

令和 5 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 21701
研究開発課題名 国際共同研究プログラムに基づく日米連携による脳情報通信研究（第3回）
副 題 月面ジャグリング課題を用いたスキル獲得の脳内メカニズムの解明

(1) 研究開発の目的

本委託研究では、運動スキル（技術）獲得の脳内メカニズムの解明を目指す。スキル獲得とは、運動学習に関する一つの側面であり、例えば、自転車の乗り方を覚えることや、楽器の演奏やスポーツを習うことがスキル獲得の例として挙げられる。多彩なスキルを獲得する能力はヒトにおける優れた能力の一つと考えられるが、スキル獲得を可能とする脳の情報処理メカニズムの全容は未解明である。本委託研究では、ヒト特有の複雑な運動課題であるボールを用いたジャグリング課題を研究対象として、スキル獲得がどのように脳内で行われるのかを可視化するとともに、スキル獲得メカニズムの計算論的なモデル化を目的とする。

特に、スキル獲得の初期段階においてしばしば効果を発揮する「ゆっくりと体を動かしながらトレーニングする（以後、スローテンポトレーニング）」という事象や、「トレーニング後の睡眠による運動スキルの上昇（オフラインゲイン）」というスキル学習の固有の事象に着目する。また、ジャグリングのスキルを構成する三つの能力、1) ボールの動きを予測する能力（prediction）、2) 正確にボールを投げる能力（accuracy）、3) ボールや腕の間の時空間的協調関係を調節する能力（sequencing）を仮定し、これらの能力を行動データから定量化する実験パラダイムを提案する。

日本側研究グループは、仮想現実（VR）技術を用いて、ボールが通常よりゆっくりと動く環境でジャグリングを行うスローテンポトレーニングを可能とするVRシステムの開発を行う。さらに、ジャグリング初心者を集めた脳活動・行動計測実験を実施し、スローテンポトレーニングによるジャグリングの能力やオフラインゲインへの影響を検証するとともに、ジャグリングスキルやオフラインゲインと関係する脳活動を脳波データから抽出することで、スキル獲得に関連する脳活動を可視化する。最後にそれらの知見をもとに、ジャグリングのスキル獲得に関する脳内メカニズムの計算論的な理解を米国側研究分担者のカリフォルニア大学サンディエゴ校（UCSD）とともに目指す。

(2) 研究開発期間

令和 2 年度から令和 5 年度（36 か月）

(3) 受託者

国立大学法人東京工業大学〈代表研究者〉
学校法人五島育英会 東京都市大学
学校法人名古屋電気学園 愛知工業大学

(4) 研究開発予算（契約額）

令和 2 年度から令和 5 年度までの総額 29 百万円（令和 5 年度 1 百万円）
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目 1 視覚と力覚を提示する仮想現実システムの構築
研究開発項目 1-1 力覚提示システムの開発（東京工業大学）
研究開発項目 1-2 視覚提示システムの開発（愛知工業大学）
研究開発項目 1-3 脳波計測のためのヘッドマウントディスプレイアダプタの開発（愛知工業大学）

- 研究開発項目 1-4 視覚・力覚提示システムの統合した仮想現実システムの開発（東京工業大学）
- 研究開発項目 1-5 仮想現実システムを用いた脳波・運動計測実験（東京工業大学）
- 研究開発項目 1-6 運動データの解析（東京工業大学）
- 研究開発項目 1-7 仮想現実システムと現実空間の運動と脳波データの統計比較（東京都市大学）

研究開発項目2 ジャグリングの運動スキル構成要素の定量化と関連する脳活動を抽出するための脳波解析手法の開発

- 研究開発項目 2-1 ボール軌道のオンライントラッキングシステムの開発（東京工業大学）
- 研究開発項目 2-2 液晶シャッターメガネを用いた視覚遮断システムの開発（愛知工業大学）
- 研究開発項目 2-3 運動スキル構成の定量化（東京工業大学）
- 研究開発項目 2-4 運動と脳活動データの相関解析（東京都市大学）

研究開発項目3 視覚・力覚仮想現実空間を利用したスローテンポジャグリングトレーニングの効果の検証とスキル獲得の脳内メカニズムのモデル化

- 研究開発項目 3-1 スローテンポトレーニングの実施と脳波・運動計測実験の実施（東京工業大学）
- 研究開発項目 3-2 スローテンポトレーニングによる運動スキル構成三要素への効果検証（東京工業大学）
- 研究開発項目 3-3 運動スキル構成三要素と関連する脳活動抽出（東京工業大学）
- 研究開発項目 3-4 運動スキル獲得の計算論的学習モデルの構築（東京都市大学）
- 研究開発項目 3-5 運動スキル獲得の計算論的学習モデルの評価（東京工業大学）

(6) 特許出願、外部発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	1	0
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	2	0
	その他研究発表	16	3
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	3	1
	受賞・表彰	1	0

(7) 具体的な実施内容と最終成果

研究開発項目1：視覚と力覚を提示する仮想現実システムの構築

- 1-1. 仮想現実空間に存在するボールの荷重や慣性力を擬似的に加えられる力覚提示装置、及び制御用プログラムを開発した。
- 1-2. 仮想現実空間を移動するボールとユーザーの両手の映像をヘッドマウントディスプレイにより視覚提示するプログラムを開発した。
- 1-3. ヘッドマウントディスプレイ装着による脳波計測へのアーチファクトを抑えるためのアダプタ機構や脳波電極ケーブルの揺れを低減するためヘッドマウントディスプレイ固定用クリップを開発し、脳波の特徴が安定して観測できることを評価実験により示した。
- 1-4. 力覚提示システム（研究開発項目1-1）と視覚提示システム（研究開発項目1-2）を統合し、仮想空間内で複数のボールを用いたジャグリングが行えるシステム（VR ジャグリングシステム）を開発した。
- 1-5. 仮想現実システム（研究開発項目1-4）を用いたトレーニングにより、現実空間におけるジャグリングのパフォーマンスが向上することが観測できた。

- 1-6. 現実空間でのジャグリング実行時のビデオデータからボールの三次元位置をトラッキングする解析プログラムを開発し、個人ごとのジャグリングの特徴をボールのトラッキングデータから観測できることを確認した。
- 1-7. 仮想現実空間でのジャグリング中の投げ上げ動作と現実空間の動作との比較を行い仮想現実システムを評価を行なった。

研究開発項目2：ジャグリングの運動スキル構成要素の定量化と関連する脳活動を抽出するための脳波解析手法の開発

- 2-1. 現実空間でのジャグリング実行時のビデオデータからリアルタイムにボール軌道を解析するシステムを開発した。
- 2-2. リアルタイムにボール軌道を解析するシステム（研究開発項目2-1）を用いて、ジャグリング中に液晶シャッターメガネによる視覚遮断を行うシステムを開発した。
- 2-3. 正確にボールを投げる能力、ボールの動きを予測する能力、ボールや腕の時空間的協調関係を調節する能力の3つを定量化するための実験パラダイムを構築し、ジャグリング上級者を対象に実験を実施した。
- 2-4. ジャグリング上級者の脳波信号データからジャグリング周期運動と連動する脳活動の特徴を抽出できることを確認した。また、ジャグリング上級者と初心者の脳MRI データ比較を実施した。

研究開発項目3：視覚・力覚仮想現実空間を利用したスローテンポジャグリングトレーニングの効果の検証とスキル獲得の脳内メカニズムのモデル化

- 3-1. 仮想現実システムを用いて現実空間よりもボールがゆっくりと動く環境でジャグリングトレーニング（スローテンポトレーニング）を行う実験を、ジャグリング未経験者12名に対し各自10日間で実施した。
- 3-2. 仮想現実システムを用いた実験（研究開発項目3-1）で得られたデータ解析により、スローテンポトレーニングにより、ジャグリングの総合的なスキルが向上することが確認された。
- 3-3. ジャグリング中の脳波信号データから腕の運動と連動する可能性がある脳活動の特徴を抽出することに成功し、ジャグリングの上達度に応じてその特徴が上級者の特徴と近づくことを確認した。
- 3-4. ボール運動の予測に関係する可能性がある脳活動の特徴を抽出した。
- 3-5. 実験データの解析と学習モデルの構築の遅れのため実施できていない状況となっている。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

今後の計画：データ数が予定していた実験参加者数に達していないため、今後もデータ計測及び未解析データの解析を継続していき論文発表を行う計画である。また、本研究で構築した実験系や解析方法は施設の外部への貸し出しなども含めて検討していく。さらに、本研究で特許出願した脳波電極固定アダプタをベースとしてさらに研究開発を進めるとともに、容易かつ低コストで実現可能なため、脳波計メーカーなどの企業等への技術移転について検討を進める計画である。また、VRジャグリングトレーニング装置については、ハードウェアは既に従事していた研究員が技術顧問を務める会社にて販売しており、ソフトウェアについては今後産業応用を検討する。

今後の展望：本研究課題の成果に関する論文化が終了し、学術や一般社会への発表が一通り終了していると予想される。本研究で確立した手法を他の運動にも応用可能かどうかの検証も進んでいることが想定され、新たな運動スキルの獲得に伴う脳の変化モデルの一般化検証も高い精度で行えることが見込まれる。これが検証でき、一般性が見込まれば、脳の運動学習に関する理解の発展に貢献できるほか、VRジャグリングシステムの高齢者やリハビリ患者に向けた展開ができる可能性がある。また、人材育成については、本研究課題に参画している1名の学生は博士号を取得済みの予定である。本研究課題で身につけたスキルはヒトを対象とした脳の運動学習に関する幅広いものであるため、ポスドクとして活躍の幅を広げていることが想定される。

(9) 外国の実施機関

University of California, San Diego (アメリカ合衆国)