

高い自己操作感を保つ業務スキルトレーニングシステムに向けた ヘッドリダイレクションによる視覚誘導効果の検証

武部浩明^{†1} 岡礼華^{†1} 馬場幸三^{†1} 石原正樹^{†1} 馬場孝之^{†1}

概要：近年、現実世界では不可能なことをシミュレートできるVRの性質を活用し、人間の認知や能力を変容させることを目指した研究が進んできている。我々は、業務の現場において必要とされる身体スキルを容易に獲得できるようにするため、VRにおいてより高い自己操作感を保ったまま業務スキルをトレーニングできるシステムの実現を検討している。今回、業務上の身体スキルの一部である視覚に関し、ユーザの頭部の動きに応じてVR空間の回転を制御するヘッドリダイレクションに着目し、ヘッドリダイレクションが、異常箇所点検業務等の、実際の業務と同様の間違い探しタスクにおいて、自己操作感を保持したまま被験者の視線を間違い箇所へ誘導できるかについて検証した。その結果、ヘッドリダイレクションによる視覚の誘導効果を確認でき、初めて実際の業務のトレーニングにおける実用性の一端を明らかにできたので報告する。

1. はじめに

近年、VR(Virtual Reality)が有する、現実世界の制約を超えて現実世界では不可能なことをシミュレートできる性質を活用し、人間の認知や能力を変容させることを目指した研究が進んできている[1]。

その中でも、VR空間で複数人の動作を一つのアバターに反映する融合身体[2-6]の研究が注目されている。融合身体は、教師と学習者が同一のアバターを共有し、二人の腕の動きの加重平均をとったものをアバターの動きに反映させ、それぞれがそのアバターに一人称視点で没入するシステムである。このシステムによって、学習者は教師とのインタラクションによって矯正された動作をあたかも自分の動作であると感じながらトレーニングできる。融合身体では、ある動作についての熟練者と初心者の違いは身体図式[7]の差にあり、動作に必要な身体図式を適切に熟練者の身体図式に近づけることができれば、その身体スキルを体得できるという考えに基づく。そして、身体図式の更新には動作の主体は自分であるという感覚の自己操作感が必要とされるため[8]、この感覚を他者である教師の動作に対して生起させる、すなわち、高い自己操作感を保ったままトレーニングさせることによって、身体図式を適切に更新し身体スキルの学習および定着度の向上を目指す。

また、VR空間内でユーザに気づかれずにユーザの頭部回転に対し直接的に影響を与えるリダイレクションの研究[9-11]も注目されている。その中でもヘッドリダイレクション[11]は、VR空間において、ユーザの頭部の動きに応じて、VR空間側のバーチャルシーンの回転を制御することで、ユーザの頭部回転を気づかないうちに誘導したりサポートしたりする手法である。例えば、全方位動画視聴体験において、先行体験者の頭部の向き（ビューの向き）を誘導タ

ーゲットに設定し、ヘッドリダイレクションを誘導手法として用い、360°の範囲内で気付かれにくい視覚誘導を行うことで、ユーザ自身の視覚体験を損なわずに追体験を実現することが可能である。

我々は、高い自己操作感を保ったトレーニングによって身体スキルの学習効果及び定着度が向上する可能性に基づき、業務の現場において身体スキルを容易に獲得できるようにするため、VR空間においてより高い自己操作感を保ったまま業務で必要とされる身体スキルをトレーニングできるシステムの実現を検討している。今回、視線等の視覚が業務に必要な身体スキルの一部であること、そしてヘッドリダイレクションが、ユーザの視覚体験を損なわず、高い自己操作感を保ったまま視覚を誘導できる点に着目し、ヘッドリダイレクションを活用して、異常箇所などの点検業務を想定した間違い探しをタスクとする実験を行い、ヘッドリダイレクションによる視覚の誘導効果を検証した。その結果、ヘッドリダイレクションによる視覚の誘導効果を確認でき、点検業務の初心者に対して視覚誘導で正しい点検箇所の気づきを効率化できるトレーニングの実現可能性を確認できた。先行する関連研究では、実際の業務のトレーニングなどにおける有効性がこれまで検証されなかったが、今回初めてその実用性の一端を明らかにしたので報告する。

2. 検証実験

2.1 実験目的

ヘッドリダイレクションの業務スキルトレーニングへの適用可能性を考察するために、異常箇所点検業務と同様の間違い探しのタスクにおいて、被験者が自己操作感を保持したまま被験者の視線を間違い箇所へ誘導できるかについて検証する。すなわち、VR空間内で間違い探しをタス

クとし、ユーザの頭部回転を誘導するヘッドリダイレクションを適用させたときに、ユーザが間違い探しタスクをより迅速に達成できるようになるかを検証する。

2.2 ヘッドリダイレクション

夏らによって提案されたヘッドリダイレクション[11]について、手法の内容を簡単に述べる。ヘッドリダイレクションは、リダイレクション手法の応用で、VR空間の回転を制御することで、気づかれないようにユーザの頭部回転に影響を与え、最終的にユーザの頭部の向きをターゲットの方向に近づける。頭部が静止しているときと回転しているときではVR空間の回転に対する感覚が異なること

[9][12]に基づき、それぞれの場合でVR空間の回転を異なる方法で制御する。ユーザの頭部が静止している場合、ターゲットをユーザに近づける方向にVR空間をユーザに気づかれない程度の遅い速度で等速回転させる(図1(a))。一方、ユーザの頭部が回転している場合、ローテーションゲイン G_R を制御することでVR空間の回転を制御する。ユーザの頭部がターゲットに向かって回転する場合は、1より大きいローテーションゲインが得られる方向にVR空間を回転させ(図1(b))、逆にターゲットから遠ざかるように回転する場合は1より小さいローテーションゲインになるように回転させる(図1(c))。具体的なVR空間の回転速度の大きさは、以下の式(1)で制御される。なおここで、

ω_{head} 、 ω_{scene} はそれぞれ頭部、VR空間の回転速度の大きさを示し、 ω_{still} は頭部が静止しているかどうかを判断するための回転速度の大きさの閾値を表し、 ω_{uni} は頭部が静止していると判断されたときのVR空間の等速回転速度の大きさとする。

$$\omega_{scene} = \begin{cases} \omega_{uni} & (\text{if } \omega_{head} < \omega_{still}) \\ |1 - G_R| \omega_{head} & (\text{if } \omega_{head} > \omega_{still}) \end{cases} \quad (1)$$

2.3 VR空間のデザインとタスク

VR空間は、図2に示すように、ユーザを中心に周囲360°に渡って漢字が描かれた立方体のブロック3段×36個の計108個を均等に配置した。実験では、軸周り(左右方向)の回転のみ制御し評価したいので、上下方向の回転が不要になるように積み上げるブロックは視野角に入る3段にし、一方で、回転を知覚できるように回転角10度ごとに36個のブロックを等間隔に配置した。奥行方向には、ブロックの配置が一様あまりどこを見ているかを見失わないように「手前」と「奥」の2種類の配置を用意した。これにより、上から「手前」「奥」「手前」のタイプと「奥」「手前」「奥」のタイプが回転方向に交互に配置される。

立方体のブロックは白く、ブロックの表面に漢字が黒い文字で描かれる。108個のブロックには、一つだけ異なる漢字のブロックが含まれる。具体的には、107個のブロックには「堤」が描かれ、1個だけ「堤」が描かれている。ユーザのタスクは、間違い探しであり、一つだけ異なる漢字「堤」のブロック(正解)を見つけることである。ユーザは周

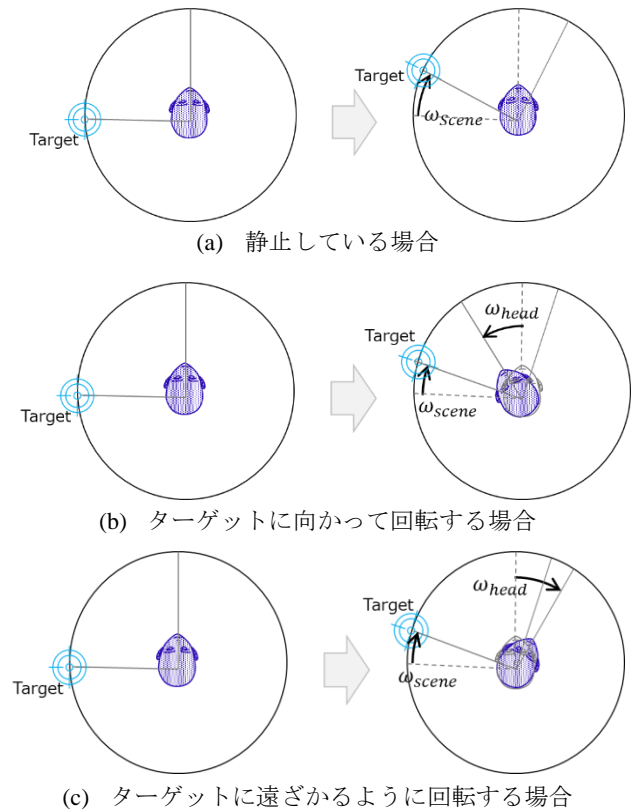


図1 ヘッドリダイレクションの原理

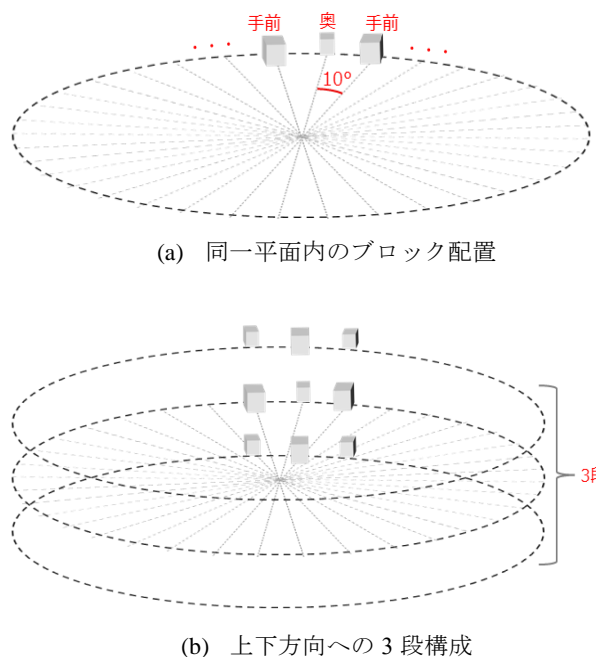


図2 VR空間のデザイン

囲を見回して「堤」のブロックを探す、「奥」のブロックの漢字の一部が「手前」のブロックに隠れる場合があり、その場合ユーザはやや背伸びしたり、体勢をずらして漢字を確認したりすることになる。

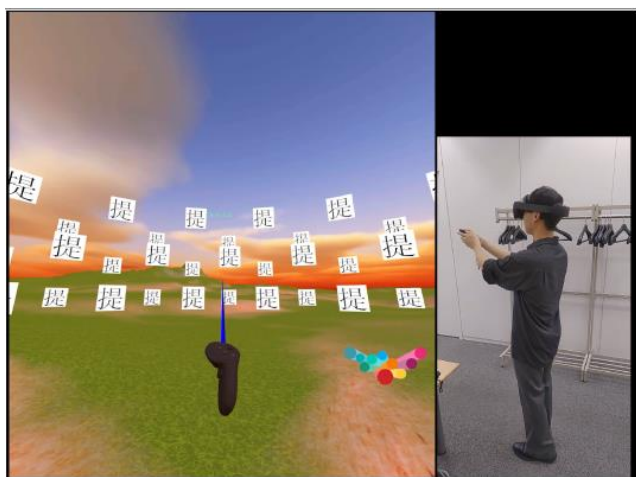


図 3 VR 空間(左)と実験中の被験者(右)

図 3 に VR 空間の様子と実験中の被験者を示した。被験者は HMD を装着しコントローラを手に持って「堤」のブロックを探している。VR 空間では 108 個のブロックが 360° に渡ってぐると取り囲んでおり、コントローラから出ている青い線によって正解を指図するようになっている。

2.4 開発・実験環境

開発環境は Unity Technologies 社の Unity 2022.29f1 を使用した。HMD は Meta 社の Quest Pro を使用した。実験では、実験用のアプリケーションを Quest Pro にインストールし、Quest Pro 単体で動作させた。

2.5 被験者

実験の被験者は 21 名(男性 20 名, 女性 1 名)であり, 年齢構成, HMD の所有と経験に関する有無は表 1 と表 2 に記した。

2.6 実験手順

被験者に対しては, HMD を使用した簡単なアプリを作ったので体験して感想を聞かせてほしい旨のみを告知し, ヘッドリダイレクションによる誘導については告知せずに伏せて実験を行った。

実験では, 被験者は HMD を装着し, 周囲に障害物のないスペースの中心に立ち, VR 空間を見回すことにより, 間違い探しのタスクを行う。タスクは 6 回連続で実施するが, ヘッドリダイレクションを作動させたケースと作動させないケースをそれぞれ 3 回ずつ体験してもらうようにする。ヘッドリダイレクションを作動させる・させないはプログラム上ランダムに設定されるようにし, 各自それぞれ同数のケースを体験するように設定した。また, 正解, すなわち, 一つだけ異なる漢字「堤」の位置も毎回ランダムに設定されるようにした。

ヘッドリダイレクションのパラメータは, 下記のように夏ら[11]と同一値を設定した。

- $\omega_{still} : \omega_{still}=4^\circ / s$
- $\omega_{uni} : \omega_{uni}=2^\circ / s$
- ローテーションゲイン G_R :

$$G_R = \begin{cases} 1.2 & (\text{if the user's head rotates to the target}) \\ 0.8 & (\text{if the user's head rotates away from the target}) \end{cases}$$

実験では, タスクの所要時間である正解を見つけるまでの時間を測定して記録した。また, 被験者は実験後アンケートに回答した。アンケートの質問内容を以下に示す。

- Q1. アプリ内で視線が誘導されたような感覚がありましたか?
- Q2. (上記質問がはいの方) 何回目に感じましたか?
1 回目 2 回目 3 回目 4 回目 5 回目 6 回目
何回目かは覚えていない ※複数回答可

2.7 実験結果

タスク所要時間の結果を図 4 に示す。ヘッドリダイレクション有無の所要時間について, t 検定を行ったところ, 有意差が認められた($p=0.0051$)。また, ヘッドリダイレクションなしの平均である 43 秒に対してヘッドリダイレクションありの平均は 29 秒と 14 秒削減され, ヘッドリダイレクションによって約 33%の誘導効果が確認された。

表 1 被験者の年齢構成

| 年齢 | 20代 | 30代 | 40代 | 50代 |
|-------|-----|-----|-----|-----|
| 人数(名) | 2 | 11 | 3 | 5 |

表 2 被験者の HMD 所有と経験

| | HMD 所有 | | HMD 経験 | |
|-------|--------|----|--------|----|
| | あり | なし | あり | なし |
| 人数(名) | 7 | 14 | 13 | 8 |

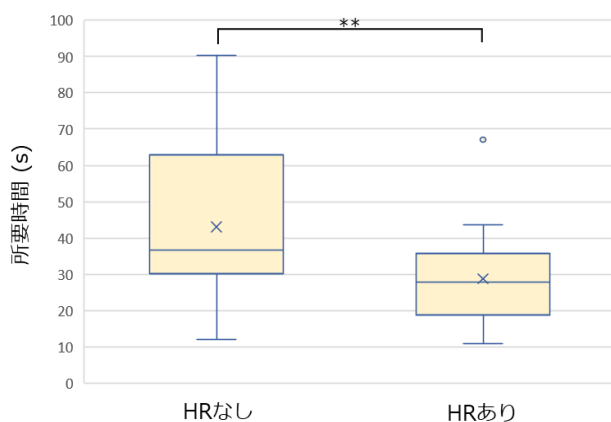


図 4 ヘッドリダイレクション有無のタスク所要時間 (HR: ヘッドリダイレクション)

表 3 ヘッドリダイレクション有無によるタスク所要時間の削減効果

| | 削減効果あり | 削減効果なし |
|-------|--------|--------|
| 人数(名) | 16 | 5 |

表 4 誘導感覚の有無

| | 誘導感覚なし | 誘導感覚あり |
|-------|--------|--------|
| 人数(名) | 17 | 4 |

被験者単位でタスク所要時間が削減されたかどうかという観点では、各被験者においてヘッドリダイレクションあり・なし各々の3回の所要時間の中央値を比較した。これは、各試行において正解位置がランダムに設定されることにより各試行の難易度に運の要素が作用するため、中央値が適切と判断したためである。その結果、21名中16名についてタスク所要時間が削減され、約76%の誘導成功率が確認された(表3)。また、タスク所要時間の誘導効果について、HMD 所有や経験の有無による傾向の大きな違いは見られなかった。

自己操作感に関しては、アンケートの質問 Q1 に対して誘導感覚なしと回答した被験者が21名中17名と、完全な自己操作感を保ったまま試行できた被験者の割合は約81%であった(表4)。一方で、誘導感覚ありと回答した被験者は4名いた。4名中2名に関しては、誘導感覚があった試行が何番目であったかは不明であり、漠然とした誘導感覚であった。残る2名については誘導感覚があった試行が何番目であったかに関して明確に回答があったが、ヘッドリダイレクションありを検知できなかった試行が6回中2回、ヘッドリダイレクションなしにもかかわらず誘導があったとする試行が6回中2回あった。これにより、全体について、試行単位で完全な自己操作感を保ったまま試行できた割合は、57回中53回と約93%であった。

3. 考察

間違い探しのタスクにおいて、完全な自己操作感93%のもと、33%の誘導効果を確認できた。間違い探しのタスクは、実際の業務では、例えば橋梁等のインフラ保守点検においてヒビの異常等の点検箇所を見つける場面に置き換え可能である。従って、点検業務を VR 空間内でトレーニングすることを想定した場合、ヘッドリダイレクションにより指導者から初心者に見て欲しい点検箇所へ視線誘導が可能になり、点検業務の初心者に対して視線誘導で正しい点検箇所の気づきを効率化できるトレーニングの実現可能性があると考察される。

4. まとめ

本研究では、VR 空間において高い自己操作感を保った

まま業務スキルをトレーニングできるシステムの実現に向け、ヘッドリダイレクションの業務スキルトレーニングへの適用可能性を検証した。具体的には、異常箇所の点検業務と同様の間違い探しのタスクにおいて、被験者が自己操作感を保持したまま被験者の視線を間違い箇所へ誘導できるかについて検証した。その結果、ヘッドリダイレクションによる視覚の誘導効果を確認でき、点検業務の初心者に対して視覚誘導で正しい点検箇所の気づきを効率化できる業務スキルトレーニングの実現可能性を確認できた。

今後は、ヘッドリダイレクションを用いた業務スキルトレーニングが、実際の業務において技能の能力向上や定着に効果を持つことを実証する。さらに、視覚だけでなく、例えば腕や指の動きのような他の身体スキルに対しても同様に、VR 空間における身体誘導によって業務スキルが効果的にトレーニングできる手法を探っていきたい。

参考文献

- [1] 鳴海拓志, “ゴーストエンジニアリング: 身体変容による認知拡張の活用に向けて”, *Cognitive Studies*, 26(1), pp.14-29, 2019.
- [2] R. Fribourg, N. Ogawa, L. Hoyet, F. Argelaguet, T. Narumi, M. Hirose and A. Lécuyer, “Virtual Co-Embodiment: Evaluation of the Sense of Agency while Sharing the Control of a Virtual Body among Two Individuals”, *IEEE Transactions and Visualization and Computer Graphics*, 2020.
- [3] 伊東亮太, 小川奈美, 鳴海拓志, 廣瀬通孝, “融合身体を用いた身体スキル伝達に関する基礎調査”, 第25回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.1-4, 2020.
- [4] 児玉大樹, 瑞穂嵩人, 畑田裕二, 鳴海拓志, 廣瀬通孝, “身体融合時の動的な寄与率制御による行為主体感向上”, 第26回日本バーチャルリアリティ学会大会論文, 1C3-4, 2021.
- [5] 児玉大樹, 瑞穂嵩人, 畑田裕二, 鳴海拓志, 廣瀬通孝, “融合身体を用いたトレース課題遂行時の身体運動学習効果”, 第27回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 3C4-2, 2022.
- [6] D. Kodama, T. Mizuho, Y. Hatada, T. Narumi and M. Hirose, “Effects of Collaborative Training Using Virtual Co-embodiment on Motor Skill Learning”, *IEEE Transaction and Computer Graphics*, Vol.29, No.5, 2023.
- [7] 田中彰吾, “心理的身体と身体知 -身体図式を再考する”, *人体科学*, 18(1), pp.1-12, 2009.
- [8] M. D’ Angelo, G. di Pellegrino, S. Seriani, P. Gallina and F. Frassinetti, “The sense of agency shapes body schema and peripersonal space”, *Scientific Reports*, 8(1), p.13847, 2018.
- [9] S. Razzaque, Z. Kohn and M.C. Whitton, “Redirected walking”, *Eurographics Conferences*, EG2001, 2001.
- [10] Q.Sun et al. “Towards Virtual Reality Infinite Walking: Dynamic Saccadic Redirection”, *ACM Transactions on Graphics* 37 (4), pp.1-13, 2018.
- [11] 夏偉, 平尾悠太郎, ペルスキアエルナンデス・モニカ, 磯山直也, 内山英昭, 清川清, “全方位動画視聴時の追体験のためのヘッドリダイレクションによる視覚誘導手法の提案と評価”, *電子情報通信学会技術研究報告*, MVE2023-12, pp.63-68, 2023.
- [12] J. Jerald, T. Peck, S. Steinicke and M. Whitton, “Sensitivity to scene motion for phases of head yaws”, *Proceedings of the 5th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*, pp.155-162, 2008.