

VR 体験中に起こるプレゼンス障害の連続的な評価

Continuous Evaluation for Breaks in Presence in VR

シルム ヨハネス¹⁾, ペルスキアエルナンデス モニカ¹⁾, 平尾 悠太郎¹⁾, 内山 英昭¹⁾, 清川 清¹⁾

Johannes SCHIRM, Monica PERUSQUIA-HERNANDEZ,

Yutaro HIRAO, Hideaki UCHIYAMA, and Kiyoshi KIYOKAWA

1) 奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 (〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5)

概要: 一般に「臨場感」とも呼ばれる「プレゼンス」は、VR の重要な指標である。本研究では、VR 体験が終わった直後にその体験の録画を再生し、実物のスライダを持たせたユーザーに体験を振り返らせて連続的にプレゼンスを評価させている。このデータからは、プレゼンスが一時的に著しく低下する「プレゼンス障害」が発生するタイミングを特定できる。実験の結果、プレゼンスの PI と Psi という 2 つの次元に亘って、障害の強さの順位が分かった。

キーワード: プレゼンス, バーチャルリアリティ, プレゼンス障害, HMD

1. はじめに

本研究では、主観的評価や様々なセンサから得られる情報を用いてバーチャルリアリティ (VR) を体験中のユーザーが覚える「プレゼンス」という錯覚が一時的に崩れる瞬間、いわゆるプレゼンス障害の特徴を調査することを目的としている。プレゼンスとは、Slater [1] によれば、ユーザーにバーチャル環境に対して「自分がそこに居る」と感じさせると同時に、バーチャル環境の物事に実在感を覚えさせる錯覚である。目の錯覚と同様、プレゼンスについても本人が理性では錯覚だと分かっている。

Slater によれば、ユーザーに「自分がそこに居る」と臨場感を感じさせる錯覚は「Place Illusion (PI)」と呼ばれ、感覚運動が可能なバーチャル環境では比較的簡単に生じる。一方で、「Plausibility Illusion (Psi)」と呼ばれる錯覚は、ユーザーに VR での出来事が「実際に起きている」ともっともらしさを感じさせるもので、ユーザーの潜在的な期待に沿ったバーチャル環境に限って生じる。例えば、物体は基本的に重力で下に落ち、バーチャル人間は自分に気づき目をやる。

あるバーチャル環境においてユーザーがどのくらいプレゼンスを覚えているかを推定しようとした研究は多く行われているが、プレゼンスとほかの要素の識別が非常に困難であることが課題であった。Slater はこの課題を逆の観点からアプローチしている。PI と Psi のどちらかの錯覚が何らかの理由で一時的に崩れた瞬間は、VR 体験全体のプレゼンスが低下する。プレゼンスの絶対的な水準より、その低下の瞬間の方が判りやすいと、Slater らがプレゼンス障害 [2]、「Break in Presence (BIP)」を提唱した。図 1 に BIP の特徴的な時間経過を示す。最初は BIP の無い VR 体験でプレゼンスが高い水準まで上がるが、描画の問題や VR 内の不自然な出来事などで BIP が瞬間的に発生する。

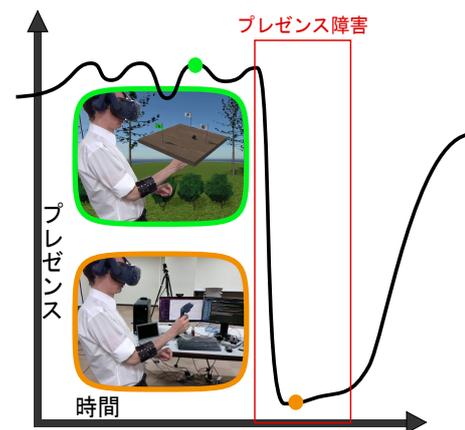


図 1: VR を体験中に「プレゼンス障害」が起こるときのプレゼンスの典型的な推移。5~10 秒の低下が一般的だが、プレゼンス障害の原因によってそれより長いパターンもある。

本稿では、ユーザーの VR 体験中の映像を記録しておき、体験の直後にその映像を再生しながら行う、連続的なプレゼンスの主観的評価に着目した評価実験について報告する。実験のタスクとしては、ビー玉転がしに似た、半永久的に続けられる運動ゲームを用いた。タスクの途中に人為的に起こした BIP は 3.1 節で述べるように 4 種類があり、PI も Psi も低下させるものも、片方だけを低下させるものも用いた。BIP ごとに、連続的な主観的評価のカーブから障害強度と回復時間などを数値化し、統計的に分析した。

その結果、用いた 4 種類の BIP の強さを順位付けできた。PI も Psi も低下させる種類がもっとも強く、片方だけを低下させる種類はその下の同レベルを占めた。意外なことに、フレームレートを低下させた BIP がもっとも弱く、PI も Psi もそこまで低下させないことが示唆された。

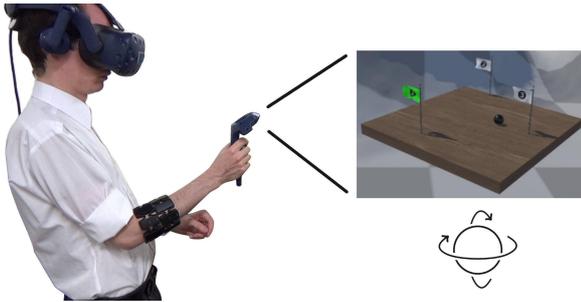


図 2: コントローラと VR 上で運動する板

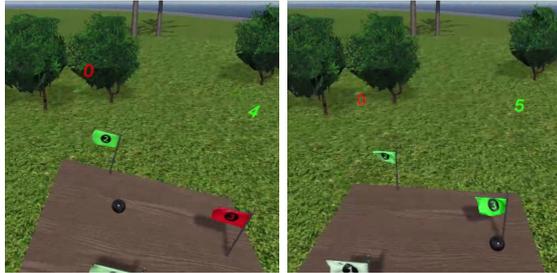


図 3: ビー玉を転がすゲーム

2. 関連研究

VR 分野では、プレゼンスに関する研究が数多く行われている [3]. その中でプレゼンス障害 (BIP) に着目した研究は少なく、まだ広く知られていない. BIP には大きく 2 種類、VR 体験中に自然に起こる「内因性 BIP」と、実験者がユーザの反応を研究するために意図的に起こす「誘発性 BIP」が存在する. 特に Slater らが最初に行った研究では内因性 BIP の発生総数を数えることが中心となっていた [4]. しかし、BIP 中に解析するデータが増え、発生条件がより細かく管理できる誘発性 BIP が一般的な研究手法となった [7].

本研究では、BIP の評価方法として事後の連続的プレゼンス評価を採用している. BIP に関する研究が比較的に少ない中、「プレゼンスのカーブ」を分析しようとする研究がさらに少ないものの、アンケートより細かい粒度で評価をしてもらえ、生理学的なデータより解釈が容易である、というメリットが挙げられる. Mai らの研究では、実験参加者と相談しながらプレゼンスのカーブを描いてもらうことで評価が行われた [6]. 本研究のアプローチともっとも類似する Chung らの研究では、実験参加者に各々の VR 体験の映像を見せ、スライダでプレゼンスを評価させた [5].

3. 実験

3.1 概要

本実験では、参加者に VR で連続的な運動タスクを行わせ、人為的に起こしたプレゼンス障害 (BIP) に対する反応を調査した. タスクは、図 2 に示すように片手でコントローラを持ちながら、バランスを取るゲームである. ゲームの流れは、図 3 に示す VR 上の木の板を傾けて、ビー玉迷路と似た感覚で、ビー玉を繰り返し 3 つの旗のいずれかに時間内に接触させることである. タスクが終わったあとに、各



図 4: 実験室の様子

参加者に自分の VR 体験の録画を見せ、そのときのプレゼンスの推移をスライダで評価させた.

実験に用いた BIP の種類は、以下に示す 4 種である. PI と Psi の片方だけを操作する BIP は、もう片方にも少々影響はしているが、主な効果は片方だけに期待される.

- **Whiteout:** 【PI/Psi 障害】HMD の画面が真っ白になり、バーチャル環境が完全に見えなくなる
- **Tracking:** 【PI 障害】VR 上の頭の位置がフリーズし、頭を動かしても VR 内の視点が変わらない
- **Gravity:** 【Psi 障害】バーチャル環境内の重力が反転され、ビー玉が坂を登って転がる
- **LowFPS:** 【PI/Psi 障害】フレームレートが 90 Hz から 10 Hz まで下がり、画像がかくつく

1 つの VR 体験でそれぞれの種類が合計 4 回発生するように順番がランダムに決められた. 1 回の BIP は 10 秒間つづき、発生時点から 30 秒間はほかの BIP が発生しないようにタイミングが調整された. 実験参加者には BIP の存在や概念などを説明しない状態で実験を開始した.

実験システムは Unity 2022.3.18f1 (LTS) で開発し、制御用 PC (OS: Windows 10 (18363), CPU: Intel Core i7-10700, GPU: GeForce GTX 1660 (6 GB), RAM: 16 GB (PC4/DDR4)) と HTC VIVE Pro Eye を用いて実装した.

3.2 実験手順

実験は、図 4 に示す研究室内の静かな部屋で下記の実験手順に従って実施された.

1. 同意書に同意し、プレゼンスの説明を口頭で受ける.
2. HMD を装着し、利き手にコントローラを持つ.
3. ゲームのルールの説明を受け、初期設定を行う.
4. 1 分間ゲームを練習した後、不明点などを確認する.
5. 10 分間ゲームを実施しながら 30 秒間隔で 10 秒の BIP を体験する.
6. VR 上で 5. の 10 分間のゲーム体験の録画を観ながらプレゼンスをスライダで評価する.
7. VR 上でプレゼンスの総合的なアンケートとプレゼンス障害のアンケートに回答する.
8. HMD を外し、実験者との自由なインタビューで人口データや体験の感想を述べる.



図 5: プレゼンス評価用スライダ. 実験参加者が自身の VR 体験の動画を観ながらスライダを動かしてプレゼンスを連続的に評価する.

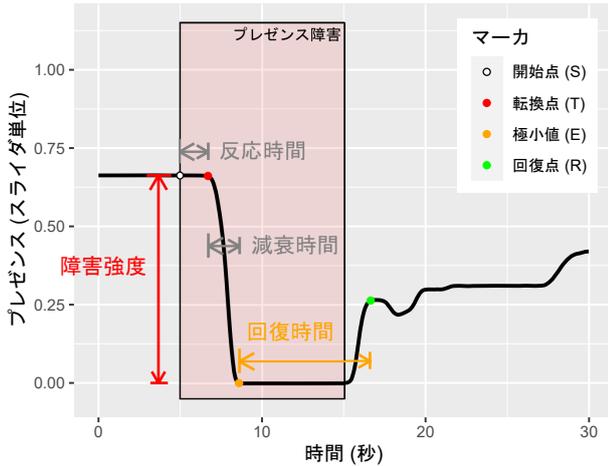


図 6: プレゼンス障害に関連するパラメタ

3.3 評価項目

VR 体験の直後に、図 5 に示すスライダを参加者に持たせ、体験中に録画した映像をバーチャル環境内の「テレビ」をイメージした枠で再生した。参加者は再生されている映像に合わせて、そのときのプレゼンスの度合いを思い出し 0 (スライダの一番左) から 1 (スライダの一番右) の範囲内で評価した。こうして参加者が体験の全体に亘って描いたカーブ (プレゼンスの推移) から、BIP ごとに図 6 に示す、4 つのマーカを抽出した。

- 開始点 (S): システムが BIP を発動する時点
- 極小値 (E): 開始点と次の BIP の間で時間の早い、開始点でのプレゼンス値から最も離れている値
- 転換点 (T): 開始点と極小値の間で時間の遅い、極小値でのプレゼンス値から最も離れている値
- 回復点 (R): 極小値と次の BIP の間で時間の早い、(1) 極小値でのプレゼンス値から最も離れている値か、(2) 転換点でのプレゼンス値と同じ値

BIP ごとのマーカから、次の 4 つのパラメタを算出した。

- 障害強度: $T_{\text{プレゼンス}} - E_{\text{プレゼンス}}$, BIP の全体的な強さ
- 反応時間: $T_{\text{時間}} - S_{\text{時間}}$, 参加者が BIP に気付く時間
- 減衰時間: $E_{\text{時間}} - T_{\text{時間}}$, 極点に達する時間 (激しさ)
- 回復時間: $R_{\text{時間}} - E_{\text{時間}}$, 極点から回復するまでの時間

評価基準に無視できない個人差が予測されることから Chung らと同様、各参加者と各パラメタで算出した Z 得点の基に統計的分析を行う [5, p. 519].

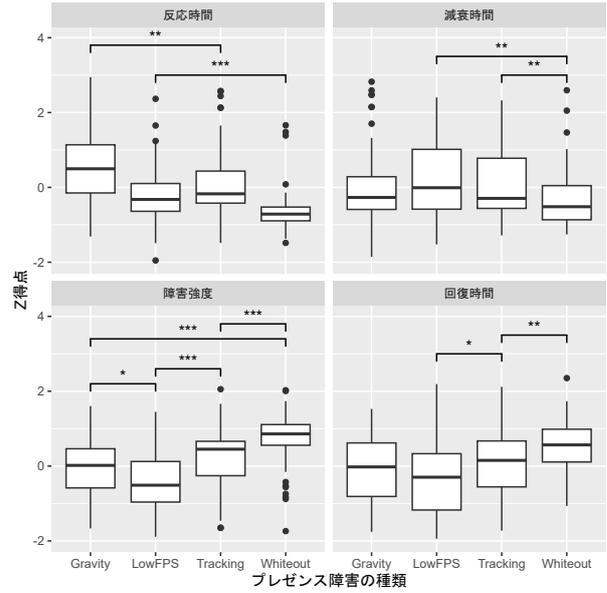


図 7: 全被験者 ($n = 28$) のパラメタの Z 得点

表 1: パラメタごとの統計的分析の結果

反応時間	減衰時間	障害強度	回復時間
$p < 0.001$	$p < 0.01$	$p < 0.001$	$p < 0.001$
Whiteout $\bar{X} \approx -0.639$	Whiteout $\bar{X} \approx -0.346$	Whiteout $\bar{X} \approx 0.738$	Whiteout $\bar{X} \approx 0.557$
⊖	⊖	⊖	⊖
$p < 0.001$	$p < 0.01$	$p < 0.001$	$p < 0.01$
$\Delta \bar{X} \approx 0.491$	$\Delta \bar{X} \approx 0.480$	$\Delta \bar{X} \approx 0.499$	$\Delta \bar{X} \approx 0.478$
LowFPS $\bar{X} \approx -0.148$	Tracking $\bar{X} \approx 0.134$	Tracking $\bar{X} \approx 0.239$	Tracking $\bar{X} \approx 0.079$
⊖	⊖	⊖	⊖
$p \approx 0.3547$	$p = 1$	$p \approx 0.0957$	$p < 0.05$
$\Delta \bar{X} \approx 0.257$	$\Delta \bar{X} \approx 0.153$	$\Delta \bar{X} \approx 0.326$	$\Delta \bar{X} \approx 0.459$
Tracking $\bar{X} \approx 0.109$	LowFPS $\bar{X} \approx 0.287$	Gravity $\bar{X} \approx -0.087$	LowFPS $\bar{X} \approx -0.380$
⊖	-	⊖	-
$p < 0.01$	$p = 1$	$p < 0.05$	$p \approx 0.5496$
$\Delta \bar{X} \approx 0.450$	-	$\Delta \bar{X} \approx 0.580$	-
Gravity $\bar{X} \approx 0.649$	Gravity $\bar{X} \approx 0.026$	LowFPS $\bar{X} \approx -0.667$	Gravity $\bar{X} \approx -0.109$

4. 実験結果

実験参加者 実験には合計 28 人中、日本人 16 人および外国人 12 人 (男性 19 人、女性 9 人; 平均年齢: 29.0 歳, SD: 7.1) が参加した。報酬として 1000 円を支給した。

統計的分析 3.3 節のパラメタの Z 得点を BIP 種類ごとに図 7 に示す。それぞれのパラメタで BIP 種類を順位付けするための統計的分析の結果を表 1 に示す。統計的分析の手法は、全パラメタで同様である。

まず、パラメタの値を参加者ごとに Z 得点に変換し、BIP 種類と繰り返しという 2 つの因子で 2 元 Friedman 検定を行った。すべてのパラメタで有意差が確認され、 p 値を表 1 の 2 行目に記した。次に、Dunn の順位検定と Bonferroni 法によって下位検定を実施し、BIP 種類間で確認できた有

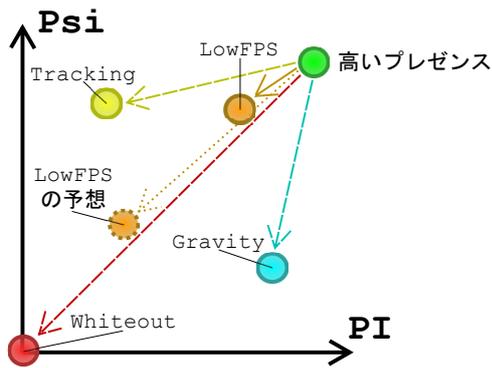


図 8: 各 BIP 種類と PI/Psi の推測される関係の模式

意差に基づき BIP 種類を順位付けした。減衰時間と回復時間で、Gravity を順位を付けるための有意差ほどの BIP 種類でも確認できず、表 1 でグレーアウトしている。

表 1 に、BIP 種類ごとの平均値 (\bar{X}) および BIP 種類間の平均値の差 ($\Delta\bar{X}$) を Z 得点の標準偏差で示す。順位内の関係は、グレーアウトされたものを除き、BIP 種類間で $\textcircled{\Delta}$ (以上の全項目が以下の全項目より小さい、有意差あり)、 $\textcircled{=}$ (上下の 1 項目が等しい、有意差なし)、 $\textcircled{\nabla}$ (以上の全項目が以下の全項目より大きい、有意差あり) で示す。

5. 考察

バーチャル環境が全く見えなくなる Whiteout という BIP は、障害強度が高く、回復時間が長く、反応時間が短く、減衰時間が短く、評価項目のどれにおいても最も強かったことが確認できた。障害強度の順位で次に強かったのは、頭の動きが反映されなくなる Tracking と、ゲームの重力が反転される Gravity である。その 2 つよりも弱かったのは、フレームレートが劇的に落ちる LowFPS である。

減衰時間と回復時間における Gravity ではバラツキが大きく有意差が認められなかったことから、Psi だけを操作する BIP を認識し、VR 体験への影響を見計らうには比較的大きな個人差があると考えられる。

以上の BIP の順位を解釈するには、Slater のモデルではプレゼンスが PI と Psi という 2 次元に分かれていることが関連する。この 2 つの次元を独立には計測していないが、プレゼンスがその和であることから、推測はある程度可能である。Tracking では主に PI が障害され、Gravity では主に Psi が障害されることを考慮すると、実験結果と PI/Psi が図 8 に示す関係にあることが合理的な解釈として考えられる。Whiteout では PI も Psi も崩れ、障害強度が最も強く、矢印が最も長い。しかし、Tracking と Gravity では PI か Psi 片方しか大きく影響を受けないため、1 つの次元に沿うように矢印がいずれも並みの長さになる。

LowFPS に関しては、結果が予想と違っている。PI にも Psi にも並みの影響があると、図 8 で「LowFPS の予想」と示されている点を予想した。しかしながら、その度合いが予想より小さいという結果が確認された。

6. おわりに

本稿では、VR を体験中のユーザに人為的なプレゼンス障害 (BIP) を体験させ、BIP 種類ごとに障害強度などを評価した実験について報告した。視界を真白にする BIP が当然ながら最も強く、その場に居るという錯覚 (PI) とその場の出来事が本当に起きているという錯覚 (Psi) をそれぞれ崩した BIP が中間にあり、フレームレートを落とした BIP が最も弱かった。

実験結果には大きく 2 点、一般的な VR 開発でのプレゼンス向上のための指針にもなる点が示唆された。コンテンツのもっともらしさとも言える Psi が、トラッキングの安定性などといった技術的な要素と同等の重要性を持っている。また、フレームレートの低下がプレゼンスに与える影響は比較的小さく、トラッキングの乱れや映像の途絶えの方が優先的に対策すべきである。

しかしながら、本稿での考察はあくまで推測にすぎず、今後詳細な評価実験が必要である。特に事後の連続的な主観的評価で VR 体験中のプレゼンスが正しく反映されているかという点が挙げられる。また、LowFPS の比較的の低い評価の理由の解明も今後の課題とする。

参考文献

- [1] Mel Slater: Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, Vol. 364, No. 1535, pp. 3549–3557, 2009.
- [2] Mel Slater and Anthony Steed: A Virtual Presence Counter, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 9, No. 5, pp. 413–434, 2000.
- [3] Richard Skarbez, Frederick P. Brooks, and Mary C. Whitton: A Survey of Presence and Related Concepts, *ACM Computing Surveys*, Vol. 50, No. 6, 2017.
- [4] Andrea Brogni, Mel Slater and Anthony Steed: More Breaks Less Presence, *The 6th Annual International Workshop on Presence*, 2003.
- [5] Jaeyong Chung and Henry J. Gardner: Temporal Presence Variation in Immersive Computer Games, *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol. 28, No. 8, 2012.
- [6] Christian Mai, Niklas Thiem and Heinrich Hussmann: Temporal Presence Variation in Immersive Computer Games, *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol. 3, No. 4, 2019.
- [7] Maia Garau, Doron Friedman, Hila Ritter Widenfeld, Angus Antley, Andrea Brogni and Mel Slater: Temporal and Spatial Variations in Presence: Qualitative Analysis of Interviews from an Experiment on Breaks in Presence, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 17, No. 3, pp. 293–309, 2008.