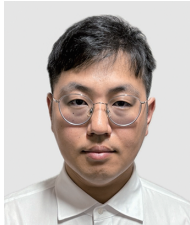


[研究助成 (C)]

大脳駆動型および小脳駆動型運動学習における VR から実環境への運動学習転移

2237006



研究代表者
(助成金受領者)

大分大学 大学院医学系研究科 博士後期課程

竹 尾 雄 飛

共同研究者

大分大学福祉健康科学部
理学療法コース

准教授

菅 田 陽 怜

埼玉大学大学院理工学研究科

教授

原 正 之

[研究の目的]

仮想環境 (VE) は、「その場に実際に存在している」という感覚をユーザーに与えることで、現実環境 (RE) に近い心理的体験を生み出すことができる¹。VE は適用性と拡張性から、脳卒中後片麻痺患者の運動機能の改善など、リハビリテーションにおける新たな治療アプローチとして期待されている。先行研究では、VE における運動学習の促進が報告されている²。一方で、VE と RE 間における運動学習の転移について、RE から VE への転移、VE から RE への転移、あるいは転移が認められないなど、転移の方向性や有無に関して未だ統一した見解は得られていない^{3,5}。我々はこれまでに、VE と RE の間における系列運動学習の転移について検討した。その結果、RE で獲得した系列運動学習が VE へ転移することを明らかにした⁶。しかしながら、系列運動学習は運動学習の一形態に過ぎない。系列運動学習課題に加え、運動学習を評価する代表的な課題として感覚運動適応課題がある。系列運動学習課題では運動野、感覚運動野、小脳、被殻などが関与する一方、感覚運動適応課題では運動野、補足運動野、小脳などが関与することが報告されており⁷、両課題ではそれぞれ異なる神経基盤によって支えられる課題特異的な学習過程を伴う可能性が示唆されている。

以上を踏まえ、本研究では、VE と RE の間における運動学習の転移は、関与する神経基盤の異なる課題の種類によって異なるという仮説を立て、感覚運動適応課題を用いて VE と RE の間で運動学習の転移が生じるかどうかを明らかにすることを目的とした。

[研究の内容、成果]

1. 対象

28 名の右利きの健常者が本研究に参加した。ヘルシンキ宣言に準拠し、実験内容を説明し、同意が得られた被験者にのみ実験を行った。なお、本研究は大分大学医学部倫理委員会で承認を受けたプロトコールにしたがって実施した。

2. 実験手順

参加者は、RE におけるレバー操作課題と、VE における腕到達課題の下記の 2 種類の感覚運動適応課題を行った。

i) RE における感覚運動適応課題 (図 1)

参加者は、レバー型コントローラー (Extreme 3D Pro Joystick, 株式会社ロジクール) を備えた机の前に座り、ターゲットおよびカーソルの動きが表示されたモニターを正面に見ながら課題を実施した。モニターには、円形の開始位置 (ベースポイント) が表示された。参加者がカーソルをベースポイントから 10 mm 以内の位置

に 1,000 ms 間保持すると、ベースポイントは消失し、ベースポイントを中心とする半円上に等間隔で配置された 3 つの円形ターゲットのうち 1 つが提示された。ターゲットの提示をもって試行開始とした。参加者には、2,500 ms 以内に、できるだけ速く、かつ最短軌道でカーソルをターゲットまで移動させるよう指示した。カーソルがターゲットに到達するまでを 1 試行とし、各 Block は 10 試行で構成した。Block1-5 では、カーソルの移動方向は手の移動方向と一致していた。一方、Block6-10 では、参加者に気付かれないように、カーソルの移動方向を手の移動方向に対して反時計回りに 30° 回転させた。

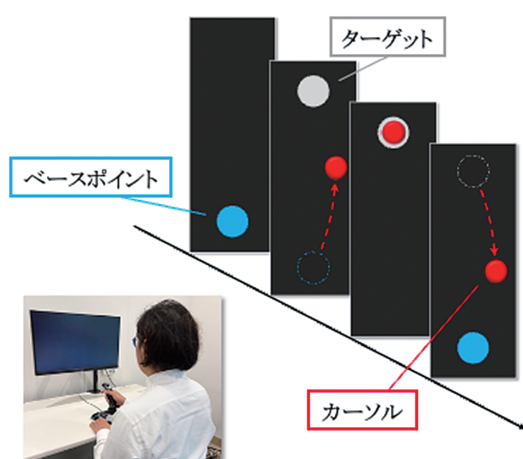


図1 REにおける感覚運動適応課題の概要

ii) VEにおける感覚運動適応課題（図2）

参加者はヘッドマウントディスプレイ (Oculus Quest 2, Oculus) を装着し、あらかじめ設定された位置に椅子に座った。この位置は、最小限の腕の動きですべてのターゲットおよびベースポイントに到達できるように調整した。VEはUnity (Unity 2018.3.3f1, Unity Technologies) を用いて構築した。参加者が仮想右手をベース半球内に 1,000 ms 間保持すると実験試行が開始され、ベースポイントが消失した。ベースポイントが消失すると、ベースポイントを中心とする半円上に等間隔で配置された 3 つの円形ターゲットのうち 1 つが提示された。参加者に

は、実際の右手位置と重なるように表示された仮想右手を、指定されたターゲットに向かって、できるだけ速く、かつ正確に到達させるよう指示した。ターゲットに到達すると直ちにベースポイントが再表示され、参加者はそのベースポイントに触れることで次の試行を開始できた。REにおける感覚運動適応課題と同様に、VEにおける 1 試行は、運動開始から仮想右手がターゲットに到達するまでの期間と定義し、各 Block は 10 試行で構成した。Block1-5 では、仮想右手の視覚フィードバックは参加者の実際の手の動きと一致していた。

一方、Block6-10 では、参加者に気付かれないように、仮想右手の視覚フィードバックを実際の手の移動方向に対して反時計回りに 30° 回転させた。

参加者は、無作為に RE-VE 群または VE-RE 群のいずれかに割り付けられた。RE-VE 群は RE 課題を先に実施し、その後 VE 課題を実施した。一方、VE-RE 群は VE 課題を先に実施し、その後 RE 課題を実施した。すべての実験終了後、参加者にはバーチャルハンド錯覚 (Virtual Hand Illusion : VHI) 質問票への回答を求めた。

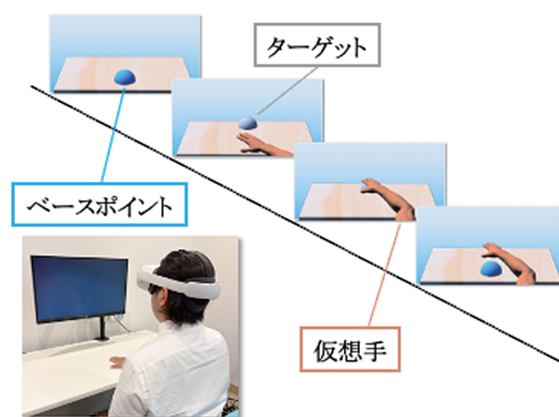


図2 VEにおける感覚運動適応課題の概要

VHI 質問指標

参加者が仮想右手を動かしている際の主観的体験は、Botvinick と Cohen (1998) が開発したオリジナルのラバーハンド錯覚 (Rubber Hand Illusion : RHI) 質問票に基づいて作成し

た質問票を用いて評価した⁸。参加者は、VHI 質問票に回答した。回答には、-3 から +3 までの 7 件法リッカート尺度を用いた。-3 は「設問の内容に全く同意しない」、+3 は「設問の内容に強く同意する」、0 は「どちらともいえない」を示した。錯覚に関連する項目では、実験中における仮想手に対する身体所有感 (Body Ownership : Q1) および運動主体感 (Sense of Agency : Q2) を評価した。一方、残りの項目 (Q3-Q6) は VHI とは直接関係のない内容であり、被暗示性を評価するための統制項目として設定した。被暗示性とは、質問項目の内容に関わらず、参加者がすべての質問に対して類似した評価を行う傾向を指す。

項目	質問内容	分類
Q1	仮想の手がまるで自分自身の手であるかのように感じた	身体所有感
Q2	仮想の手の動きが自分の手の動きと一致した	運動主体感
Q3	手が大きくなっているように感じた	統制
Q4	自分の手を感じるができなかった	
Q5	自分の手がまるで仮想化していると感じた	
Q6	自分の手がまるで移動しているかのように感じた	

3. 解析

3.1 運動学習能力の評価

ベースポイントからターゲット位置までを結ぶ直線と、外向き速度が最大となった時点 (最大速度座標) における運動方向を示す直線とのなす角度を方向誤差と定義し、各 Block における平均方向誤差を算出した (図 3)⁹。さらに、Block1-5 の平均方向誤差をベースラインと定義し、各 Block における方向誤差からベースラインを差し引いた値を算出し、解析に用いた。

3.2 統計解析

統計解析には、MATLAB (R2021b) および JASP (version 0.97.1) を使用した。まず、方向誤差に対する時間 (Block6-10) および課題実施順序 (RE-VE 群 vs. VE-RE 群) の影響を

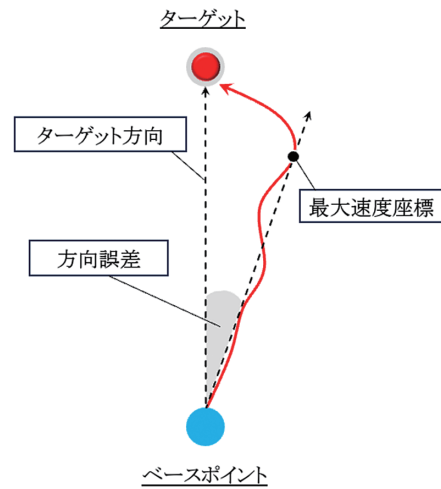


図3 運動学習能力の算出方法

検討するため、二元配置反復測定分散分析を実施した。球面性の仮定が満たされなかった場合には、自由度に対して Greenhouse-Geisser 補正を適用した。有意な主効果または交互作用が認められた場合には、事後検定を実施し、交互作用の詳細について検討した。次に、VHI 質問票の各質問項目 (Q1-6) の評定値について、RE-VE 群と VE-RE 群の間で Mann-Whitney の U 検定を用いて比較した。

4. 結果

4.1 RE 課題における運動学習能力の変化 (図 4)

時間 (Block) および課題実施順序 (RE-VE 群, VE-RE 群) を要因とした二元配置反復測定分散分析を行った結果、時間の主効果が有意であった ($F(4,26) = 23.925, p < 0.001, \eta^2 p = 0.479$)。一方、課題実施順序の主効果 ($F(1,26) = 2.601, p = 0.119, \eta^2 p = 0.091$) および時間 $\times$ 課題実施順序の交互作用 ($F(4,26) = 1.310, p = 0.271, \eta^2 p = 0.048$) は有意ではなかった。

4.2 VE 課題における運動学習能力の変化 (図 5)

時間 (Block) および課題実施順序 (RE-VE 群, VE-RE 群) を要因とした二元配置反復測定分散分析を行った結果、時間の主効果 ($F(4,26) = 15.006, p < 0.001, \eta^2 p = 0.366$) および時間 $\times$ 課題実施順序の交互作用 ($F(4,26) = 3.066, p = 0.036, \eta^2 p = 0.105$) が有意であった。一方、課

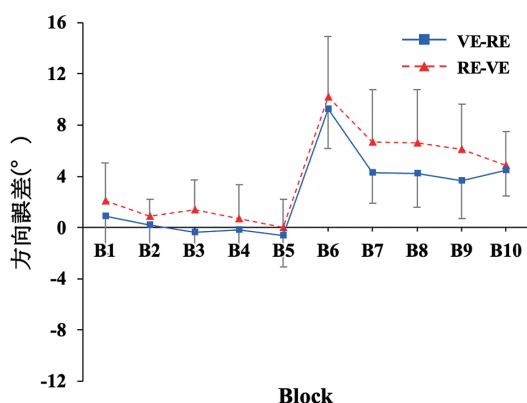


図4 RE 課題における各ブロックの平均方向誤差

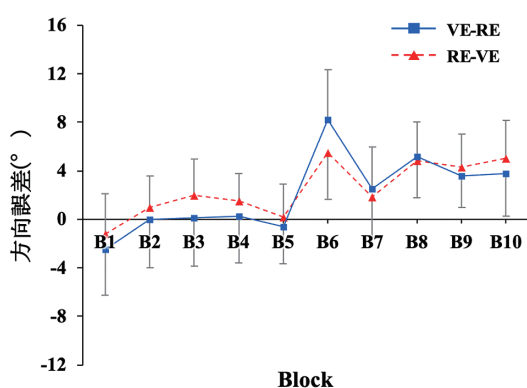


図5 VE 課題における各ブロックの平均方向誤差

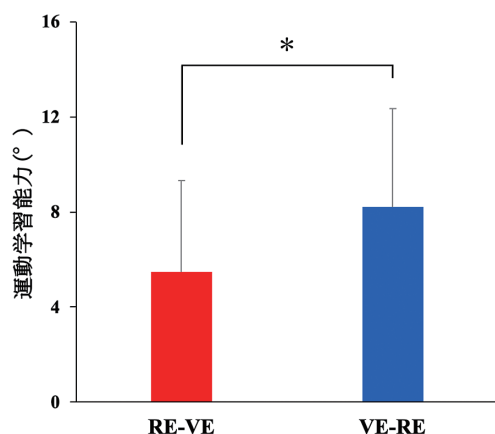


図6 VE 課題におけるブロック6の平均方向誤差

題実施順序の主効果は有意ではなかった ($F(1,26) = 0.115, p = 0.737, \eta^2 p = 0.004$)。有意な時間×課題実施順序の交互作用についてさらに検討するため、各 Block ごとに Student-t 検定による事後解析を行った。その結果、RE-VE 群と VE-RE 群の間に有意差を認めたのは、Block6 ($t(26) = 2.502, p = 0.019$) であった (図6)。

4.3 VHI 質問票

Mann-Whitney の U 検定を用いて VHI 質問票の各項目を比較した結果、VE-RE 群と RE-VE 群との間に有意な差は認められなかった(Q1: $U = 98.50, p = 1.00$, Q2: $U = 92.00, p = 0.786$, Q3: $U = 84.50, p = 0.541$, Q4: $U = 107.5, p = 0.671$, Q5: $U = 125.0, p = 0.208$, Q6: $U = 116.0, p = 0.403$) (図7)。

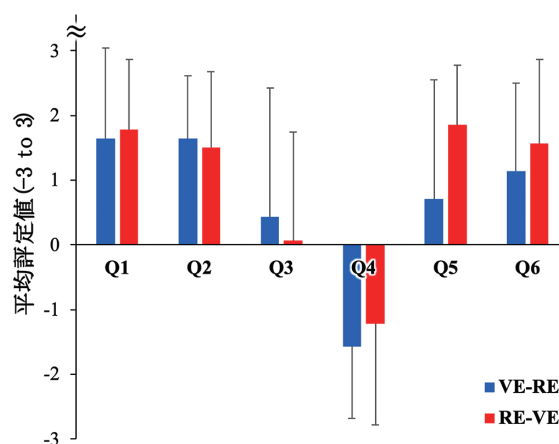


図7 VHI 質問票における各項目の平均評定値

5. 考察

本研究では、感覚運動適応における VE と RE の間での運動学習の転移について検討した。その結果、RE から VE への運動学習の転移は認められた一方で、VE から RE への転移は認められず、学習転移には非対称性が存在することが明らかとなった。

これまでの感覚運動適応に関する研究では、学習量は運動誤差の大きさに比例し、その誤差が内部モデルの更新を直接促進すると考えられてきた^{10,11}。しかし、感覚運動適応における学習は誤差の大きさだけではなく、その誤差の性質にも依存し、非線形な特性を示すことが報告されている¹²。例えば、視覚フィードバックの不確実性が高い場合 (すなわちターゲットの解像度が低い場合) には、不確実性が低い場合 (ターゲットの解像度が高い場合) と比較して、誤差に基づく内部モデルの更新は抑制されることが示されている¹³。VE では、RE と類似し

た心理的体験を誘発できる¹。しかし、Harrisらは、VEではREにおける運動制御に重要な視覚情報や体性感覚情報が十分に提供されないことを報告している^{14,15}。これらの知見から、本研究のRE条件では、運動制御に必要な視覚情報および体性感覚情報の不確実性が比較的小さく、その結果、誤差に基づく学習と内部モデルの更新が促進されたと考えられる。一方、VE条件では、複数の感覚情報間の不一致によって運動制御に必要な感覚情報の信頼性が低下し、その結果、内部モデルの更新が抑制された可能性がある。さらに、Herzfeldらは、誤差が一貫している環境では学習率が増加する一方で、誤差の一貫性が低い環境では学習率が低下することが示されている¹⁶。本研究において、RE実施後のVE条件で観察された非対称的な変化は、REで経験した安定した誤差によって一時的に誤差感受性が高まり、その効果がVE課題にも持ち越された結果である可能性が考えられる。

[参考文献]

- 1 Sanchez-Vives MV, Slater M. From presence to consciousness through virtual reality. *Nat Rev Neurosci*. 2005;6(4):332-9.
- 2 Sense F, van Rijn H. Probabilistic motor sequence learning in a virtual reality serial reaction time task. *PLoS One*. 2018;13(6):e0198759.
- 3 de Mello Monteiro CB, Massetti T, da Silva TD, van der Kamp J, de Abreu LC, Leone C, et al. Transfer of motor learning from virtual to natural environments in individuals with cerebral palsy. *Res Dev Disabil*. 2014;35(10):2430-7.
- 4 Quadrado VH, Silva TDD, Favero FM, Tonks J, Massetti T, Monteiro CBM. Motor learning from virtual reality to natural environments in individuals with Duchenne muscular dystrophy. *Disabil Rehabil Assist Technol*. 2019;14(1):12-20.
- 5 Juliano JM, Liew SL. Transfer of motor skill between virtual reality viewed using a head-mounted display and conventional screen environments. *J Neuroeng Rehabil*. 2020;17(1):48.
- 6 Takeo Y, Hara M, Shirakawa Y, Ikeda T, Sugata H. Sequential motor learning transfers from real to virtual environment. *J Neuroeng Rehabil*. 2021;18(1):107.
- 7 Debas K, Carrier J, Orban P, Barakat M, Lungu O, Vandewalle G, et al. Brain plasticity related to the consolidation of motor sequence learning and motor adaptation. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2010;107(41):17839-44.
- 8 Botvinick M, Cohen J. Rubber hands 'feel' touch that eyes see. *Nature*. 1998;391(6669):756.
- 9 Harada T, Hara M, Matsushita K, Kawakami K, Kawakami K, Anan M, et al. Off-line effects of alpha-frequency transcranial alternating current stimulation on a visuo-motor learning task. *Brain Behav*. 2020;10(9):e01754.
- 10 Thoroughman KA, Shadmehr R. Learning of action through adaptive combination of motor primitives. *Nature*. 2000;407(6805):742-7.
- 11 Scheidt RA, Dingwell JB, Mussa-Ivaldi FA. Learning to move amid uncertainty. *J Neurophysiol*. 2001;86(2):971-85.
- 12 Wei K, Körding K. Relevance of error: what drives motor adaptation? *J Neurophysiol*. 2009;101(2):655-64.
- 13 Izawa J, Shadmehr R. On-line processing of uncertain information in visuomotor control. *J Neurosci*. 2008;28(44):11360-8.
- 14 Harris DJ, Buckingham G, Wilson MR, Vine SJ. Virtually the same? How impaired sensory information in virtual reality may disrupt vision for action. *Exp Brain Res*. 2019;237(11):2761-6.
- 15 Berger CC, Gonzalez-Franco M, Ofek E, Hinckley K. The uncanny valley of haptics. *Sci Robot*. 2018;3(17):eaar701.
- 16 Herzfeld DJ, Vaswani PA, Marko MK, Shadmehr R. A memory of errors in sensorimotor learning. *Science*. 2014;345(6202):1349-53.

[成果の発表, 論文など]

1. 竹尾雄飛：視覚誤差課題を用いた仮想環境における運動学習と実環境における運動学習の転移、第28回日本基礎理学療法学会学術大会、2023年12月
2. Yuhi Takeo, Masayuki Hara, Yui Yasumoto, Hisato Sugata: Transfer of Sensorimotor Adaptation from Real to Virtual Environments. *Frontiers in Systems Neuroscience* (現在投稿中)