



脳卒中後の上肢麻痺に対するハンドリダイレクションを用いた VR 訓練法の提案

金谷崇文¹⁾, 中村拓人¹⁾, 松本啓吾¹⁾, 葛岡英明¹⁾

1) 東京大学 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {kanaya-nii, n.takuto, matsumoto, kuzuoka}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: 脳卒中後のリハビリテーションでは高い自己効力感を維持しながら訓練に取り組むことが重要とされている。本研究では、脳卒中後のリハビリテーションの 1 つであるリーチングタスクにおいて、ハンドリダイレクションを用いて実空間上ではターゲットに手が届いていなくてもバーチャル空間上では届いたように表示することで、患者の自己効力感を向上できるのではないかと仮説を立てた。健常者を対象とした実験を行い、タスクの達成が自己効力感を向上させることが認められたが、タスクが達成される条件間ではハンドリダイレクションの有無で有意な差が認められなかった。今後は実験手法の改良を行い、臨床現場における訓練効果を検証する予定である。

キーワード: リハビリテーション, 脳卒中, 自己効力感, ハンドリダイレクション

1. はじめに

日本の脳血管障害の患者数は 2017 年の厚生労働省の発表では約 111 万人である。医療の発展に伴い死亡率は年々低下しているが、それによって生存者におけるリハビリテーション治療の需要は益々高まっている。なかでも脳卒中患者はその 77% が上肢機能障害を有することが報告されており、そうした患者のリハビリテーションの効果を向上させるため、近年では脳の可塑性に働きかけて再学習を促すニューロリハビリテーションの研究が盛んに行われている。しかし、それらのリハビリテーションでは、単調な動作を繰り返すことを患者に要求するため、患者がリハビリテーションに対する動機づけを維持できないという問題が生じる。

そこで筆者らは、バーチャルリアリティ (VR) におけるハンドリダイレクション (HR) という技術を利用して、患者にとって困難な動作であっても、VR 空間内ではあたかも成功しているかのように見せ、これによって自分はその動作を実行することができるという自信 (自己効力感) を高めて、リハビリテーションの遂行に対する動機づけを維持させることができると考えた。本論文ではその予備的な研究として、健常者を対象とする実験を行い、提案手法の自己効力感に対する効果を検証した。

2. 関連研究

2.1 自己効力感

自己効力感とは、人の行動に関する重要な概念の一つとして注目されている。Bandura によれば、自己効力感 (self-efficacy) は「達成をもたらす一連の行動を計画し実行する能力に対する信念」と定義されており、個人が特定の課題を達成する際に自身の能力と可能性を認識していることを指す。この概念には、効力予期 (efficacy expectancy) と結果予期 (outcome expectancy) という 2 つの要素が関与している。効力予期とは、人の特定の行動における自身の能

力の認識であり、結果予期とは行動の結果に対する予期を意味する。効力予期と結果予期は、人の行動において密接に関連しており、両方の要素を実感することが行動変容をもたらすためには重要であると考えられている。

Jones ら [1] はシステムティックレビューにおいて脳卒中患者における臨床評価に対する自己効力感の影響を調査している。この研究では Quality of Life (QOL) や Activities of Daily Living (ADL)、精神状態や健康状態に加えて、ある程度の身体機能の改善に自己効力感が重要な要因であることを結論づけている。以上のようにリハビリテーションでは、自己効力感を向上させることが重要であることから、本研究においても自己効力感を向上させることを目的とする。

2.2 ハンドリダイレクション

HR とは VR 上で、ユーザにそれと気づかせずに、現実の手と異なる位置に VR 上の手 (バーチャルハンド) を視覚提示する手法である。これは人間の知覚において視覚が優位であることを利用して実現している。Azmadian らは、VR 空間でユーザがある点に向けて手を伸ばした時に、現実にはそれとは少しずれた点に向けて手を伸ばさしてしまう手法を提案したが、これはリーチ距離の増加を意図していない。一方 Zenner らはリーチ方向にゲインをかけ、リーチ距離や回転角を操作する手法を提案しているが、特定の点への到達を意図していない。そこで筆者らはリーチ方向に 2 つの点を配置し、手前の点に現実の手が到達した時にバーチャルハンドが遠くの点に到達することで特定のターゲットに向けたリーチ距離を伸ばす手法を考案した。

3. システム構成

本研究の提案手法について説明する。基本的な構成については先行研究として Subramanian ら [2] の手法を参考とした。タスクは VR 環境下で椅子に座って、前方の柵に表示されたターゲットにバーチャルハンドをリーチさせるこ

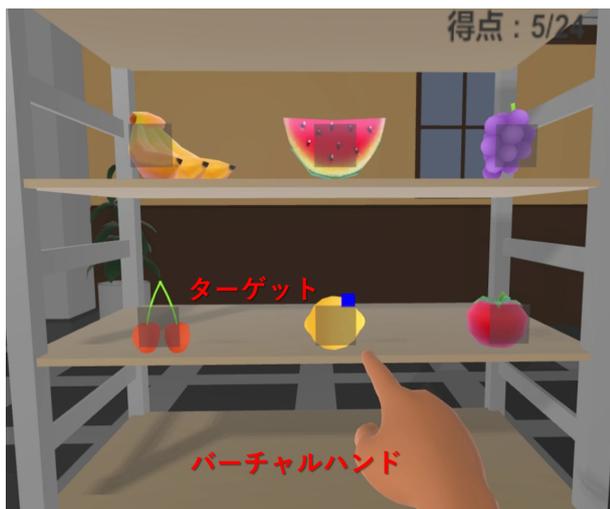


図 1: VR 上の環境

ととした。バーチャルハンドは麻痺側（本実験では右手）のみ表示させている。棚には6つのターゲットが表示されており、ターゲットの前方には6cm四方の枠が表示されている（図1）。棚の高さは参加者の肩の高さを基準としており、枠は20cm間隔で配置されている。ターゲットが点滅することでリーチを行う対象が示され、枠の中心から左右および手前に4cmの範囲にバーチャルハンドの示指の指尖が触れることをタスクの達成条件とした。フィードバックとして、ターゲットにバーチャルハンドが到達すると正解の音が鳴る、果物がわずかに拡大される、画面右上に表示されたスコアが加算されるといった仕組みを導入した。

自己効力感への影響を検証するため、本研究ではHRの有無、および棚の位置によって3条件を設定した（表1）。棚が遠い条件は健側上肢の最大リーチを基準としており、棚が近い条件は麻痺側上肢の最大リーチを基準としている。HR条件では棚が遠く、HRによってバーチャルハンドをターゲットに到達させる。NHR-NR条件はHRがかからない非到達条件で、棚が遠く、バーチャルハンドがターゲットに到達しない。NHR-R条件はHRがかからない到達条件で、棚が近く、バーチャルハンドはターゲットに到達する。この条件は手が届く場所に手が届くという現実空間でのタスクと同等の体験であり先行研究の手法である。

HRの手法はChengら[3]を参照した。現実の手が麻痺側上肢の最大リーチに達した時にバーチャルハンドがターゲットに到達するようにリダイレクションをかけた。

表 1: 実験条件

条件	HRの有無	棚の位置
HR	有	遠い
NHR-NR	無	遠い
NHR-R	無	近い

4. 実験方法

4.1 目的

本研究の最終的な目標は片麻痺を有する脳卒中患者の臨床評価を改善させることである。その前段階として、本論



図 2: 実験中の様子

文ではHRによる提案手法が、健常者において自己効力感を向上させるかを検証することを目的とした。

4.2 実験参加者および実験環境

実験参加者は右上肢の運動に障害の無い健常者18名（男性13名、女性5名、21歳-50歳、平均年齢25.1歳）であった。参加者内比較を計画し、カウンターバランスを考慮して実験に用いる3条件の実施順は6通りの組み合わせを用意し、各参加者をランダムに割り振った（表2）。

実験ではMeta Quest2およびそのハンドトラッキングのシステムを用いた。また麻痺患者を模するために、参加者はアームスリングを使用して上肢の動きを制限した（図2）。実験環境はUnity(2021.3.2f1)を用いて作成した。

表 2: 実施順の割り振り

組み合わせ	1回目	2回目	3回目
1	HR	NHR-NR	NHR-R
2	HR	NHR-R	NHR-NR
3	NHR-NR	NHR-R	HR
4	NHR-NR	HR	NHR-R
5	NHR-R	HR	NHR-NR
6	NHR-R	NHR-NR	HR

4.2.1 評価手法

自己効力感の評価には既存手法であるSEE(Self-Efficacy for Exercise Scale)およびOEE(Outcome Expectations for Exercise Scale)を用いた。それぞれ11段階および5段階のリッカートスケールであり、前者は効力予期を、後者は結果予期を評価するのに用いられている。また、身体所有感・行為主体感の評価のためにVEQ(Virtual Embodiment Questionnaire)を用い、加えて体験に対する自由回答も聴取した。

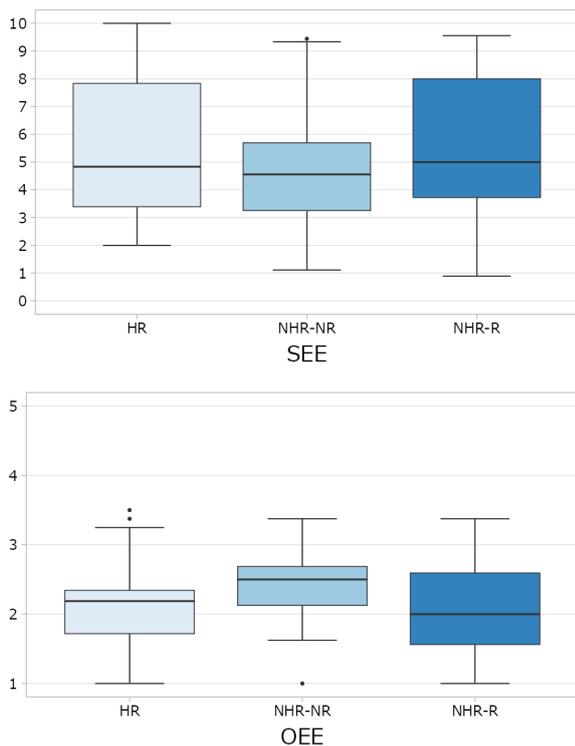


図 3: SEE および OEE の結果

4.3 作業仮説

前述の実験条件 3 つを比較する。HR 条件では非拘束側の本来のリーチを達成することができることから高い自己効力感が生起されると考えられる。そのため本実験の仮説は以下の通りである。

仮説 HR を用いた訓練手法は、HR を用いない訓練手法と比べて自己効力感が高い。

4.4 手順

実験参加者は実験内容の説明を受け、身体の計測を行った。両肩峰にマーカシールを貼り、正面からカメラで撮影した。両肩峰を結ぶ線と両眼の中心からの垂線との交点を求め、交点から眼の高さおよび右肩までの距離を測定した。また、メジャーを用いて右肩峰から示指指尖までの距離を測定し、これらを柵の位置の決定に使用した。次にアームスリングを装着した上で HMD を被り、VR 空間上で拘束した右上肢の最大リーチを測定した。訓練で使用するターゲットの枠に対してボールを押して移動した最大距離を最大リーチとした。次に訓練として参加者の割り振りに沿って前述の条件のうち 1 つを実施した。訓練ではランダムに指定されるターゲットへのリーチングタスクを 48 回行った。訓練後は HMD を外し、アンケート評価を実施した。訓練の疲労を考慮し、アンケート回答を含めて 1 分以上の休憩を取ることとした。口頭で十分な疲労の回復を確認してから次の条件の訓練を実施した。これを繰り返して 3 条件を実施した後に、ノベリティ効果を考慮して再度 3 条件を実施し、合計 6 回の訓練を行った。結果の解析には後半の 3 回のみを使用している。

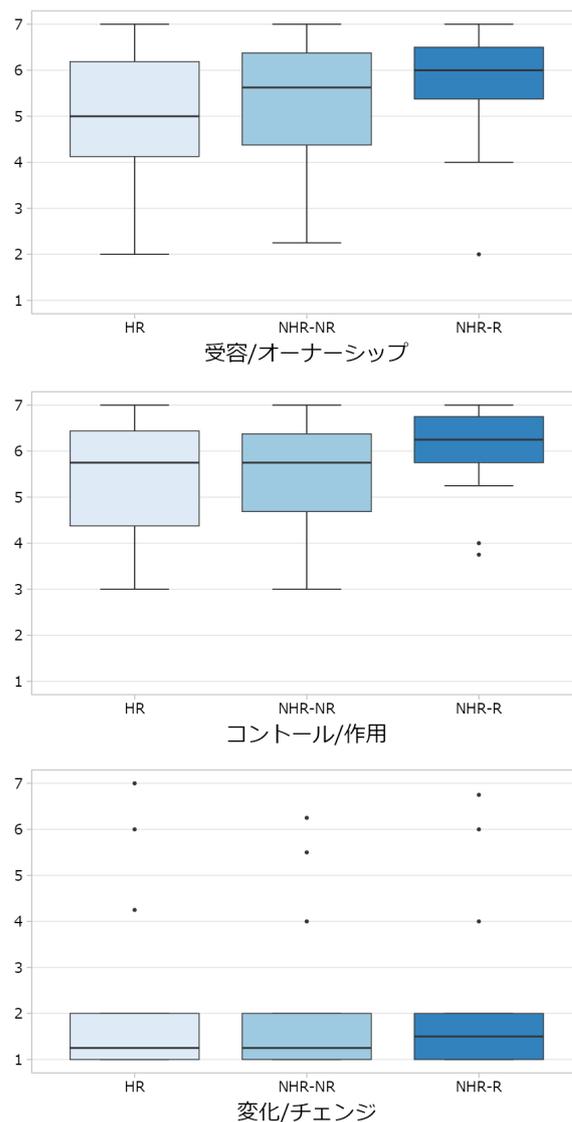


図 4: VEQ の結果

5. 結果

5.1 SEE および OEE

図 3 は SEE および OEE の平均値をタスクの条件ごとにまとめて箱ひげ図で示したものである。この図には最小値、第 1 四分位点、中央値、第 3 四分位点、最大値を示している。点で表示されるデータは外れ値である。SEE の評価値は高いほどポジティブな回答であり、OEE は低いほどポジティブな回答である。SEE および OEE は順序尺度であるため、各条件の比較にはノンパラメトリックな検定法であるフリードマン検定を用いた。有意差が認められた場合に下位検定として Shaffer の方法を使ってウィルコクソンの符号順位検定を繰り返し行った。有意水準はいずれも 0.05 とした。その結果、SEE ではタスク条件間に有意差が認められなかった ($\chi^2 = 2.32, p = 0.31$)。OEE ではタスク条件間に有意傾向が認められたため ($\chi^2 = 4.98, p = 0.083$)、下位検定を行ったところ HR 条件と NHR-NR 条件間 ($p = 0.014, r = 0.409$) および NHR-NR 条件と NHR-R 条件間 ($p = 0.0061, r = 0.457$) で有意差が認められた。

HR 条件と NHR-R 条件間では有意差が認められなかった ($p = 0.36, r = 0.152$).

5.2 VEQ

図 4 は VEQ の平均値を各条件ごとに箱ひげ図で示したものである。VEQ も順序尺度であるため、各条件の比較にはフリードマン検定を用いた。有意差が認められた場合に同様に Shaffer の方法を使って下位検定を行った。その結果、「コントロール/作用」の要素でタスク条件間の有意差が認められた ($\chi^2 = 11.54, p = 0.0031$)。下位検定を行ったところ HR 条件と NHR-NR 条件間では有意差が認められなかったが ($p = 0.75, r = 0.054$)、NHR-NR 条件と NHR-R 条件間 ($p = 0.0015, r = 0.530$) および HR 条件と NHR-R 条件間 ($p = 0.0059, r = 0.459$) で有意差が認められた。「受容/オーナーシップ」 ($\chi^2 = 4.23, p = 0.12$) および「変化/チェンジ」 ($\chi^2 = 1.04, p = 0.59$) の要素ではタスク条件間の有意差は認められなかった。

6. 考察

自己効力感の評価指標である OEE の下位検定において、HR 条件と NHR-NR 条件間では有意差が認められたが、HR 条件と NHR-R 条件間では有意差が認められなかった。よって、HR を用いた訓練手法は、HR を用いない訓練手法に比べて自己効力感が高いという仮説は部分的に支持された。本実験で評価した 3 条件のうち VR 空間において手がターゲットに到達して見えるのは HR 条件と NHR-R 条件であり、NHR-NR 条件はターゲットに到達しない。下位検定において NHR-NR 条件のみ OEE の評価が有意に低下していたことから、手がターゲットに到達することが自己効力感に影響したと考えられる。VEQ の評価において、HR 条件や NHR-NR 条件の様に、現実とは異なる体験をすることで行為主体感が低下したことは注目すべき点である。HR 条件に着目すると、行為主体感が低下したとしても手がターゲットに到達するという体験が得られれば自己効力感が維持された可能性がある。HR 条件で行為主体感が低下した主な原因は参加者の感想からバーチャルハンドの移動量が大きかったことにあると推察する。行為主体感が低下していなければ自己効力感の評価で異なる結果となったかもしれない。

本研究のリミテーションは 2 つある。1 つ目に実験参加者が脳卒中患者ではなく健常者であったことが大きなリミテーションである。自己効力感とは現在の自分の能力に対する信念であるため、脳卒中患者であれば本来低い状態であると見込まれる。今回は健常者を対象としたため、アームスリングによって身体能力の低下を図ったが一時的な身体能力の低下では自己効力感までは低下していなかったと考えられる。2 つ目に人数が少なかったことも考慮すべきである。人数に比較して外れ値が多く見られたことから個人差が影響したとも考えられる。一部の参加者では実験後半で精緻性の低い動きが観察された。これは単純な課題の繰り返しによる飽きが原因であると考えられる。実験後の口頭アンケートでもタスクに対する飽きを訴える感想が得られ

た。一方で、終始楽しんで行えたという感想も得られたため、課題に対する飽きやすさには個人差があり、参加人数を増やすことも検討すべきである。

以下では提案手法の改善策を 3 つ挙げる。1 つ目は HR によるバーチャルハンドの移動量が大きすぎた問題に対して、HR が行われていると知覚出来ない程度にのみターゲットを遠く配置することで移動量を小さくする手段が考えられる。HR 条件および NHR-NR 条件において、拘束しない状態の腕のリーチをターゲットまでの距離としたことは、タスクを視覚的に難しく感じさせるものであったが、この難易度が高すぎた可能性がある。リハビリテーションにおける適切な難易度調整という観点から移動量を調節することは妥当であると考えられる。2 つ目に健常者で実験前の自己効力感を低下させるためにアームスリングを長時間着用する方法が考えられる。運動を制限したまま普段の生活を行うことで自己効力感が低下することが期待される。しかし、参加者の負担が大きいため小規模な実験としては現実的ではないかもしれない。最後に、達成感を高めるためにはより高い報酬を用意すべきだと考えられる。今回の手法では果物を触ったことに対して正解音が鳴る、果物が大きくなる、スコアが増えるといったフィードバックのみであった。ここにさらなるゲーミフィケーションを導入し、一定のスコアに達すると報酬としてのアイテムが得られる、あるいは果物へのリーチングではなく敵への攻撃をリーチングタスクとして敵の討伐を達成させるといった方法を考えている。

7. おわりに

本研究では、脳卒中後の上肢麻痺患者のリハビリテーションにおける自己効力感の向上を目的として、HR を用いた VR リハビリテーションシステムを提案した。18 名の健常者を対象とした実験を行なった。タスクの達成により自己効力感が向上することが確認されたが、提案手法と先行研究の手法との間で有意差は認められなかった。今後は、実験手法の改良を行い、脳卒中患者を対象に実験を行う予定である。

謝辞 本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP21004) の支援を受けた。

参考文献

- [1] Fiona Jones and Afsane Riazi. Self-efficacy and self-management after stroke: a systematic review. *Disability and rehabilitation*, Vol. 33, No. 10, pp. 797–810, 2011.
- [2] Subramanian, et al. Arm motor recovery using a virtual reality intervention in chronic stroke: randomized control trial. *Neurorehabilitation and neural repair*, Vol. 27, No. 1, pp. 13–23, 2013.
- [3] Cheng, et al. Sparse haptic proxy: Touch feedback in virtual environments using a general passive prop. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 3718–3728, 2017.