイナミクスを対象とする新たな手法を開発することに成功した。提案法は汎用性の高いものであり、脳や行動データにとどまらず様々な対象に広く適用可能なものである。また様々な拡張が考えられるなど、今後いろいろな研究につながることを期待される。

なお、本研究課題の目標である脳と行動データの同時計測データからの未来予測はまだ十分に達成されておらず、今後の課題となっているが、その足がかりとなる成果は得られたといえる。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Morioka Hiroshi, Calhoun Vince, Hyvarinen Aapo	4. 巻 218
2. 論文標題 Nonlinear ICA of fMRI reveals primitive temporal structures linked to rest, task, and behavioral traits	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 NeuroImage	6. 最初と最後の頁 116989 ~ 116989
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neuroimage.2020.116989	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 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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Hiroshi Morioka, Hermanni Halva, Aapo Hyvarinen
2. 発表標題 Independent Innovation Analysis for Nonlinear Vector Autoregressive Process
3. 学会等名 International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroshi Morioka
2. 発表標題 Nonlinear spatial ICA of resting-state fMRI via space-contrastive learning
3. 学会等名 Brainstorming on Primate Connectome 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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			
フィンランド	University of Helsinki			
米国	Georgia State University			