

令和 7 年 6 月 12 日現在

機関番号：32414

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2024

課題番号：19K12186

研究課題名(和文)ヘッドマウントディスプレイとバーチャルリアリティを用いた運動学習の研究課題の開発

研究課題名(英文) Development of an experimental system for motor learning using virtual reality technology

研究代表者

尾崎 繁(OZAKI, Shigeru)

目白大学・保健医療学部・教授

研究者番号：60292546

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：プリズム適応の実験システムをヘッドマウントディスプレイ(HMD)とバーチャルリアリティ(VR)技術を組合せて開発した。以下の～の仕様のプロトタイプシステムを構築した。次に分担研究者(追加承認)との共同で～の仕様のVR機材を開発し、VR空間でプリズム適応を誘発した。プリズムを使わない視界シフト、シフトの方向と大きさを可変、視界遮断映像効果の付加、VR空間的的当て、ハンドコントローラの運動検出、様々な条件で運動学習を誘導。コロナ禍に発した影響で研究計画全体の達成度は約60%に留まったため、研究を継続して成果を生む。脳科学の啓発に向けた開発機材の一般体験会は来場者の好評を博した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
失敗を繰り返しながら運動の誤差を修正していく教師あり運動学習の実験システムをバーチャルリアリティ(VR)技術を活用して開発した。球を的に投げ当てる運動をVR空間に再現し、ハンドコントローラを介した腕の動きから球の軌道をヘッドマウントディスプレイ(HMD)に投影した。VR空間で球の軌道を実験的に水平シフトさせることで教師あり運動学習を誘発できた。この成果は小脳の学習機能を学ぶ教育の効果向上と一般啓発に資するとともに、運動学習の小脳内部モデル機構の解明とその臨床応用に向けた研究基盤を提供できる。

研究成果の概要(英文)：A system to study prism adaptation (PA) has been developed in combination of HMD and VR techniques. A prototype to induce PA has specifications of 1, 2 and 3, described below. A VR system has specifications of 4, 5 and 6 and the VR world evoked PA in subjects. Spec. 1: gaze shift by using a web camera, 2: variable shift control, 3: digital visual effect of blackout, 4: VR darts game, 5: detection of arm movement by a hand controller, 6: various condition settings for PA induction
The research plan was affected by corona disaster and near 60% of the goal was merely achieved, so that continuing research should be needed to produce fruits. The devices developed in our study have gained favorable reviews from public events participants and may enhance promotion of brain sciences.

研究分野：感性脳科学

キーワード：プリズム適応 運動学習 VR空間

1. 研究開始当初の背景

スポーツのように、できない運動を練習によってできるようにするためには“失敗に学びながら覚える”ことが重要である。例えば、視覚目標に向かって手を伸ばす運動(到達運動)は、ガラスプリズムを用いて視野を水平方向にずらすと、初めは虚像に手を伸ばすので目標との間に誤差が生じるが、この誤差は運動を繰り返すと減少する(プリズム適応)。次にプリズムをはずして到達運動を行うと、当初は逆方向の誤差が生じ(後効果)、再び回復する。この過程は脳の可塑性による「運動学習」で説明される。

ボールを標的に投げ当てる運動(的当てゲーム)の場合、投げたボールの軌道はもはや修正できない。しかし、手の到達運動は運動中の視覚性フィードバックで(無意識に)修正できる。そこでKitazawaら(1995)は到達運動中の視覚性フィードバックを液晶シャッターで遮る工夫を施したうえで、プリズム適応の運動機構を解析した。こうして詳細に観察した運動の変化から、以下の3つの原理を明らかにした。① 学習効果は運動回数に依存、② 運動学習は左右の手で独立、③ 同側の速い到達運動と遅い到達運動の学習は独立。また、小脳疾患者を研究対象としたダーツ投げによる研究から、プリズム適応には小脳が重要な役割を演じていることが明らかとなっている(Martin et al. 1996a)。

本研究者は先行研究を参考に、プリズム適応による“運動学習の仕組み”を考える学生実習課題を開発し、生理学教育に取り入れてきた。視界遮断効果のない簡易システムであるが、運動中の修正をしないよう被験者に意識づけることで先行研究と類似の運動学習効果を再現できる。しかしながら、先行研究に比して、誤差がなくなるまでの運動回数は1/3程度となるので、視覚性フィードバック修正の影響を排除することはできない。また近年の学生実習では、プリズム適応は誘発するが後効果のない例やプリズム適応自体がほとんどない例が散見されるようになり、運動中に違和感も感じない学生が増えていた。生活様式(例:スマホ使用)の影響等は不明であるが、これらの原因を運動の視覚性フィードバックおよび内部モデルの構築と選択の脳機能の視点から精査することは、実習の教育効果向上のみならず、運動学習の神経機構の解明に貢献し得ると考えた。そこから運動中の視界遮断機能に加え、様々な実験条件下で運動学習を誘発する拡張性の高いシステムの必要性を見出し、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)とバーチャルリアリティ(VR)を用いた運動学習の実習(研究)システムを開発することの提案に至った。

2. 研究の目的

プリズム適応を題材とした運動学習の可塑的機能を探求する効果的研究教育システムの開発が目的である。生理学実習の多くは被験者、機器操作者、記録者等の役割分担をするので、班員全員が課題全般に関わることは少ない。しかし、本研究者の“プリズムメガネ”を用いた実習(前述)では、(i) 実験操作手順が単純、(ii) 全員を被験者にしたデータの比較、(iii) 班独自の実験の立案と検証、(iv) 日常行動に密接した考察の4条件を満たすので、体育・スポーツ、医学医療、心理学等の幅広い分野の教育と啓発に役立つ。本研究は、プリズム適応の誘発にHMDとVRを活用する新規システムを構築することで、脳科学の教育・啓発効果と研究展開の両者の促進を図る。すなわち、HMDとVRを組合せ、次の仕様を備えた独自システムを開発する。① ガラスプリズムを使わない視界シフト、② シフトの方向と大きさを可変、③ 視界遮断等の映像効果、④ ハンドコントローラによる運動の検出、⑤ 標的へのボール投げ当てVR、⑥ VRの様々な実験条件下で運動学習を誘導。開発したシステムの仕様およびソフトウェアの公開により、脳の学習機能の教育や科学啓発から基礎研究の推進、臨床応用に至る幅広い貢献が期待される。

3. 研究の方法

1) プロトタイプシステムの開発(図1): ガラスプリズムを使用したプリズム適応の実習課題を基盤として、Kitazawaら(1995)の研究と同じ原理からなるプロトタイプシステムを構築した。ガラスプリズムは使用せず、HMD(スマートグラス、EPSON BT-30E)前面に取り付けるWebカメラ(logicool C525n)の映像を制御PCを介してHMDに投影した。到達運動の起点となる手元スイッチ(自作)と標的を映すタッチパネルモニタ(Philips 222B)を連動させ、起点からモニタまでの手の動きをゲーム開発用ソフトウェアUnityによる映像処理で遮断(暗転)した。被験者は、指先を起点に置いて標的を目視し、指先がタッチパネルに触れた時に標的との誤差を確認することになる。指でタッチパネルに触れた位置の座標を記録し、運動回数と標的からの誤差を解析した。

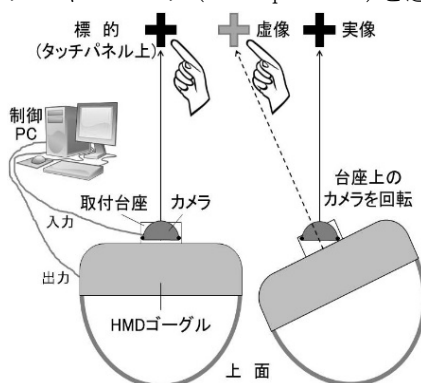


図1. プロトタイプの模式図
HMDゴーグルに取り付けたカメラの映像をPCで制御し、HMDに出力。タッチパネル上の標的への腕到達運動(入力座標)を記録。運動中の視界を映像処理で遮断し、視覚性の修正を防ぐ。右:カメラを回転させて視野を水平方向にずらし、プリズム適応を誘発。

2) HMD と VR を用いたプリズム適応観察システム(以下、HMD-VR システム)の開発： VR 空間内に標的を設置した。この標的の中心に向かってボールを投げ当てるゲーム風のソフトウェアを Unity で開発し、ハンドコントローラ付 VR ヘッドセット (Meta Quest 2) に実装した。標的が配置されている垂直平面に対して、標的中心を原点とする XY 座標 (ボール到達点) を設定した。投球時刻、投球する手 (右・左)、視界シフトの有無、ボール到達座標のデータ (csv ファイル) を記録し、クラウドストレージ (Dropbox) に保存した。

4. 研究成果

1) プロトタイプシステムの開発： 構築したシステムを使用し (図 2)、プリズム適応の誘発を試みた。HMD ゴーグル (スマートグラス) 前面に取り付けたカメラを水平方向に回転させると、ガラスプリズムで視界をシフトさせるのと同じ効果が得られる。したがって、被験者は当初、正面に見える標的の虚像に向かって腕を伸ばすことになる (図 1)。このカメラを介して外界を HMD ゴーグルで観察すると、実物は若干小さく、遠くに見えるが、タッチパネルスクリーンの標的は容易に判別できた。対照条件では、起点から正面にある標的に向かって腕を伸ばして指先で触れ、起点に戻す往復運動を繰り返す。普段の到達運動とは視界が異なるので、最初に被験者は練習を行った。カメラの右方向回転により視界を左シフトさせ、実験条件とした。図 3 のグラフの横軸は試行 (投球) 回数、縦軸は標的からの水平方向の誤差 (右が正、左が負：以下同様) を表す。

到達運動中の視界が確保されているとき (図 3 上段)、対照条件では試行 1 回から指先は標的をほぼ捉えたが、視界を左シフトすると (実験条件)、標的の左に腕を伸ばし、運動を繰り返しながら誤差を小さくしていった。対照条件に戻すと標的右に腕を伸ばす“後効果”が観察された後、到達運動は修正された。この過程は研究代表者のガラスプリズムを使った実習で観察されるプリズム適応と同様の現象であった。

起点からモニタまでの手の動きを視界から遮断してもプリズム適応とその“後効果”が誘発された (図 3 下段)。しかし、視界シフトによって運動に誤差が生じてから修正されるまでの試行回数は、視界を遮断しない場合よりも多かった。したがって通常の視界の到達運動では、視覚性フィードバックがプリズム適応に影響していることが示唆された。視界遮断をしない到達運動ではプリズム適応が誘発されない (されにくい) 被験者のデータを収集し、視覚性フィードバックの影響について詳しく調べる必要がある。

このシステムを用いた実習課題の利点は、標的への腕の到達運動という容易かつ日常的な動きによってプリズム適応を体験でき、フィードフォワード制御に基づく運動学習とフィードバック制御による運動調節の包括的な理解の深化を促せることである。ガラスプリズムを装着した眼鏡を使わないので、ガラス破損による実習 (実験) 中の事故等の防止にも役立つ。

2) HMD-VR システムの開発： このシステムでは被験者がハンドコントローラを操作し、標的にボールを投げ当てる運動 (投球運動) を VR 空間で再現した (図 4)。ハンドコントローラのトリガを引くとボールを握った状態となり、腕を振りながらトリガを放すとボールは手を離れ、投げ放たれる。ボールは VR 空間内を物理軌道を辿って飛んでいく。被験者が見ている VR 空間内の様子は外部モニタとのミラーリングで観察できる。

対照条件では、被験者は正面に標的の中心を狙ってボールを投げる。実際には現実空間の投球動作やボールの飛び方と異なるので、被験者は最初に VR 空間で新しい投球運動を学習する必要がある。実験条件では、実験者が外部操作によって標的位置とボール軌道のパラメータを水平方向左に変更する。被験者がこの標的中心に向かって投球すると、ボールは左方向に外れる。これは、ガラスプリズムや上記プロトタイプで視界を水平シフトさせる効果と同等の効果を生むことになる (図 1 参照)。さらに、腕の到達運動の実験では視覚性フィードバックを排除するための視界遮断効果を追加したが、投球運動ではその必要がない (投球後のボール軌道は修正できない) という利点がある。

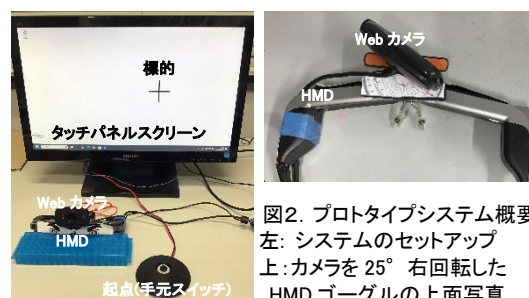


図2. プロトタイプシステム概要
左: システムのセットアップ
上: カメラを 25° 右回転した HMD ゴーグルの上面写真

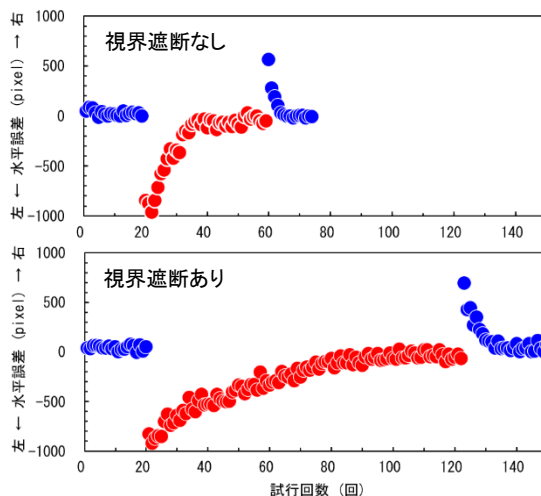


図3. プロトタイプシステムで誘発されたプリズム適応
●: 対照条件 ●: 実験条件



図4. HMD-VR システム概要
上: HMD-VR システムの実験風景
下: VR 空間の丸い標的が外部モニタに映っている

HMD-VR システムでプリズム適応が誘発されるかを確認した。被験者は VR 空間の投球を練習した。被験者の利き手の投球の結果を図 5 に示す。対照条件では、ほぼ標的中心にボールを投げ当てていたが、左にシフトした実験条件の当初は、左方向にボールを外した。その後誤差は徐々に小さくなり、標的中心に投球できるようになった。しかし、対照条件に戻すと右方向にボールを外す“後効果”が観察され、その後再び投球は修正されていった。この過程はプリズム適応による運動学習で説明できる。

次に、運動学習の特徴を示す“両側性転移”の有無を調べた(図 6)。対照条件で被験者は、左手(非利き手)で投球をした後、右手(利き手)に変えて投球を続けた。この間、ボールは標的中心付近に当たっていた。実験条件にして右手の投球をすると左方向にボールを外した後、誤差を小さくしていった(プリズム適応)。再び対照条件に戻すと、左手では標的中心付近に投球できたのに対して、右手で投げると右方向に外す“後効果”が観察された。この結果は右手の学習は左手に転移しないという小脳の運動学習の特徴を HMD-VR システムで再現できることを示している。

さらに、異なる様式の運動の“片側性転移”の有無を利き手を使って調べた(図 7)。対照条件で被験者は下手投げ(アンダースロー)で投球をした後、上手投げ(オーバースロー)で投球をした。この間、ボールは標的中心付近に当たっていた。実験条件にして上手投げをすると左方向にボールを外した後、誤差を小さくしていった(プリズム適応)。対照条件に戻すと、下手投げでは標的を捉えることができたが、上手投げに変えると右方向に外す“後効果”が観察された。この結果は利き手を使った片側性の投球運動であっても、異なる投球様式の学習は転移しないことを示している。

本研究で開発した HMD-VR システムは、先行研究が明らかにした小脳の運動学習の様々な特徴(Kitazawa, et al. 1995, Martin et al. 1996a, 1996b)の誘発と観察に活用できることがわかった。

本研究はヘッドマウントディスプレイ(HMD)とバーチャルリアリティ(VR)技術を組合せて、プリズム適応の誘発と解析に適した実習(研究)システムを開発することにより、脳の学習機構の理解を促す研究教育への展開を目的として立案、実施した。まず、プリズム適応を腕の到達運動によって誘発するプロトタイプシステムを開発し、このシステムの有効性と視覚性フィードバックがプリズム適応に及ぼす影響を検証する計画を立てた。このシステム自体は計画に沿って実装まで至った。しかし COVID-19 による被験者実験実施への影響等により、定量的解析に十分なデータの収集に至らず、研究計画は大きく遅れてしまった。そこで、分担研究者(2023 年度追加承認)を加え、プリズム適応の HMD-VR システム開発を開始し、ハンドコントローラ付 VR ヘッドセットへの実装を完了した。HMD-VR システムで誘発したプリズム適応において、小脳の運動学習の特徴を確認することができたが、それぞれの定量的解析はできていない。これらシステムを活用した研究を継続し、プリズム適応に及ぼす視覚性フィードバックの影響や内部モデルの構築と選択について精査していきたい。

一方、今回開発した HMD-VR システムは学生実習を含めた生理学教育と脳科学の一般啓発の促進に極めて有効と考えられる。まず、このシステムの生理学実習への活用については「2. 研究の目的」の(i)から(iv)の条件を高く満たしている。投球運動の制限は小さいので、学生が独自に立案した様々な条件の実験を自分たちで考えて実行できる。例えば、右手と左手の運動学習(図 6)や上手投げと下手投げの運動学習(図 7)に加えて試行回数と後効果の大きさの関係を探る等、運動学習の原理を楽しく探求できるだろう。また、最近のワイヤレスオールインワン VR ヘッドセットは数万円程度で購入できるので、旧来のプリズムメガネを用いた実習より安価に導入可能であり教育機関の負担は大きくない。また、ガラスプリズムの破損等による事故の危険性も軽減される。

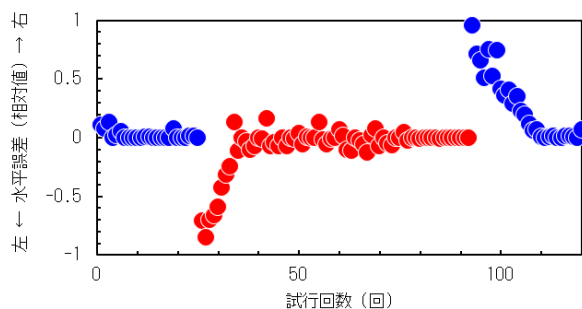


図5. HMD-VR システムで誘発されたプリズム適応
●: 対照条件 ●: 実験条件

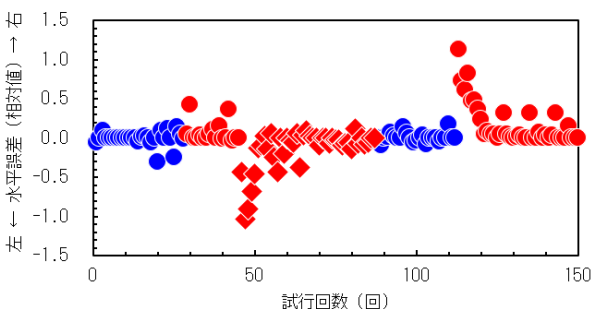


図6. 右手と左手で投球した時のプリズム適応
●: 対照条件左手 ●: 対照条件右手 ◆: 実験条件右手

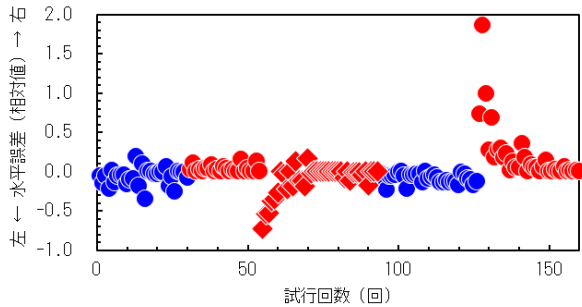


図7. 投球動作を変えた時のプリズム適応
●: 対照条件下手投げ ●: 対照条件上手投げ
◆: 実験条件上手投げ

研究代表者は従来より公的地域イベントや所属機関の行事等でプリズム適応を活用した運動学習の体験コーナーを開催してきた。今回開発した HMD-VR システムは、「つくばメディアアートフェスティバル 2023」で展示し、来場者の好評を博した。また所属機関オープンキャンパスの複数回で体験コーナーを実施した。参加した高校生に Web アンケートを実施したところ、回答数 (n = 7) は少なかったが、VR 空間における運動学習の体験と脳の学習機構への興味について好評価を得た (図 8)。このシステムは小型、簡便かつゲーム性が高いので、様々な行事における脳科学の啓発活動に貢献することができる。

プリズム適応は小脳疾患患者に誘発されないことが報告されている (Martin et al. 1996a)。この学習の基盤である小脳の教師あり学習は随意運動の制御に重要な役割を担っている。近年、運動学習の様々な知見がリハビリテーション分野に積極的に取り入れられており、理学療法や作業療法への VR 技術の導入も進んでいる。例えば、前庭系疾患に対するリハビリテーションや検査等に役立てるための改良を本研究の HMD-VR システムに加えていき、医療分野との協働を目指していく。さらに、本研究の共同研究の成果を健康福祉支援ツールの開発へと繋げたい。

理学療法学科体験コーナー「仮想現実(VR)空間での運動学習の体験」の感想をお教えてください。

7件の回答

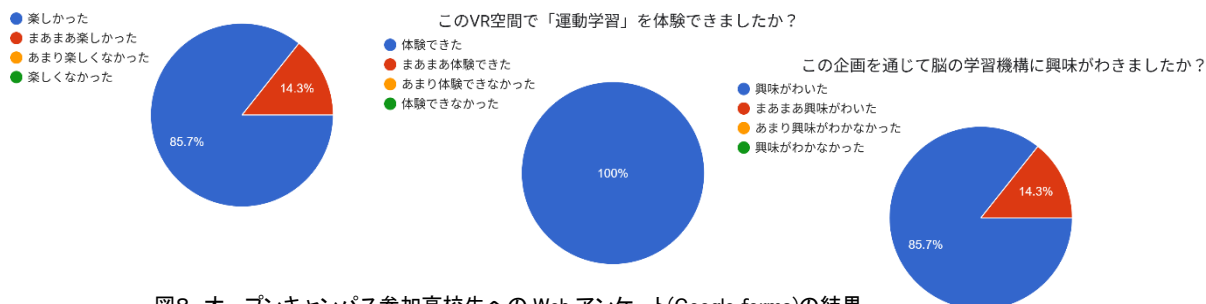


図8. オープンキャンパス参加高校生への Web アンケート(Google forms)の結果

参考文献

- S. Kitazawa, et al. (1995) Effects of delayed visual information on the rate and amount of prism adaptation in the human. *J. Neurosci.* 75(11): 7644-7652.
- T.A. Martin, et al. (1996a) Throwing while looking through prisms: I. Focal olivocerebellar lesions impair adaptation. *Brain*: 119(4) 1183-1198.
- T.A. Martin, et al. (1996b) Throwing while looking through prisms: II. Specificity and storage of multiple gaze-throw calibrations. *Brain*: 119(4) 1199-1211.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 尾崎 繁
2. 発表標題 感性脳科学による健康科学へのアプローチ
3. 学会等名 第25回日本感性工学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 勝部 里菜、内山 俊朗
2. 発表標題 センサリアルームのデザインにおける感性脳科学的アプローチ
3. 学会等名 第25回日本感性工学会大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伏木宏彰、尾崎 繁
2. 発表標題 難治性めまい患者に対する感性前庭ニューロリハビリテーションの試み
3. 学会等名 第21回日本感性工学会大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

第6回つくばメディアアートフェスティバル2023 図録
https://www.tsukuba-artchannel.jp/data/doc/1699946623_doc_7_0.pdf

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
研究分担者	内山 俊朗 (UCHIYAMA Toshiaki) (50334058)	筑波大学・芸術系・准教授 (12102)	
研究分担者	勝部 里菜 (KATSUBE Rina) (60937689)	筑波大学・芸術系・特任研究員 (12102)	

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
---------	---------