

視覚イメージに基づく BCI を用いた VR 空間遷移手法の提案

阿部 輝* 平野 怜旺† 渡邊 恵太*

概要. バーチャルリアリティ (VR) 体験の多くは、異なる環境やシーンを切り替える必要があり、カット、フェード、テレポートビーム、ポータルなどの遷移手法が用いられる。不適切な遷移手法は仮想性を意識させ、プレゼンスを損なう可能性という課題がある。本研究では、視覚イメージに基づくブレインコンピュータインタフェース (BCI) を用いた VR 空間遷移手法を提案する。本手法では、脳波解析と機械学習を統合した BCI システムを開発し、VR 環境とリアルタイムに連動させることで空間遷移を実現した。このシステムにより、ユーザは脳波計測装置を装着し、目を閉じて特定の空間の視覚的なイメージを想起することで、イメージした空間に遷移できる。そして、閉眼状態を遷移のトリガーとすることにより、視覚イメージへの集中を促すとともに視覚的不連続性を軽減し、高いプレゼンスの維持が期待できる。

1 はじめに

バーチャルリアリティ (VR) 体験の多くは、異なる環境やシーンを切り替える必要があり、カット、フェード、テレポートビーム、ポータルなどの遷移手法が用いられる。VR は時間的・空間的なメディアとして機能するため、空間遷移はタイムラインの中断だけでなく、ユーザが没入している VR 環境そのものが変化する [2]。そのため、不適切な遷移手法は仮想性を意識させ、存在感 (プレゼンス) を損なうといった課題がある [5]。

この課題に対し、先行研究では高いプレゼンスを維持する遷移手法について調査してきた。Pointecker らは仮想現実と拡張現実間の 4 つの遷移技術を比較し、最適な手法が使用文脈に依存することを明らかにした [6]。また、Husung らは 6 つの遷移技術を評価し、次の空間を予測可能な遷移手法が高いプレゼンスを維持することを明らかにした [3]。

しかし、これらの従来手法は視覚的效果に依存しているため、空間遷移時に視覚的な不連続性が生じる可能性がある。視覚情報が連続的に提示される状況下では、カットやフェードなどの視覚的演出は没入体験を中断し、プレゼンスの低下を引き起こす要因となる。従来の遷移手法は、視覚的演出の洗練化により不連続性の軽減を試みてきたが、視覚情報に基づく限り本質的な課題は残されたままである。

本研究では、視覚イメージに基づくブレインコンピュータインタフェース (BCI) を用いた VR 空間遷移手法を提案する (図 1)。BCI とは脳と外部機器の通信を可能にする技術である。本手法では、脳波解析と機械学習を統合した BCI システムを開発し、



図 1. 視覚イメージに基づく BCI を用いた VR 空間遷移手法。ユーザは目を閉じて特定の空間のイメージを想起することで、意図した空間に遷移できる。

VR 環境とリアルタイムに連動させることで空間遷移を実現した。このシステムにより、ユーザは脳波計測装置を装着し、目を閉じて特定の空間の視覚的なイメージを想起することで、イメージした空間に遷移できる。そして、閉眼状態を遷移のトリガーとすることにより、視覚イメージへの集中を促すとともに視覚的不連続性を軽減し、高いプレゼンスの維持が期待できる。

2 システム

2.1 システム構成

本システムでは、EMOTIV EPOC X と Meta Quest 3 を用いた。EPOC X は頭皮からの電気信号を記録するために 16 チャンネル (2 個参照電極) のセンサーを搭載している。また、センサー位置は国際的な 10-20 システムに準拠し、サンプリング周波数は 256Hz に設定した。VR の提示には Meta Quest 3 を用いて、ユーザの頭部には EPOC X と Meta Quest 3 を同時に装着する構成とした。

Copyright is held by the author(s). This paper is non-refereed and non-archival. Hence it may later appear in any journals, conferences, symposia, etc.

* 明治大学総合数理学部

† 明治大学大学院先端数理科学研究科

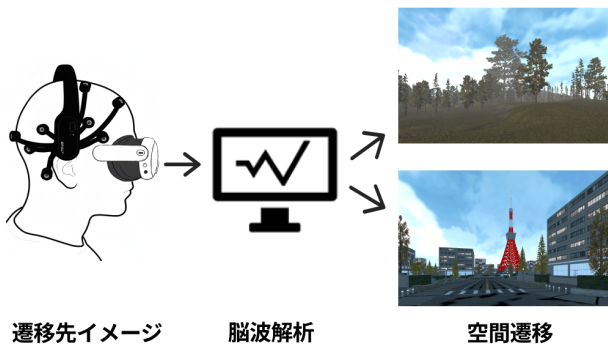


図 2. 空間遷移システム．ユーザは森環境または都市環境へと遷移できる．

2.2 BCI システム

本研究では、脳波信号のリアルタイム処理と機械学習を統合した BCI システムを開発した．本システムは、脳波データの取得から前処理、機械学習による分類、Unity アプリケーションへの結果送信までを Python 上で実装した独自プログラムにより実行する．前処理では、8-30Hz の帯域でバンドパスフィルタを適用後、2 秒間のエポック単位に分割した．機械学習モデルには、EEGNet アーキテクチャ [4] を基盤とした畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いて、トレーニングセッションで収集した訓練データからユーザの想起状態を推定する分類器を構築した．リアルタイム推定では、計測中の脳波データを 2 秒間の時間窓で連続的に抽出し、1 秒ごとにモデルへ入力することでユーザの想起状態を推定した．分類結果は UDP 通信を介して Unity へ送信され、VR 空間内の遷移制御に利用した．さらに、後頭部の電極配置 (O1, O2) における α 波パワー値を並行計算し、閉眼状態の検出に用いた．

2.3 空間遷移システム

本システムは、ユーザが森環境または都市環境をイメージすることで、意図した VR 空間へ遷移することを可能にする (図 2)．ユーザは任意のタイミングで閉眼し、遷移先の環境をイメージすることで空間遷移を開始する．閉眼検出には、後頭部電極 (O1, O2) の α 波パワー値を用いて、3 回連続で平均値が閾値を超えた時点で閉眼状態と判定し、遷移先の分類を開始する．これは、 α 波のパワー値は開眼時と比較して閉眼時に増大する特性を利用している [1]．遷移先の判定では、分類結果の安定性確保のため、3 回連続で同一環境が判定された場合に空間遷移を実行する．この仕様により誤操作による意図しない遷移を抑制できる．空間遷移完了後は、遷移先環境に対応した環境音を聴覚フィードバックとして提示し、ユーザが遷移完了を即座に認識できる機能を実装した．

3 ユーザスタディ

視覚イメージに基づく BCI を用いた VR 空間遷移手法の操作可能性を検証するため、ユーザスタディ実験を行った．

3.1 実験参加者

実験参加者は 22 歳から 23 歳の男性 2 名であった．全員が正常または矯正視力を有し、VR 使用経験を持つ者であった．また、全参加者は BCI 制御の使用経験を有していた．

3.2 実験手順

実験は、システム説明、環境体験、トレーニングタスク、操作タスクの順で実施した．参加者は、実際の遷移の流れについて説明を受けた後、遷移先となる 2 つの環境 (都市環境と森環境) をそれぞれ体験し、各空間の特徴を把握した．トレーニングタスクでは、機械学習モデル構築のための訓練データを収集した．各試行は、VR 空間を観察する期間 (2 秒)、遷移先を指示する期間 (1 秒)、指示された空間をイメージするタスク期間 (5 秒)、リセットのための安静期間 (2 秒) というプロトコルで進行的に実施した．参加者は各空間 15 試行ずつ、合わせて 30 試行を 3 回繰り返して、合計 90 試行を行った．収集したデータを用いて機械学習モデルを構築し、後続の操作タスクにおける分類器として使用した．操作タスクでは、提案手法を用いた実際の空間遷移を行った．参加者は「森」または「都市」のいずれかに遷移するよう指示され、指示された空間への遷移を試みた．遷移完了後は、環境音による聴覚フィードバックにより遷移の成功または失敗を認識した．本タスクでは合計 30 試行の遷移を実施し、各試行における操作精度と遷移完了までの所要時間を記録した．

3.3 結果と展望

検証の結果、操作タスクにおける平均操作精度は 70.0% となった．参加者間の操作精度には顕著な個人差が見られ、最高精度を示した参加者は 73.3% であったのに対し、最低精度の参加者は 66.7% にとどまった．また、平均遷移時間は 11.4 秒であった．遷移時間の分析から、成功試行では平均 10.7 秒であったのに対し、失敗試行では平均 12.8 秒を要していた．これは、遷移に要する時間が長くなった際、視覚イメージの維持が困難になり、操作精度に影響を与えた可能性を示唆している．

今後の課題では、操作精度の向上とトレーニング時間の短縮を挙げる．多人数の脳波データセットを用いることで、個人差に頑健な一般化された分類器を構築できる可能性がある．さらに、転移学習技術等を活用することで事前学習に要する時間を短縮し、脳波計測装置を装着するだけで空間遷移が可能なシステムの実現を目指す．

参考文献

- [1] R. J. Barry, A. R. Clarke, S. J. Johnstone, C. A. Magee, and J. A. Rushby. EEG differences between eyes-closed and eyes-open resting conditions. *Clinical neurophysiology*, 118(12):2765–2773, 2007.
- [2] E. Gobbetti and R. Scateni. Virtual reality: Past, present, and future. *Virtual environments in clinical psychology and neuroscience: Methods and techniques in advanced patient-therapist interaction*, 1998.
- [3] M. Husung and E. Langbehn. Of portals and orbs: An evaluation of scene transition techniques for virtual reality. In *Proceedings of Mensch Und Computer 2019*, pp. 245–254, 2019.
- [4] V. J. Lawhern, A. J. Solon, N. R. Waytowich, S. M. Gordon, C. P. Hung, and B. J. Lance. EEG-Net: a compact convolutional neural network for EEG-based brain-computer interfaces. *Journal of neural engineering*, 15(5):056013, 2018.
- [5] L. Men, N. Bryan-Kinns, A. S. Hassard, and Z. Ma. The impact of transitions on user experience in virtual reality. In *2017 IEEE virtual reality (VR)*, pp. 285–286. IEEE, 2017.
- [6] F. Pointecker, J. Friedl, D. Schwajda, H.-C. Jetter, and C. Anthes. Bridging the gap across realities: Visual transitions between virtual and augmented reality. In *2022 IEEE international symposium on mixed and augmented reality (ISMAR)*, pp. 827–836. IEEE, 2022.