

研究終了報告書

「深層学習を用いたヒト間協調技能を支える脳情報特徴量抽出とその応用」

研究期間：2020年12月～2023年3月

研究者：上原 一将

1. 研究のねらい

「阿吽の呼吸」という諺があるようにヒトとヒトが意思疎通を行い、他者の意図を読み取り、協調した行動を行うことが可能である。日常生活において協調行動を要求される場面は多く、大きな荷物を複数人で移動させることなどを経験する。日常生活以外では、さらに高度なヒト間協調技能が要求されることがある。例えば、音楽アンサンブルのようにオーケストラは楽器演奏を通して大規模集団における協調技能を行なっており、一糸乱れぬタイミングで正確に音楽表現を行うことが可能である(Eerola et al. *Phys Life Rev.* 2018)。このような協調技能熟達のポイントとして挙げられる戦略の一つとして、他者の動きを探索できる能力が重要であると考えられる。実際、個体内(単独)の学習においては、課題の成功や失敗を繰り返し試行錯誤することにより探索をすることが重要であることが報告されている(Wu et al. *Nat. Neurosci.* 2014; Herzfeld & Shadmehr, *Nat. Neurosci.* 2014; Arazi et al. *J Neurosci.* 2017)。本研究では、協調技能のエキスパートはこの探索範囲の拡大と縮小を円滑に行うことに優れていると推測し、協調技能獲得のための探索範囲の拡大・縮小を円滑に行うことを制御するような脳情報特徴量を有していると仮説を立案した。

本研究ではヒト間協調技能を支える脳情報特徴量を事前仮説に囚われないデータ駆動型アプローチも用いて抽出するために、複数人の脳から脳波を同時に記録する革新的な計測手法である脳波 hyper-scanning 手法と深層学習を取り入れた特徴量抽出技術を組み合わせることで、ヒト間協調技能を支える脳情報特徴量の同定を行うことをねらいとした。また、ヒト間協調技能に優れているモデルケースである音楽演奏家をエキスパートとして被験者群に加え、協調技能を支える脳情報特徴量の詳細を検討した。脳情報特徴量抽出には、深層学習の判断根拠可視化技術である Grad-CAM を用いることで、「いつ、どこの脳領域」の神経情報が協調技能に重要であることを明らかにした。また、2.5 年の研究期間に加え、加速フェーズを含め長期的なスパンで、これらの脳情報特徴量を用いたニューロフィードバック型協調技能学習支援システムのプロトタイプ開発を最終的な到達目標とした。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究計画は2つの研究テーマで構成されており(図1)、研究テーマ1では、ヒト間協調技能に関する脳情報特徴量を脳波 hyper-scanning 手法と深層学習を用いて抽出することを目的として研究を進めた。研究テーマ2では、採用期間の後半と加速フェーズで、研究テーマ1で得られたヒト間協調技能に貢献する脳情報量特徴量を用いて設計するヒト間協調技能を高めるニューロフィードバック学習支援システムのプロトタイプを開発することを目的に研究を進めた。

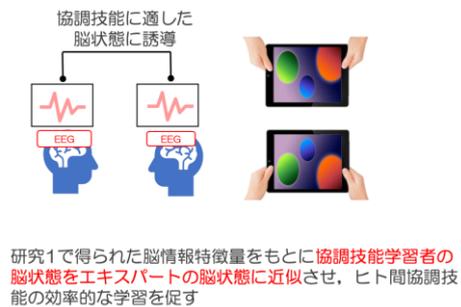
研究テーマ1では、46名の健常成人を23ペアに分け計測を行った。このうち半分のペアは音楽演奏家とした。計測課題については、モニタに映し出されたカーソルを協力して制御するヒト-ヒト協調技能課題を用いた。課題実施中に32電極の頭皮脳波を各被験者から記録し、神経活動を非侵襲的に記録

した。計測した脳波信号を入力とし、協調課題の成功/失敗を分類する畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を行ったところ音楽演奏家では 75.6%の精度で成功/失敗を予測することが可能であった。音楽未経験者の成功/失敗の判別精度は 65.5%であり、日頃から音楽演奏を通して協調技能を鍛錬している音楽家は協調技能の成功/失敗に関与する脳情報特徴量を持ち合わせている可能性が示唆された。この脳情報特徴量を可視化し、課題中の「いつ」、「どの脳領域」が協調技能の成功/失敗に寄与するかを理解するために近年注目を集めている Explainable AI(XAI)技術を取り入れて解析を進めた。具

研究1: ヒト間協調技能の脳情報特徴量抽出



研究2: 閉ループニューロフィードバック搭載学習支援システムへの展開



2020年度後半-2021年度後半



2022年度 (+加速フェーズ)

図 1: 本研究の概要

体的には AI の判断根拠可視化手法のひとつである Grad-CAM を用いた。結果として、音楽演奏家と音楽未経験者では成功時あるいは失敗時に貢献する脳情報特徴量は異なる可能性が示唆された。音楽演奏家では課題開始前の準備期間における前頭及び後頭脳領域の神経活動が課題成功に関与し、その一方で音楽未経験者は課題を実行している最中の前頭及び後頭脳領域の神経活動が課題成功に関与していることが明らかとなった。失敗時は両者ともに課題開始前の準備段階における頭頂脳領域の活動が関与している可能性が示唆された。上記のように本研究計画では、当初の計画通りヒト間協調技能に貢献する脳情報特徴量の抽出に成功した。しかしながら、2022 年度と加速フェーズに予定していた閉ニューロフィードバック学習支援システムの開発に関しては、上原が 2022 年から JST さきがけに採択されたため、重複制限により加速フェーズに進むことができず、本 ACT-X 採用期間でシステム開発まで進めることができなかった。しかしながら、ヒト間協調技能の成功/失敗に貢献する脳情報特徴量を同定できているため、閉ニューロフィードバック学習支援システムの開発については今後も継続して取り組む予定である。

(2) 詳細

研究テーマ 1「ヒト間協調技能の脳情報特徴量抽出」

46 名の健常成人を対象とし、23 ペアを形成して計測を行った。このうち半分のペアは音楽演奏家であった。各被験者は各々の姿が見えないようにそれぞれ用意された暗室に入り課題を行った。被験者はモニタの前に座り、各々に与えられた可変抵抗器付きジョイスティックを片手で把持し、画面に映し出されたカーソルをジョイスティックから出力される信号を操作し、ターゲットを追従する課題とした。カーソルの駆動はジョイスティックから得られた各々の電圧変化時系列信号を用いることで操作が可能になるように設定した。具体的には、一人の被験者がカーソルの左方向の

制御、もう一人の被験者がカーソル右方向への制御を担当し、そのベクトル方向にカーソルが動くように設定をした。本課題は LabVIEW ソフトウェア (National Instruments 社) を用いて制御し、行動データ記録を行った。この視覚課題は、モニタの下から上に向かって移動するターゲットから離されないようにカーソルを操作するように被験者に指示を行った。被験者は合計で 100 試行の課題 (1 試行 8 秒) を実施し、100 試行すべてにおいて頭皮脳波を記録した。二人の被験者から同時に同一アンプシステムで脳波を記録する hyper-scanning 手法を用いて記録し時間ズレがなく互いの脳波データが記録できるように設定を行った上で計測を実施した。被験者から得られた課題中の 32 電極脳波時系列信号は最低限の前処理すなわちフィルターをかけることで低・高周波ノイズを除去した後、各試行 8 秒間の脳波を切り出し、「32 電極 × 時間」の 2 次元脳波データを整形した。また、アノテーションとして協調課題パフォーマンスの指標をもとにこの脳波データに試行ごと正解と失敗のラベルを付加し、畳み込みニューラルネットワークの入力として扱った。行動データにおけるヒト間協調技能のパフォーマンス指標はターゲットとカーソルの二次元距離を算出し、この値を displacement としてスコア化した。この displacement の値が大きいほどターゲットとカーソルの距離が離れており、displacement の値が大きいほどターゲットとカーソルの距離が離れており、正確にターゲットを追従できていないことになる。計測結果から、音楽演奏経験者と非経験者を比較すると音楽経験者の方が協調技能発揮時の displacement が小さく、2 人の協調により正確にターゲットを追従できている結果を示した。行動データ結果から、当初の仮説通り、合奏など日常的にヒト間協調技能を集中的に鍛錬している音楽演奏家は、協調技能に優れていることが示唆された。脳波と深層学習を用いた協調技能に関する脳情報特徴量の抽出として、EEG データを入力とした CNN を用いて協調運動課題の成功と失敗を判別する 2 クラス分類を行った。CNN の畳み込み構造に関しては、EEG を用いた CNN で用いられる精度と計算量のバランスが取れている EEGNet (Lawhern et al. *J Neural Eng.* 2018) を当初採用した。しかしながら、精度が不十分であったため、CNN の最も基本的な構造を有し多層構造となる VGGNet (Simonyan & Zisserman *ICLR* 2015) を用いたところ、安定して高い分類精度 (70%程度) を得ることができたため、VGGNet を用いて脳情報特徴量の抽出を図った。その他にも脳波データ特有の時系列方向への変化を考慮し LSTM 単体や CNN と LSTM を組み合わせた手法を用いて検証したが、本データセットには VGGNet が高い性能を発揮する結果を示した。音楽演奏家と音楽未経験者の成功/失敗分類 (チャンスレベル 50%) の結果を示す。音楽演奏家、音楽未経験者ともにチャンスレベルは超えており、音楽未経験者が 65% の精度であったが音楽演奏家はそれを遥かに超える 75% の精度が得られた。この結果から、日頃から音楽演奏を通して協調技能を鍛錬している音楽家は協調技能の成功/失敗に関与する脳情報特徴量を持ち合わせている可能性が示唆された。

次のステップとして、この 2 クラス分類の判別に最も寄与した、すなわち協調技能の成績に関与する脳部位と神経活動のタイミングを特定するために AI 判断根拠可視化手法のひとつである Grad-CAM を用いて協調技能の成功/失敗に最も寄与する脳情報特徴量抽出を試みた。音楽演奏家と音楽未経験者では成功時あるいは失敗時に貢献する脳情報特徴量は異なる可能性が示唆された。音楽家では課題開始前の準備期間における前頭脳領域の神経活動が課題成功に関与し、その一方で音楽未経験者は課題を実行している最中の前頭及び後頭脳領域の神経活動が課題成功に関与していることが明らかとなった。失敗時は両者ともに課題開始前の準備段階における頭頂脳領域の活動が関与している可能性が示唆された。

これらの研究成果から本研究では、ヒト間協調技能を計測する課題を作成し、脳波 hyper-scanning 手法で神経活動を記録し、計測で得られた行動データや神経活動を深層学習と AI 判断根拠可視化手法を用いて、ヒト間協調技能に必要な脳情報特徴量の抽出に成功した。すなわち研究 1 について当初立案した研究目的を達成することができた。

研究テーマ 2「閉ニューロフィードバック搭載型協調技能学習支援システムの開発」

当初の計画では 2022 年度と加速フェーズにおいてニューロフィードバックを用いた協調技能学習支援システムのプロトタイプ開発を目指していたが、1) ヒト間協調技能に関わる脳情報特徴量の抽出に時間を要したこと(特に深層学習のモデル構造の検証)、2) 2022 年からさきがけに採択されたため、重複制限により加速フェーズに進めないという理由から ACT-X 期間内で学習支援システムのプロトタイプ開発は困難な状態となった。しかしながら、どのようにニューロフィードバックと学習支援システムを結びつけるかというアイデアは研究テーマ 1 の結果をもとに具体化されつつある。当初の予定では、協調技能に関与する脳情報特徴量自体を閉ニューロフィードバックによって修飾することを検討し脳活動自体を協調技能に適した状態に引き込むことを計画していた。しかしながら、脳活動の一部をニューロフィードバックで操作することは技術的にも未だ乗り越えなければならない点が多くあり、かつ一部の脳活動を変調させた場合その変化の代償として他の脳領域の活動が適応的に変化する可能性が考えられる。この状態では、脳全体のシステムとしてのバランスが破綻し必ずしも協調技能の学習を支援することができない。また、研究テーマ 1 の結果から協調技能に優れている音楽演奏家の場合、課題開始前の準備期間の前頭領域の脳活動が重要であることが明らかになったため、この準備段階の前頭領域の脳活動を学習支援システムの鍵となる神経活動として取り扱うことがシステム開発の出発点となると考えた。

3. 今後の展開

本研究成果を踏まえ、今後 2 つの方向性で研究を展開する。1 つ目は、研究テーマ 2「閉ニューロフィードバック搭載型協調技能学習支援システムの開発」についてさらに研究を進め、学習支援システムのプロトタイプ作成、効果検証、社会実装である。タイムスパンとしては ACT-X 終了後 3 年後までにプロトタイプ作成、効果検証を終え、5 年後を目処に社会実装を目指す。そのためにはどこでも簡単に脳波計測が可能なウェアブル脳波等の技術を取り入れ、フィールドワークができるような仕組みを整備する。そのために、ユーザーインターフェースの開発に従事している研究者や企業とコラボレーションし、研究を加速する。

もう一つの方向性としては、AI 判断根拠可視化手法で得られた脳情報特徴量の信頼性を検証する研究である。前述のように本研究では協調技能の成功と失敗に貢献する脳情報特徴量を同定することができた。しかしながら、この同定した部位が信頼できるものであるかを検証する必要がある。この検証課題に関しては、2022 年に採択された JST さきがけ「信頼される AI 技術」の中で取り組み、神経科学、知覚認知、AI を融合する基盤技術の開発に取り組む。

4. 自己評価

研究目的の達成状況

公開

研究テーマ1については論文執筆ができる研究成果が得られており、ほぼ当初の予定通り研究目標を達成することができた。さきがけとの重複制限で加速フェーズに進むことができなかったため、研究テーマ2の目標を完全に達成することはできなかった。しかしながら、どのようにニューロフィードバック搭載型学習支援システムを構築するかというフレームワークとその基盤となる知見を研究テーマ1の成果から得ることができている。つまり、研究テーマ2の一部を開始することができており、ACT-X 開始時に立案した2.5年の到達目標(加速フェーズ分は除く)はほぼ達成できていると考える。

研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

本研究では2年目より研究補助者を雇用しデータ計測を加速させた。研究テーマ1では、二人の被験者に対して同時に脳波キャップの着用と頭皮と電極を繋ぐジェル入れ等の準備に多くの時間が必要となる。研究補助者を雇用し計測補助に配置することで効率的に多くのペアのデータを記録することができた。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

現状、本研究成果が社会・経済へ直接的な波及には至っていないが、ACT-X 事業の趣旨である「今後の見込み」を重視すると、ヒト間協調技能に特化したニューロフィードバック搭載型学習支援システムの開発は芸術・スポーツを中心とした身体教育や他者との関わりが難しいケースが多々ある自閉症等のリハビリテーションの一助を担える可能性がある。今後も本研究成果が還元可能な市場を見極め、研究開発を進める。

5. 主な研究成果リスト

2023年内を目処に本研究成果を論文化する予定。

- (1) 代表的な論文(原著論文)発表
(2)

研究期間累積件数: 0件

[Empty box for research results]

(3) 特許出願

研究期間全出願件数: 0件(特許公開前のも含む)

Table with 2 main rows (1 and 2) and columns for inventor, name, applicant, date, number, and summary.



公開

	出 願 日	
	出 願 番 号	
	概 要	

(3) その他の成果 (主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)