



物理ドアを用いた実環境とバーチャル環境の マルチモーダル遷移における音と振動の漏れ出し効果が ユーザ体験に与える影響

Effects of Leaked Auditory and Vibrational Stimuli on User Experience
in Multi-Modal Transitions between Real and Virtual Environments Using a Physical Door

萩森大貴¹⁾, 平尾悠太郎²⁾, ペルスキアエルナンデスモニカ²⁾, 山田祐樹¹⁾, 内山英昭²⁾, 頭川裕紀¹⁾, 清川清²⁾

Daiki HAGIMORI, Yutaro HIRAO, Monica PERUSQUÍA-HERNÁNDEZ, Yuki YAMADA,

Hideaki UCHIYAMA, Hiroki ZUKAWA and Kiyoshi KIYOKAWA

1) 株式会社 NTT ドコモ (〒 100-6150 東京都千代田区永田町 2-11-1,
{daiki.hagimori.uv / yuuki.yamada.vt / hiroki.zukawa.hu}@nttdocomo.com)

2) 奈良先端科学技術大学院大学 (〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5,
{yutaro.hirao / m.perusquia / hideaki.uchiyama / kiyo}@is.naist.jp)

概要: ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を使ったバーチャルリアリティ (VR) 体験において, 物理的なドアを用いたマルチモーダルな遷移手法 (ドア手法) が実環境とバーチャル環境のシームレスな接続に貢献することが知られている. しかし, 伝統的な遷移手法であるポータル手法に対して, 十分なユーザ体験の向上効果が明らかにされていない. そこで, ドアの構造的特徴を生かすことでさらにマルチモーダル性を高めたドア手法を提案する. 具体的には, ドアの開閉に応じてバーチャル環境の音量を増減する聴覚提示機能と, 音量増減に連動してドアを振動する触覚提示機能をこれまでのドア手法に追加した. その結果, Igroup Presence Questionnaire, System Usability Scale, Flow Short Scale, Tech-Presence, NASA Task Load Index, Preference, 遷移回数において, ドア手法はポータル手法に対して有意差のある向上効果を示さなかった. 一方で, 24 人中 13 人がドア手法をポータル手法よりも好む結果が示された. したがって, 本研究はドア手法の発展に一部貢献した.

キーワード: マルチモーダル, 臨場感, 遷移手法

1. はじめに

ヘッドマウントディスプレイ (HMD: Head Mounted Display) を使ったバーチャルリアリティ (VR: Virtual Reality) 体験において, 実環境とバーチャル環境をシームレスにつなげることが求められている [1]. VR 体験を行うユーザは, まず実環境で HMD をかぶることでバーチャル環境に遷移する必要があるためである [2]. この実環境とバーチャル環境の遷移がシームレスでなければ, VR 体験における臨場感などのユーザ体験を低下させる問題が生じる [3].

一方で, 遷移技術は視覚的な方法であるポータル手法から始まり, マルチモーダルな手法に発展している [4]. VR 体験のマルチモーダル化が臨場感を含めたユーザ体験を向上するためである [5]. Husung らはカット, フェード, ディゾルブ, ポータル, オープ, トランスフォーメーションの 6 つの遷移手法のうち, 能動的な動作を伴う遷移であるポータルとオープが臨場感を高めたと報告した [4]. Hoshikawa らは, リダイレクションの文脈でドアの触覚機能の有効性

に期待し, ドアノブを再現した装置を開発した [6]. 触覚によってリダイレクションに気づきやすくなってしまうが, 臨場感を高める効果は認められることを報告した.

我々はこれまでにマルチモーダルな遷移手法として物理ドアを使う遷移手法 (ドア手法) に注目してきた [7]. 歩行によって遷移する点でポータル手法の一種だが, ドアの開閉というさらなる能動的動作と触覚提示や聴覚提示を伴うためである. ビデオシースルー HMD を使ったマルチモーダルなドア手法が, 視覚的なフェード手法よりも高い臨場感や移動量などのユーザ体験の向上効果を示すことを明らかにした. しかし, ポータル手法よりも高いユーザ体験を示すほどではない問題があった.

そこで, ドアの構造的特徴を生かすことでさらにマルチモーダル性を高めたドア手法を提案する. 提案手法は従来のドア手法に比べて以下 2 点の特徴を持つ.

- ドアの開閉に応じてバーチャル環境の音量を増減する聴覚提示機能

- 音量増減に連動してドアを振動する触覚提示機能

本稿では、提案するドア手法がポータル手法に比べて高いユーザ体験を示すことを仮説として期待しその影響を明らかにする。本研究の貢献は臨場感を含めたユーザ体験の向上に対してドア手法が有効であり、その発展に将来性があると示すことである。

2. 実験方法

2.1 実験デザイン

実験は遷移手法を要因とした 1 要因 2 水準の被験者内計画である。ユーザ体験と遷移回数を水準間で比較する。タスクはダミータスクとして記憶課題が与えられる。このタスクは生態学的妥当性の高いタスク下で遷移手法を評価した Feld らの報告を参考にしている [8]。

記憶課題は記憶フェーズと回答フェーズで構成される。記憶フェーズでは、参加者は遷移手法を使って実環境とバーチャル環境を行き来し、これらの環境情報をできる限り覚える。このフェーズは時間制限をもたず参加者が十分に記憶したと報告した時点で終了とする。ただし、参加者は終了時点でタスクを開始した地点に戻らなければならない。さらに、ドア手法の場合、ドアを閉めてから開始地点に戻る必要がある。なお、タスクにおける開始地点が実環境側となる。

実環境はオフィスである (図 1 (a.))。バーチャル環境はリビング、日本の伝統的な町並み、宇宙空間の 3 種類である (図 1 (b.))。参加者が自由に移動できる範囲は遷移手法の設置地点を基準として、手前方向に 1m、奥方向に 2m、左右方向にそれぞれ 1m である。タスクの開始地点は遷移手法の設置地点から手前に 1m の位置である。タスクにおける記憶対象はバーチャル環境は制限がない一方で、実環境はタスクの難易度を下げするためにその範囲を制限する。

回答フェーズでは、記憶した環境情報に関する質問が実環境を含めた 4 つの環境それぞれに 3 つの計 12 つある。バーチャル環境の質問の一例は、“右のテレビスタンドにおいてあった石像は何か？”である。実験者が直近で体験したバーチャル環境もしくは実環境の 3 つの質問の中から 1 つを選ぶ。参加者は口頭で回答しその場で正誤結果を得る。なお、一度使った質問は二度用いない。加えて、実環境の質問は遷移手法の条件ごとに必ず 1 回は用いる。特に、実環境の記憶に意識を向けさせるため、最初に行う遷移手法条件の 2 度目の試行の際は必ず用いる。

2.2 実験条件

実験条件は 2 つの遷移手法、ドア手法とポータル手法である (図 2)。ドア手法では、参加者は物理ドアを開けて歩いてくぐることで環境を遷移する。ポータル手法では、参加者はバーチャルな穴を歩いてくぐることで環境を遷移をする。2 つの手法の差は、ドア手法には触覚提示と聴覚提示が生じている点である。具体的には、ドアが開閉するためにドアノブとの接触と動作音と、開閉に応じたバーチャル環境の環境音量制御とドアを介した音の振動伝搬である。

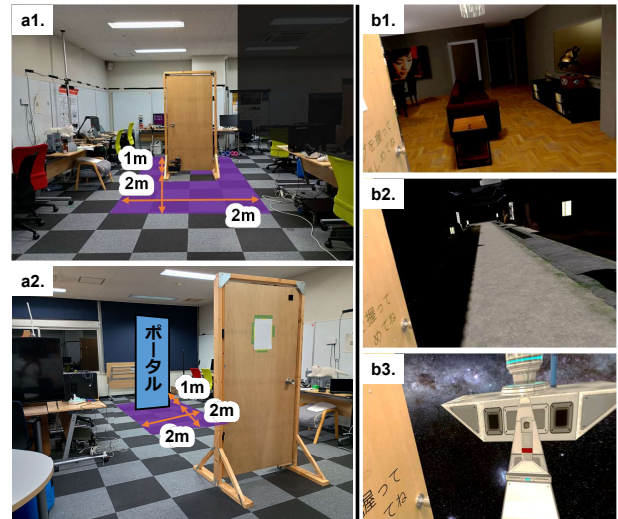


図 1: (a1.) 紫塗部はドア手法の場合のバーチャル環境の移動可能範囲との対応を示す。画像手前方向がバーチャル環境の奥方向に対応する。黒塗部は記憶課題から除くエリアを示す。(a2.) 紫塗部はポータル手法の場合のバーチャル環境の移動可能範囲との対応を示す。画像手前方向がバーチャル環境の奥方向に対応する。(b1.) リビングのバーチャル環境。(b2.) 日本の伝統的な町並みのバーチャル環境。(b3.) 宇宙空間のバーチャル環境。

2.3 実験装置

バーチャル環境はゲームエンジン (Unity, Unity3D) と HMD (Apple, Apple Vision Pro) によって実現する。手の位置や向きは HMD のハンドトラッキング機能で検出する。

ドア手法は幅約 80cm、高さ約 190cm の一般的なサイズの木製ドアによって実現する。ドアが開くにつれてバーチャル環境が見えるように、ドアの開閉度に応じてバーチャル環境の描画を制御する。ドアの開閉度はドアノブを握る手の位置から角度として算出され、物理ドアの開閉限度である 0 度から 95 度に制限される。ドアの開閉は左右どちらかの手でドアノブを握って行うことでのみ実施され、完全に開けるか閉じるかまで行わなければならない。一方で、遷移手法のうちポータル手法は HMD 以外に装置を必要としない。

バーチャル環境の環境音はオープンイヤー型ワイヤレスイヤホン (Anker, Soundcore V20i) で出力する。さらに、ドア手法ではドア下部に取り付けられたウーファ (Carrozzeria, TS-WX010A) から出力する。ウーファは環境音を 20Hz 以下に制限しドアを振動させる。ドア手法では環境音はドアの開閉度に応じて制御する。ドアが完全に閉じている場合は出力されず、ドアが完全に開いているときは最大出力となる。最大出力はイヤホンでは不快にならない音量、ウーファでは十分にドアが振動する強さとする。

どちらの遷移手法も HMD の位置と向きによってもバーチャル環境の描画を制御する。遷移手法の設置地点を基準にタスクの開始地点側に HMD があるときは実環境を表示し、その逆側ではバーチャル環境を描画する。ただし、遷移手法の周囲から回り込むことで遷移手法を介さずに HMD



図 2: (左上) ドア手法の場合にドアを開けるにつれて音と振動が強まる。(右上) ドア手法の場合にドアを完全に開けると音と振動が最大になる。(左下) ポータル手法の場合に振動はなく音は常に最大となる。(右下) ポータル手法の場合に常に実環境が表示される。

が地点を移動した場合は、直前にいた環境の表示と描画を維持する。なお、遷移手法が有効である限り、HMD が遷移手法に向くと遷移手法の設置地点には逆の環境を表示または描画する。ただし、最後に遷移手法を介して移動した側と逆に HMD がある場合と、ドア手法でドアが閉まっている場合は、逆の環境を表示または描画しない。

遷移手法の設置地点の認識には遷移手法の幅を規定する操作を行う。ドア手法では、操作者の右手人差し指をドアの右端に触れながら左手をサムズアップの形にする。ポータル手法では、作成するポータルの右端を想像して右手人差し指を空中に維持する。左端についても同様に指定をする。

2.4 測定方法

ユーザ体験は 6 つの主観指標と 1 つの客観指標で測定する。主観指標は Feld らの報告を参考に、Igroup Presence Questionnaire (IPQ), System Usability Scale (SUS), Flow Short Scale (FSS), Tech-Presence (TLP), NASA Task Load Index (NASA-TLX), Preference で測定する [8]。IPQ, SUS, FSS, TLP の回答は 7 段階のリッカート尺度である。NASA-TLX はグラフィカルな操作による 0-100 の評点である。Preference はドア手法とポータル手法の二者択一である。ただし、IPQ, SUS, FSS, NASA-TLX はその運用方法に従い集約値を用いる。

客観指標は遷移手法への参加者の反応として遷移回数で測定する。遷移回数は記憶課題への関与性に依りて変化が期待できる。具体的には、参加者の遷移手法を介した環境の移動回数を測定する。遷移手法を介して別の環境をのぞき込むなど完全な遷移以外の動作は除く。測定は実験者の目視により行う。

2.5 実験手順

参加者は以下の 5 ステップに従って実験を完了する。遷移手法の条件とバーチャル環境の種類は実験全体でカウン

タバランスをとる。実験時間は 1 時間半以内である。

- 1) 遷移手法を 1 回練習し音量を調節する。
- 2) 指定されたバーチャル環境で記憶課題を行う。
- 3) 3 つのバーチャル環境で 2) を繰り返す。
- 4) ユーザ体験の質問に回答する。
- 5) もう一つの遷移手法で 2)-4) を繰り返す。

2.6 参加者構成

参加者は、心身ともに健康な大学院生 24 人 (男 12 人, 女 12 人; 年齢 25-38 歳; 体格 平均 (標準偏差), 身長 164.4 (7.7) cm, 体重 59.7 (11.0) kg) であった。HMD を用いた VR 経験が全くない参加者は 10 人なのに対して、1 年以上の経験豊富な参加者は 2 人であった。質問は参加者の希望に合わせて日本語か英語で行われた。参加者は実験の説明を十分に受けてから実験協力に同意した場合に同意書に署名した。本実験は、筆頭著者が所属する機関の倫理審査委員会の承認を受けている (2025-I-4)。

2.7 解析方法

ユーザ体験はリッカート尺度および集約値であるため順序尺度となる。遷移回数はデータの背景から比例尺度とする。統計解析には対応のある Brunner-Munzel 検定と対応のある t 検定を用いる。効果量は Stochastic superiority の S と Cohen の d を用いる。 S の基準は Marmolejo らの報告を [9], d の基準は Cohen の報告を用いる [10]。有意水準は 0.05 である。統計解析ソフトには R を用いる [11]。

3. 実験結果

Preference 以外のユーザ体験の結果を図 3 に示す。Preference の結果は 24 人中 13 人 (54%) がドア手法を好んだ。ユーザ体験の全ての指標に遷移手法による有意差は生じなかった。得られた統計量は順に、IPQ ($t(23) = 0.23$, $p = 0.822$, $d = 0.05$), SUS ($t(23) = 1.30$, $p = 0.206$, $S = 0.44$), FSS ($t(23) = 0.53$, $p = 0.60$, $S = 0.53$), TLP ($t(23) = 0.99$, $p = 0.333$, $S = 0.42$), NASA-TLX ($t(23) = 1.11$, $p = 0.279$, $S = 0.42$), 遷移回数 ($t(23) = 0.19$, $p = 0.852$, $d = 0.04$) であった。

4. 考察

得られた全ての結果に有意差は生じなかった。したがって、仮説は棄却され、ドア手法がポータル手法に対してユーザ体験に差がないことが示唆された。これは今回参考にした記憶課題を課してユーザ体験を評価した Feld らの結果と同様の傾向である [8]。Feld らは Husung らの遷移手法を生態学的妥当性の高い記憶課題条件下で再評価した結果、特に Cut など効率的な遷移手法が高い臨場感とユーザビリティ、好みを予想に反して両立した [4]。実際に、本実験ではドア手法のユーザビリティの高さに言及した参加者が 1 人に対して、ポータル手法では 5 人であった。したがって、記憶課題条件下では、Husung が示した移動などによる運動や主体性を必要とするマルチモーダルな遷移手法による臨場感

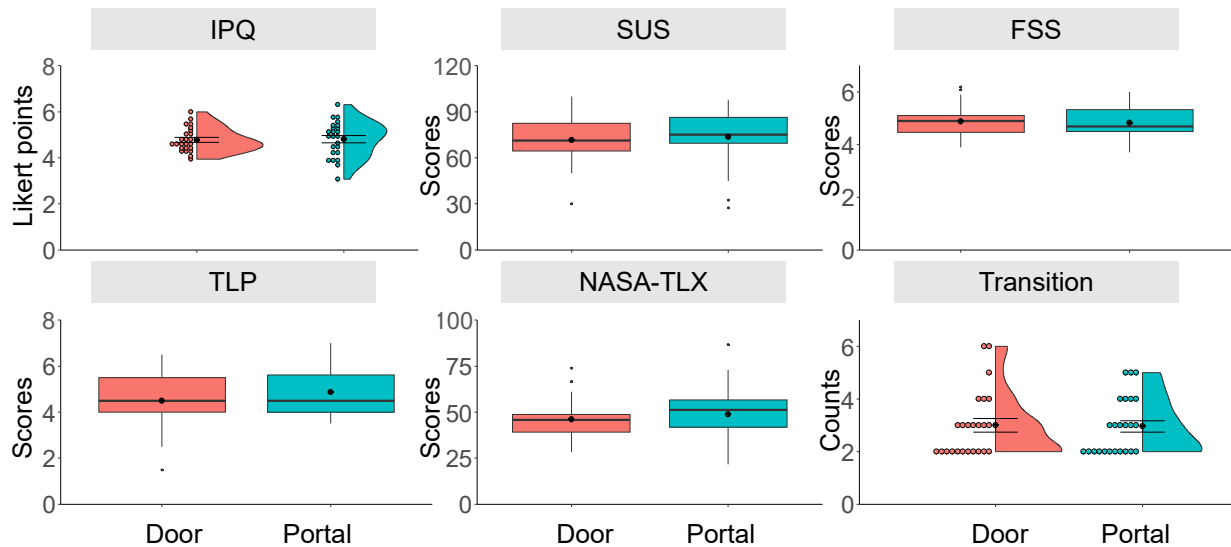


図 3: ユーザ経験のうち IPQ, SUS, FSS, TLP, NASA-TLX, 遷移回数 ($n = 24$)。代表点は平均値, 代表線は中央値, エラーバーは標準誤差を示す。

の向上効果よりも, シンプルでユーザビリティが高い遷移手法による向上効果のほうが強く表れたといえる。臨場感を直接高めないタスク条件下では臨場感を主観的に測定するのは困難であるという Slater の報告に, 記憶課題を課した本実験が当てはまることもこれを裏付ける [12]。

しかし, Preference の結果は 24 人中 13 人がドア手法を好んだ。加えて, コメントではポータル手法のほうが好みであったり臨場感が得られると述べている参加者は 2 人に対して, ドア手法では 7 人であった。これは前述の通りマルチモーダルな遷移手法に不利な条件であってもドア手法は好まれる可能性を示唆している。なお, ドア手法は実環境とバーチャル環境の隔たりを意識させ, バーチャル環境を異世界や異空間と感じる趣旨のコメントが 5 名からあった。したがって, ドア手法はバーチャル環境を実環境と区別して表現したい場合には有用性が認められると考えられる。

一方で, 今回の実験結果は前回の実験結果とも大きな差を生じなかった [7]。したがって, 今回用いた音と振動によるマルチモーダル化では, ユーザ体験でポータル手法と差をつけるには不十分であったといえる。なお, 参加者は必ず一度はドアを開けることでバーチャル環境の音が大きくなることを体感できる実験設計であったため, 刺激が不十分であった可能性は低い。

5. おわりに

本研究では, ドアの構造的特徴を生かすことでさらにマルチモーダル性を高めたドア手法がポータル手法に比べて, ユーザ体験を向上させることに期待しその影響を明らかにした。その結果, Igroup Presence Questionnaire, System Usability Scale, Flow Short Scale, Tech-Presence, NASA Task Load Index, Preference, 遷移回数において, ドア手法はポータル手法に対して有意差のある向上効果を示さなかった。一方で, 24 人中 13 人がドア手法をポータル手法よりも好む結果が示された。したがって, 本研究の仮説は

棄却されたがドア手法の発展の将来性に一部期待できる傾向が示唆された。今後は, 空間音響を実装するなどさらにも実環境でドアを使った遷移に近いドア手法を開発しその有用性を検証する。

参考文献

- [1] Jonas Auda, et al. A Scoping Survey on Cross-reality Systems. *ACM Comput. Surv.*, Vol. 56, No. 4, pp. 83:1–83:38, 2023.
- [2] Frank Steinicke, et al. Does a Gradual Transition to the Virtual World Increase Presence? In *Proc. of the 2009 IEEE Virtual Reality Conference*, VR '09, pp. 203–210, 2009.
- [3] Dimitar Valkov and Steffen Flagge. Smooth Immersion: The Benefits of Making the Transition to Virtual Environments a Continuous Process. In *Proc. of the 5th Symposium on Spatial User Interaction*, SUI '19, pp. 12–19, 2017.
- [4] Malte Husung and Eike Langbehn. Of Portals and Orbs: An Evaluation of Scene Transition Techniques for Virtual Reality. In *Proc. of the Mensch Und Computer 2019*, MuC '19, pp. 245–254, 2019.
- [5] Patricia Cornelio, et al. Multisensory Integration as per Technological Advances: A Review. Vol. 15, No. 1, 2021.
- [6] Yukai Hoshikawa, et al. RedirectedDoors+: Door-opening redirection with dynamic haptics in room-scale VR. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 30, No. 5, pp. 2276–2286, 2024.
- [7] Takara Fujisawa, et al. Seamless Multi-Modal Transitions between Real and Virtual Environments Using a Physical Door Enhances Presence and User Engagement. In *ICAT-EGVE 2024*. The Eurographics Association, 2024.
- [8] Nico Feld, et al. Keep it simple? Evaluation of Transitions in Virtual Reality. In *Extended Abstracts of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '23, pp. 1–7. Association for Computing Machinery, 2023.
- [9] Fernando Marmolejo-Ramos, et al. Appraisal of Space Words and Allocation of Emotion Words in Bodily Space. *PLOS ONE*, Vol. 8, No. 12, p. e81688, 2013.
- [10] Jacob Cohen. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Routledge, 2 edition, 1988.
- [11] R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2025.
- [12] Mel Slater. How Colorful Was Your Day? Why Questionnaires Cannot Assess Presence in Virtual Environments. *Presence*, Vol. 13, No. 4, pp. 484–493, 2004.