

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：32708

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04289

研究課題名（和文）脳波から読み取る脳の予測能力：脳は物体の動きをどのように予測しているのか？

研究課題名（英文）EEG study to investigate the ability of brain on predicting motion of interacting objects

研究代表者

神原 裕行 (Kambara, Hiroyuki)

東京工芸大学・工学部・准教授

研究者番号：50451993

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、物体の動きの予測に關与する脳活動の可視化と理解を目的として、ボールを用いたジャグリング運動中の脳波信号の計測実験及び解析を行った。その結果、頭頂連合野付近の脳活動に、空中を移動するボールの位置と關連する成分が見られることが確かめられた。また、仮想現実空間内でジャグリングを行えるシステムを用いて、ジャグリング未経験者にトレーニングをしてもらった結果、現実空間内でのボールの動きを予測する能力が向上することが確かめられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物体と相互作用がある運動を行うとき、我々の脳は物体の動きや物体が身体に及ぼす影響を予測しながら自らの身体を制御しているが、このような予測が脳のどこでどのようにして行われているのかは人を対象とした実験では確かめられていなかった。本研究ではジャグリング運動を研究対象とした脳波信号解析を行うことで、物体の予測が行われている可能性がある脳部位やその脳活動の時系列変化を抽出することに成功した。この成果は、人が行っている複雑な運動制御の脳内メカニズムの解明に役立つと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Firm interaction with external objects needs accurate trajectory prediction of moving objects. We analyzed electroencephalography (EEG) data measured during ball-juggling task to investigate brain activity and neural substrate for the trajectory prediction of moving objects. We found time-frequency features in the parietal cortex correlated with the special position of the ball flying in the air. In addition, we developed a virtual reality system enabling ball-juggling task in a virtual space and trained juggling beginners with the device. As a result, we confirmed that their ability to predict the movement of the ball in real space improved.

研究分野：計算論的神経科学

キーワード：予測制御 運動学習 視覚運動変換

1. 研究開始当初の背景

近年の AI (人工知能) 技術の発展にともない、日常生活の場面で機械とのインタラクションが増えている。人間と機械が快適に共存する世界を実現するためには、機械だけでなく人間も含めたシステム全体がどのように振る舞うのかを考える必要がある。例えば、AI 技術を用いた自動運転の技術開発において、人間側のヒューマンエラーにより痛ましい事故が発生している。

人間と機械を含めたシステムの振る舞いを解析するためには、まず、脳が外部環境をどのように知覚・認識し、それに基づいてどのように外部環境に働きかけるのかを理解しモデル化することが重要となる。しかし、我々の知覚や認識、また運動生成の脳内メカニズムの大部分は未だに解明されておらず、人間側の特性をモデル化することは依然として難しい課題である。

人が物体とインタラクションをする時、脳は物体の動きを予測しながら身体を動かしている。その理由は、感覚器から脳への信号伝達に時間遅れがあるため、物体が身体に接触してから反応していたのでは間に合わないからである。物体の動きの予測は、必ずしも視覚情報だけから行われるわけでない。例えば、自らが投げ上げたボールをキャッチする際には、ボールの視覚的情報とともに腕や手の感覚情報や筋肉への運動指令の情報を統合してボールが落下する位置を予測し、ボールが接触する前からキャッチング動作を開始している。本研究では、外部環境とのインタラクションを安定して行うために必要不可欠な脳の予測能力の解明を目指し、物体の動きの予測に関する脳内情報処理機構の理解を目標とする。

2. 研究の目的

本研究では、運動中の脳波信号から物体の動きの予測に関与する脳部位、情報表現、脳部位間の情報の流れを可視化することで、外部環境の変化を予測する脳内メカニズムの理解を目的とする。また、脳の構造的な変化をもたらすことが知られている運動トレーニングを行うことによって、物体の動きの予測に関与する脳機能も変化するかを検証し、運動学習や適応も含めた運動制御に関する脳内情報処理機構の理解を目指す。特に本研究では、物体の動きを予測する必要がある運動タスクとして、ボールを用いたジャグリング運動を取り上げる。このジャグリング運動には、ボールのスローイングやキャッチング動作が含まれており、ジャグリング運動を継続するためには、正確なスローイングとともに、落下位置やタイミングの予測に基づいたキャッチングが求められる。

以上の目的を実現するために、具体的な研究課題として以下の三つの課題を設定する。まず、バーチャルリアリティを用いたジャグリング運動が行える実験環境の構築(課題 1)を行う。次に、ボールの動きの予測に関する脳内情報処理の可視化とモデル化(課題 2)を行う。最後に、複数のボールのジャグリング運動をトレーニングすることによるボールの予測能力の変化の検証(課題 3)を行う。

3. 研究の方法

課題 1 : VR ジャグリングシステムの構築

ボールの視覚情報をリアルタイムで操作できるようにバーチャルリアリティ (VR) 技術を用いて仮想空間上でジャグリングが行えるシステムを開発した (図 1)。このシステムでは、ジャグリング中のボールや手、さらに外部環境の視覚情報がヘッドマウントディスプレイにより表示されるとともに、ボールが手に接触した際に与える擬似的な力触覚情報が力覚提示装置 (SPIDAR: Space Interface Device for Artificial Reality) を用いて提示される。また、ヘッドマウントディスプレイや力覚提示装置の制御とともに仮想現実空間の物理シミュレーションは、ゲーム開発エンジン Unity を用いて実装された。

課題 2 : ボールを動きを予測する脳活動の可視化とモデル化

ボールの動きの予測に関係する脳活動を特定するために、ジャグリング運動中の脳波信号データを解析した。このデータは、ジャグリングの経験者に三つのボールを用いたカスケードパターンという基本的な種類の技を行ってもらっている最中に 205 個の電極を用いて計測された頭皮脳波信号であり共同研究先であるカリフォルニア大学サンディエゴ校の Scott Makeig 博士の研究グループの元で計測されたものである。

脳波信号データの解析には EEGLAB ツールボックスを用いた。解析は、1) ハイパスフィルタリング、2) ノイズ除去、3) 独立成分分析および各成分の信号源推定、4) 脳活動由来と考えられる脳波独立成分の選定、5) 脳波独立成分の時間周波数解析、の順に行った。また、ジャグリング中のビデオデータから、空中を移動するボールが頂点に達した際の位置を求めた。そして、選定された脳波独立成分の周波数パワーの変化とボールの頂点位置との関係を線形回帰分析により求めた。

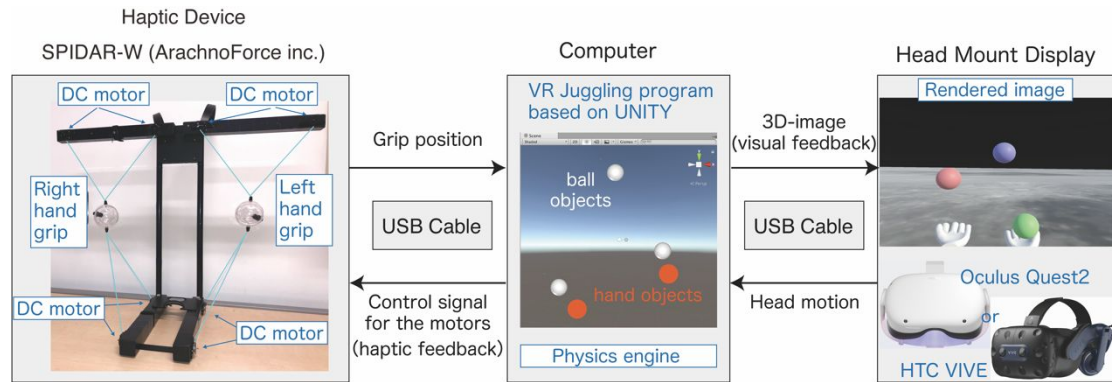


図 1 : VR ジャグリングシステムの構成図

課題3 : ジャグリングトレーニングによる予測能力の変化の検証

ジャグリングのスキル向上に伴いボールの落下地点の予測能力がどのように変化するかを検証するための実験システムの構築、及び、ジャグリングの初心者を対象とした計測実験を実施した。なお、この実験は研究代表者が所属していた東京工業大学で実施された。

実験では、ジャグリング未経験者(計12名)に連続した10日間に渡り、課題1で開発したVRジャグリングシステムを用いて仮想空間上で三つのボールによるカスケードパターンの練習を行ってもらった。また、各実験日において、実空間でも同じパターンのジャグリングを実施してもらいジャグリングのスキルを定量化した。さらに、予想能力を検証するために、液晶シャッターメガネをかけた状態で二つのボールを順に投げそれぞれをキャッチするタスクも実施した。

4 . 研究成果

課題1 : VR ジャグリングシステムの構築

開発したVRジャグリングシステムの初期版を用いて仮想現実空間でのジャグリング中の動作解析を行なった結果、投げ上げ動作時に、現実空間よりも大きく減速するという特徴が見られた。そのため、仮想現実システムにおけるボールのスローイングを大きな減速を伴わずに行えるように、球形のグリップにスローイング検出用のボタンを配置するなどの改良を行った。その結果、使用者が意図したタイミングでボールを放すことができるようになったことがアンケート調査により確認できた。また、ボールをキャッチした際のボールからの力覚情報の有無に応じて、仮想空間上でのトレーニングの効果に差が生じるのかを検証した結果、力覚情報が有る方が実空間におけるジャグリングのスキルが向上する傾向が見られた。

課題2 : ボールを動きを予測する脳活動の可視化とモデル化

実空間でのジャグリング運動中の脳波信号を解析した結果、ボールや手の周期的な動きに合わせて変化する時間周波数成分が、視覚野、頭頂野、体性感覚、運動野に信号源を持つ脳波独立成分に観測された。この成果は、ジャグリングのような全身の運動を行っている脳波信号から、運動中の感覚・認知や運動制御に関係する脳活動の特徴を抽出できる可能性を示している。

また、脳波独立成分の時間周波数データとボールの頂点位置に関する線形回帰を行った結果、頭頂野に信号源を持つ脳波独立成分のアルファ波帯のパワーがボールの頂点における水平方向の位置と有意に相関することが示された。この成果は、自らが投げたボールの動きの予測が頭頂野付近で行われている可能性を示唆している。

課題3 : ジャグリングトレーニングによる予測能力の変化の検証

ジャグリング未経験者にVRジャグリングシステムを用いて仮想現実空間上でジャグリングの練習を行ってもらった結果、全ての被験者において、実空間でのジャグリングのスキルが向上することが確かめられた。この成果は、仮想空間上での運動スキルのトレーニングが、実空間における運動スキルの向上につながることを示している。

また、ジャグリングのトレーニング期間中にボールの動きを予測する能力が向上したかを検証するために、ボールが頂点に達した瞬間に液晶シャッターメガネにより視界を遮る状況でボールを捕球するタスクを実施した結果、全ての被験者においてトレーニング初日に比べ最終日における予測能力が向上していることが確認できた。この成果は、ジャグリングのように物体の動きを予測する必要がある運動タスクを仮想現実空間においてトレーニングする場合においても、物体の動きを予測する能力が向上することを示しており、バーチャルリアリティ技術を用いた運動トレーニングシステムの有効性を示唆している。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 小池 康晴, 神原 裕行	4. 巻 61
2. 論文標題 筋骨格系モデルを用いた力と運動の学習	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 288-293
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11499/sicejl.61.288	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 Hiroyuki Kambara, Atsushi Takagi, Haruka Shimizu, Toshihiro Kawase, Natsue Yoshimura, Nicolas Schweighofer, Yasuharu Koike	4. 巻 139
2. 論文標題 Computational reproductions of external force field adaption without assuming desired trajectories	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 179-198
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2021.01.030.	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 H. Kambara, H. Ogawa, A. Takagi, D. Shin, N. Yoshimura, Y. Koike	4. 巻 -
2. 論文標題 Modulation of wrist stiffness caused by adaptation to stochastic environment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2021.1900913	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13件（うち招待講演 3件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 神原裕行
2. 発表標題 ジャグリング運動の脳身体運動イメージング
3. 学会等名 第22回日本電気生理運動学会大会JSEK 2023（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名	Wanhee Cho, Makoto Kobayashi, Hiroyuki Kambara, Hirokazu Tanaka, Takahiro Kagawa, Makoto Sato, Kim Hyeonseok, Makoto Miyakoshi, Makeig Scott, John Iversen, Natsue Yoshimura
2. 発表標題	Juggling on the moon (III): Computational neuroscience of skill acquisition
3. 学会等名	CRCNS 2023 (国際学会)
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	佐藤誠, 神原裕行, Wanhee Cho, 小林誠, 田中宏和, 香川高弘, 吉村奈津江
2. 発表標題	VRジャグリングシステムを用いた仮想現実空間内における運動スキル学習
3. 学会等名	第28回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	Natsue Yoshimura, Hiroyuki Kambara, Hirokazu Tanaka, Takahiro Kagawa, Makoto Sato, Wanhee Cho, Makoto Kobayashi, Hyeonseok Kim, Makoto Miyakoshi, Scott Makeig, John R Iversen
2. 発表標題	Juggling on the moon (II): Computational neuroscience of skill acquisition
3. 学会等名	CRCNS2022 (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名	Hyeonseok Kim, Makoto Miyakoshi, Hiroyuki Kambara, Hirokazu Tanaka, Takahiro Kagawa, Makoto Sato, Natsue Yoshimura, Scott Makeig, and John R Iversen
2. 発表標題	A computational neuroscience approach to skill learning and transfer from visuo-haptic VR to the real-world
3. 学会等名	CRCNS2022 (国際学会)
4. 発表年	2022年

1. 発表者名 Hiroyuki Kambara, Wanhee Cho, Hyeonseok Kim, Rikiya. Oya, Yusuke. Kitami, Makoto Kobayashi, Supat Saetia, Takahiro Kagawa, Hirokazu Tanaka, Makoto Miyakoshi, John R Iversen, Scott Makeig,, Makoto Sato, Natsue Yoshimura
2. 発表標題 Juggling skills trained in VR transfer to the real world
3. 学会等名 Neuroscience 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroyuki Kambara, Wanhee Cho, Hyeonseok Kim, Rikiya. Oya, Yusuke. Kitami, Makoto Kobayashi, Supat Saetia, Takahiro Kagawa, Hirokazu Tanaka, Makoto Miyakoshi, John R Iversen, Scott Makeig,, Makoto Sato, Natsue Yoshimura
2. 発表標題 Juggling on the Moon: A VR system for complex motor skill learning
3. 学会等名 IDW'22 (The 29th International Display Workshops) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 神原裕行, チョ・ワンヒ, キム・ヒョンソク, 小林誠, 大矢力太, 北見雄祐, セイティア・スパット, 香川高弘, 田中宏和, 宮腰誠, イヴァーセン・ジョン, マケイグ・スコット, 佐藤誠, 吉村奈津江
2. 発表標題 複雑な運動スキル獲得を可能とするVRジャグリングシステム
3. 学会等名 映像情報メディア学会 情報ディスプレイ研究会 ディスプレイ技術シンポジウム2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Kambara, M. Miyakoshi, S. Makeig, H. Tanaka
2. 発表標題 Directional tuning patterns in human EEG during wrists step-tracking movements
3. 学会等名 第43回日本神経科学大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Kambara, M. Miyakoshi, H. Tanaka, T. Kagawa, N. Yoshimura, Y. Koike, S. Makeig
2. 発表標題 Mobile brain / body imaging during 3-ball cascade juggling
3. 学会等名 The 2020 Yokohama Sport Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神原裕行, 高木敦士, 清水遥, 川瀬利弘, 吉村奈津江, Nicolas Schweighofer, 小池康晴
2. 発表標題 Multiple timescales in force field adaptation reproduced by a combination of multiple learning modules
3. 学会等名 第30回日本神経回路学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroyuki Kambara
2. 発表標題 Dynamic modulation of brain activities during three-ball cascade juggling
3. 学会等名 29th NCM Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroyuki Kambara
2. 発表標題 Analysis of 3-ball juggling performance and brain dynamics
3. 学会等名 29th Annual Conference of Japanese Neural Network Society
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
研究協力者	吉村 奈津江 (Yoshimura Natsue)	東京工業大学・情報理工学院・教授 (12608)	
研究協力者	佐藤 誠 (Sato Makoto)	東京工業大学・科学技術創成研究院・特別研究員	
研究協力者	小池 康晴 (Koike Yasuharu)	東京工業大学・科学技術創成研究院・教授 (12608)	
研究協力者	キム ヒョンソク (Kim Hyeonseok)	カリフォルニア大学サンディエゴ校・Swartz Center for Computational Neuroscience・Postdoctoral Scholar	
研究協力者	宮腰 誠 (Miyakoshi Makoto)	カリフォルニア大学サンディエゴ校・Swartz Center for Computational Neuroscience・Assistant Project Scientist	
研究協力者	イヴァーセン ジョン (Iversen John)	カリフォルニア大学サンディエゴ校・Swartz Center for Computational Neuroscience・Associate Researcher	
研究協力者	マケイグ スコット (Makeig Scott)	カリフォルニア大学サンディエゴ校・Swartz Center for Computational Neuroscience・Director	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	シュウェイホッファー ニコラ (Schweighofer Nicolas)	南カリフォルニア大学・Division of Biokinesiology and Physical Therapy・Professor	

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		
米国	University of California, San Diego	University of Southern California	