

移動履歴を遡れる Virtual Reality 空間の移動手法

増子 恭平^{1,a)} 井尻 敬¹

概要: テレポートは、ポインティングした場所に瞬間移動できる Virtual Reality (VR) 空間の移動方法である。この手法は、一度に移動できる距離に限界があるため長距離移動の際にはたくさんの操作と時間が必要となる。そこで本研究では、同一地点に複数回訪問するような VR 空間の探索を効率化することを目的とし、訪問履歴を活用した移動手法を提案する。提案手法において、まずユーザはテレポートを利用して VR 空間を移動する。このとき、テレポートにより移動した場所は訪問履歴として記録され、ユーザはいつでも履歴に登録された場所を選択し移動できる。提案手法の有用性を確認するため、提案手法とテレポートを比較するユーザスタディを実施した。実験参加者は、提案手法とテレポートそれぞれを利用して中規模の都市を模した VR 空間を探索するタスクを遂行した。結果、提案手法が探索にかかる時間を短縮できる傾向は確認できなかった一方で、提案手法を利用するとより少ない移動操作で VR 空間の探索を行える可能性が観察された。

1. はじめに

安価な Head Mounted Display (HMD) が普及し、多くのユーザが Virtual Reality (VR) アプリケーションを体験できる環境が整いつつある。VR アプリケーションにおいて、ユーザは広大な空間を探索できる一方で、現実世界では物理的に移動できる空間が制限される。そのため、限られた実空間を利用して、VR 空間を自由に移動できる方法が必要とされている。

実際、VR 空間を移動するための多くの移動手法が提案されている。特に、本研究に関連の深いものとして、VR コントローラでポインティングした場所へ瞬間移動するテレポート [1] や、VR 空間のミニチュアを用いて俯瞰視点から自身の位置を操作する World in Miniature [2] が挙げられる。これらの手法は、酔いが発生しにくく効率的な移動手段を提供する。しかし、テレポートには、長距離移動の際には多くの操作が必要であるという課題がある。また、World in Miniature には、一度訪問した場所にもう一度戻りたい場合でも、他の場所への移動と同様の操作が必要になるという課題がある。

本研究では、同一地点に複数回訪問するような VR 空間探索の効率化を目的とし、訪問履歴を活用した移動手法を提案する (図 1)。提案手法において、ユーザがテレポートにより VR 空間を移動すると、テレポートにより訪問したすべての場所が履歴に登録される。この訪問履歴は、手

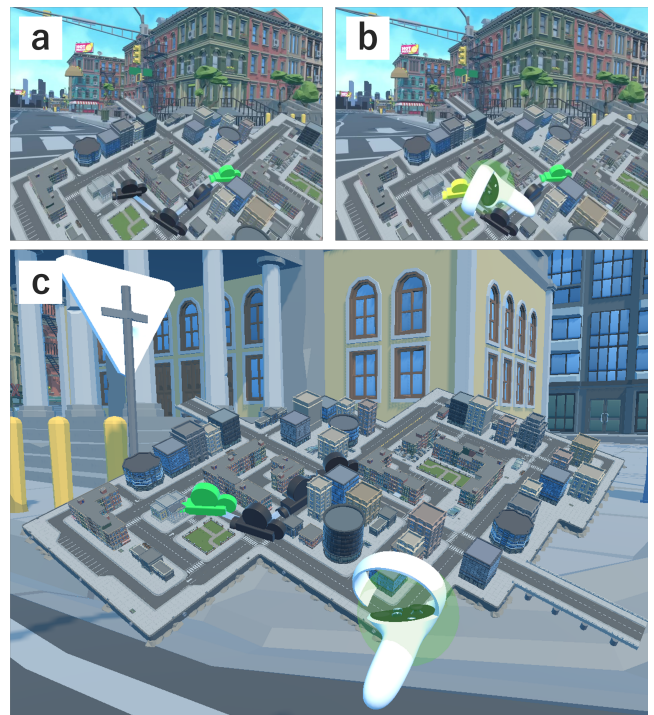


図 1 ユーザの訪問履歴はミニチュア上にカメラ型のオブジェクトとして可視化される (a)。ユーザがミニチュア上のカメラオブジェクトに触れると、訪問履歴が選択状態となり (b)、さらに、コントローラのトリガーを引くと選択した履歴位置へ移動する (c)。

元のミニチュア上に可視化され、ユーザはミニチュア上の点を選択することで、過去に訪問した場所に移動できる。提案手法では、一度訪れた場所を選択操作のみで移動可能

¹ 芝浦工業大学

^{a)} ma21137@shibaura-it.ac.jp

なため、広大な VR 空間での探索を効率化できると期待される。

提案手法の有用性を確認するため、提案手法とテレポートを比較するユーザスタディを実施した。このユーザスタディにおいて、実験参加者は、中規模の都市を模した VR 空間を探索するタスクをテレポートと提案手法を用いて実施した。結果、提案手法を利用することで、探索の完了までにかかった時間が短くなる傾向は確認できなかったものの、より少ない移動操作で探索タスクを完了できる可能性が示唆された。

2. 関連研究

VR 空間の移動は重要な課題であり、様々な研究がなされている。既存手法はだまかに、モーションベース、コントローラーベース、テレポーターションベースに分けられる [3]。本章では、既存手法の中でも本研究と特に関連の深い、テレポート、及び、World in Miniature という 2 つの VR 空間移動手法について紹介する。

2.1 テレポートによる VR 空間の移動

テレポートとは、VR 空間のある地点からある地点へ瞬間的に移動する非連続的な移動手法である。Bozgeyikli らの提案した Point&Teleport [1] は、VR コントローラによりポインティングした地点へ瞬間移動する移動手法であり、効率的で VR 酔いを引き起しにくいという利点 [4], [5] から広く利用されている。

テレポートによる移動の様々な拡張が提案されている。Markus らは、テレポート時にトラックパッドやジョイスティック操作によりテレポート後のユーザの向きを指定できる手法 [6] を提案した。Pauline らは、テレポート時にアンカーとテレポート先を指定することでテレポート後にユーザがアンカーを向くように姿勢が調整される手法 [7] を提案した。他にも、テレポートできる距離に制限を設けることで空中へのテレポートが可能となる SkyPort[8] などが提案されている。しかし、これらのテレポートに基づく手法では、近距離であれば効率的な移動が可能であるものの、長距離移動の際にはたくさんの移動操作が必要となるという課題が存在する。

2.2 World in Miniature による VR 空間の移動

World in Miniature (WIM) [2] は、VR 空間全体をミニチュアとしてユーザの手元に表示するインタフェースである。WIM では、ユーザがミニチュア上のオブジェクトに位置変更などの編集を加えると VR 空間にも同様の編集がなされる。WIM において、ユーザは、1 人称視点と俯瞰視点を自由に行き来できるため、効率的な空間デザインが可能となる。また、Wingrave ら [9] は、大規模な VR 空間に対しても操作しやすいミニチュア可視化を行うため、

ミニチュアを拡大・縮小・スクロールできる Scaled and Scrolling WIM を提案した。

WIM において、ミニチュア内の自分自身を表すアバターを動かすことで、ユーザは自身の視点位置を変えることができるため、WIM は移動のための手法と考えることもできる。WIM による移動は、Point&Teleport [1] やジョイスティックによる平行移動と比較して、必要な操作が多いため使いづらい可能性がある一方で、長距離を高速で移動できることが知られる [10]。また、David ら [11] は、球体上に WIM を投影し、球体の移動操作や回転操作で WIM を拡大・縮小・スクロールできる Spherical WIM を提案した。増子ら [12] は、視点の行き来の効率化を目的とし、ミニチュア上に複数の視点を配置し、振り向くだけで事前に配置した視点に移動できる TrunTeleport を提案した。しかし、これら WIM による移動手法では、何度も同じ場所へ訪問するような探索の効率化は考慮されておらず、どの地点に移動するとしても同様の移動操作をする必要がある。

WIM による移動と似た手法として、没入感を損なわず連続的かつ長距離の移動の実現を目的とし、一時的に 3 人称視点を提供することで移動の効率化を目指した研究が行われている。Griffin らは、移動時にユーザの視点から 1 人称から 3 人称に切り替わり、ユーザは自身を表すアバターをコントローラ操作により移動できる Out-of-body Locomotion[13] を提案した。また、Cmentowaki らの Outstanding [14] でも、移動時にユーザの視点が 1 人称から 3 人称に切り替わり、ユーザは自身を表すアバターをポインティングにより移動できる。しかし、これらの手法では、コントローラ操作によりアバターを連続的に移動させる操作が必要があり、アバターの移動距離が長くなればなるほど移動に長い時間がかかる。

3. 提案手法

本研究では、同一地点に複数回訪問するような VR 空間の探索を効率化することを目的とし、訪問履歴を再利用できる手法を提案する。提案手法において、ユーザは、テレポートにより VR 空間を自由に移動でき、テレポートにより訪問したすべての場所は訪問履歴に記録される。この訪問履歴は、手元のミニチュア上に可視化され、ユーザはミニチュア上の訪問履歴を選択することで、過去に訪問した場所に移動できる。提案手法では、一度訪れた場所を選択操作のみで移動可能なため、広大な VR 空間における探索の効率化が期待される。なお本研究では、提案手法の実装には、スタンドアロン型 Head Mounted Display (HMD) である Meta Quest2 と付属コントローラを利用する。

3.1 テレポートによる訪問履歴の登録

提案手法は、実空間の歩行のみでは探索が難しい、中規模の都市のような VR 空間の探索を想定している。提案手

法において、ユーザはジョイスティックを利用した一般的なテレポートにより、VR空間を探索できる。ユーザが右コントローラのジョイスティックを傾けるとテレポートが有効化され、コントローラからテレポート先の地面へのレイが表示される。ユーザはコントローラを地面に向けてことでテレポートしたい地点をポインティングし、ジョイスティックを元の姿勢に戻すとポインティングした地点に瞬間的に移動できる。

テレポートによるすべての移動は訪問履歴に追加される。提案手法は、訪問履歴を木構造を用いて管理する。木構造の各ノードは、テレポートにより移動した場所に対応し『テレポート地点の3次元座標』の情報を保持する。また、各ノードは、そのノードへ移動する直前のテレポート先を親ノードとして保持する。例えば、現在地点Aからテレポートにより地点Bに移動した際、地点Aの訪問履歴の子に地点Bの訪問履歴が記録される。また、一度地点Aへ戻ってから別の地点Cへテレポートすることで、地点Aは複数の子ノードを持つことになる。この木構造を用いた管理により、訪問した場所だけでなく、訪問した順序も可視化可能になる。

3.2 WIMを用いた訪問履歴の可視化と利用

提案システムは、訪問履歴の可視化のために、WIM [2] を応用したユーザインタフェースを提供する。ユーザが右コントローラのジョイスティックに触れている間、VR空間全体のミニチュアが手元に表示される(図1c)。このミニチュアは、コントローラのグラブボタンを押すことで把持でき、左右両方のコントローラのグラブボタンを押すことで両手で把持し拡大縮小を行える。各訪問履歴はカメラ型のオブジェクトとしてミニチュア上で可視化され、親子関係にあるカメラオブジェクト間は線分で結ばれる。また、ユーザの現在地点を示すカメラオブジェクトは緑色で可視化され、それ以外は黒色で可視化される。ユーザが自分自身の姿勢を把握しやすいように、ユーザの現在地点を示すカメラオブジェクトは、ユーザのHMDと同期して回転する。このミニチュア表示とテレポート操作は、同じ右コントローラのジョイスティックを用いて行われるため、テレポート移動のためにジョイスティックを倒した時にもミニチュアが表示されることに注意してほしい。

ユーザは、好きなタイミングで、ミニチュアを呼び出し過去に訪問した場所へ移動できる。まずユーザは、右コントローラのジョイスティックに触れてミニチュアを表示し(図1a)、左右どちらかのコントローラを利用して直接ミニチュア上のカメラオブジェクトに触れ(図1b)、コントローラのトリガーを引くと、選択した訪問履歴位置へ瞬間的に移動できる(図1c)。ここで、コントローラで触られたカメラオブジェクトは選択状態となり黄色で可視化され、コントローラが離れると黒色に戻る。コントローラが



図2 実験で利用する、4つのパターンでチェックポイントが配置されているVR空間。

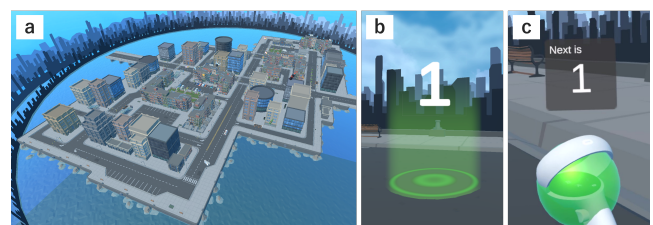


図3 実験で利用した都市を模したVR空間の俯瞰図(a)と、VR空間内に配置されているチェックポイントの外観(b)と、次に到達すべきチェックポイントの番号が表示されるパネルUI(c)。

複数のカメラオブジェクトに触れている場合は、最後に触れたカメラオブジェクトのみが選択状態となる。

4. ユーザスタディ

提案手法の有用性を確認するため、テレポートと提案手法を比較するユーザスタディを実施する。なお、ここでは、おおよそ300m×300mの規模のVR空間において、同じ場所を複数回通る必要のある探索を仮定する。このユーザスタディを実施するにあたり、2つの仮説を立てる。

- VR空間を行き来する必要があるタスクでは、提案法を利用したほうがテレポートを利用するよりも速くタスクを完了できる。一度訪れた場所に移動する際、テレポートでは目的地が遠いほど必要な移動操作が増えるが、提案法では距離に関係なく一回の移動操作で目的地へ移動できる。そのため、提案法を利用するとタスクを早く完了できると考えられる。
- 2つの移動方法を利用した場合のプレセンスは同程度となる。提案手法・テレポートの両者ともに、瞬間的な移動を伴うため、これらを利用した場合にユーザが

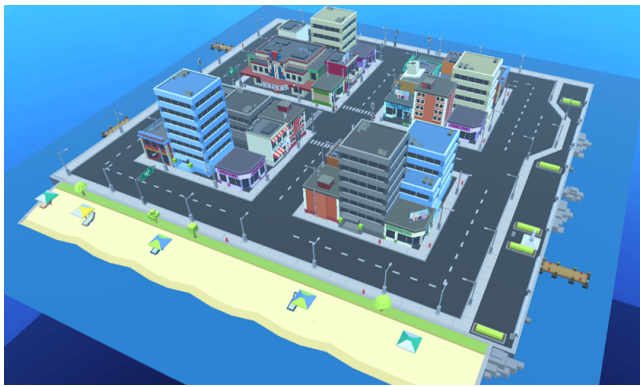


図 4 テレポートと提案手法の練習に利用した VR 空間。

感じるプレゼンスは似たものとなると考えられる。

4.1 タスク

本研究では、複数のチェックポイントが配置された VR 空間にて、すべてのチェックポイントを指定された順番に訪問することを 1 回のタスクとする。実験にはサイズが $300m \times 300m$ の仮想的な都市の VR 空間を利用する (図 2, 3a)。この VR 空間には 1 から順に番号が振られた複数のチェックポイントが配置されている (図 3b)。本研究では、チェックポイント配置の異なる 4 通りの VR シーン (A, B, C, D) を準備する (図 2)。なお、チェックポイントに振られた番号がそのチェックポイントを訪問すべき順番を示す。

チェックポイントは直径は $3m$ の円で VR 空間の道の上に配置される。チェックポイントの番号がどの方向からでも読み取れるように、常に数字が実験参加者の方を向くように表示される (図 3b)。実験参加者がチェックポイント上に到達すると、効果音によるフィードバックがあり、そのチェックポイントは削除される。また、次のチェックポイント番号がわかりやすいように、実験参加者の手元には次に到達すべきチェックポイント番号が表示される (図 3c)。

この VR 空間において、実験参加者の移動は道の上のみに制限される。また、提案手法を利用した場合でも、ミニチュア上にはチェックポイントは表示されない。

4.2 実験手順

ユーザスタディの手順は下記の通りである。まず、実験参加者は本ユーザスタディの概要説明を受ける。続いて、HMD を装着し、テレポート、提案手法の順に練習セッションを実施する。その後、テレポートまたは提案手法を用いて、前述の 4 種の VR シーンにおいて 4 回のタスクを実施する。

練習セッションは、3 つのチェックポイントが配置されたサイズが $50m \times 50m$ 程度の VR 空間 (図 4) にて実施される。実験参加者は、練習セッションの開始時に各手法

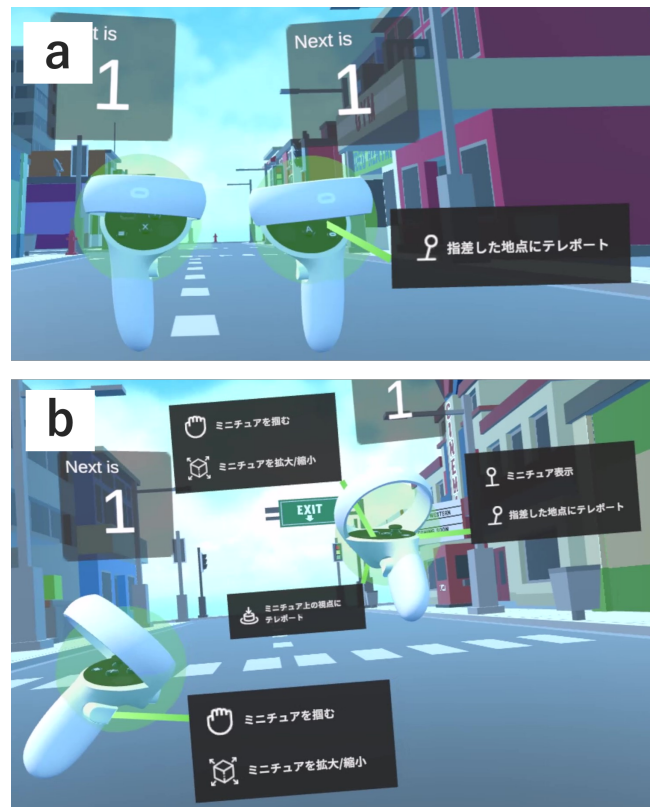


図 5 練習セッション時にコントローラ付近に表示されるテレポート (a) と提案手法 (b) の操作説明。

の操作説明を受け、続いて、実際のタスクと同様に 3 つのチェックポイントを順番に訪問する。3 つ目のチェックポイントの訪問が終わると、新たなチェックポイントが 3 つ出現し、繰り返し練習を行える。この練習用の VR シーンでは、操作方法を記したパネルがコントローラに追従するように表示される (図 5)。練習セッションは、テレポート、提案手法の順に、それぞれについて 5 分ずつ実施する。

実際のタスクは、シーン A、シーン B、シーン C、シーン D の順に 4 つの VR 空間で実施する。学習効果を考慮し、テレポートと提案手法を利用する順序は、参加者ごとに变化させる。具体的には、実験参加者をランダムに 2 つのグループに分け、一方のグループは、テレポート (シーン A) → 提案手法 (シーン B) → テレポート (シーン C) → 提案手法 (シーン D) の順番でタスクを実施し、他方はテレポートと提案手法を入れ替えてタスクを実施する。

VR 空間に入ると、実験参加者の目の前にスタートボタンが出現する。スタートボタンを押すとタスクが開始され、最後のチェックポイントに到達した時点でタスクが終了する。タスク終了後、実験参加者は自動で次のタスクを実施するシーンへ移動する。各タスクでは、タスク終了までにかかる時間と移動操作の回数を記録する。また、全てのタスクが終了した後、実験参加者にアンケートに回答してもらう。アンケートは、システムのユーザビリティを測る System Usability Scale (SUS) とプレゼンスを測る Igroup

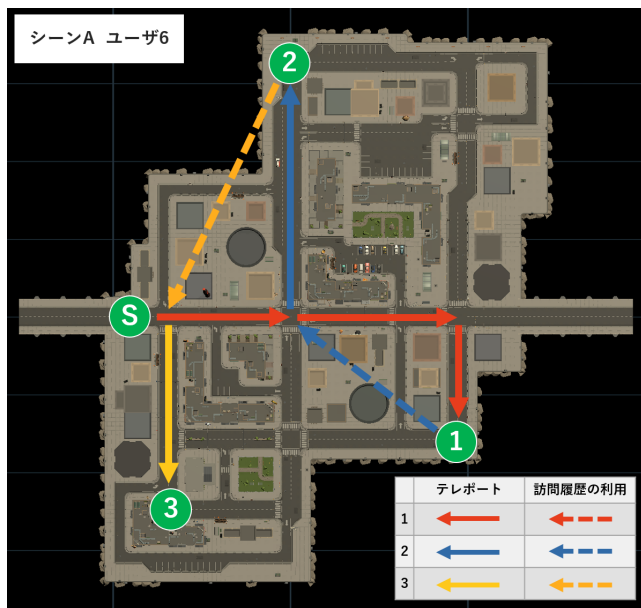


図 6 ユーザ 6 が提案手法を利用してシーン A を探索した際の移動ログ。各チェックポイントに到達するまでの移動ログを色付きの矢印で可視化している。

Presence Questionnaire (IPQ) の 2 種類で構成される。

5. 結果と考察

大学生 9 名の協力のもと実験を実施した。ただし、1 名は実験中のトラブルにより実験データが正常に収集できなかったため、その実験データを除いた 8 名分の結果を報告する。正常に実験データが収集できた 8 名のうち 5 名は HMD による VR を経験したことがあり、3 名は経験がなかった。

図 6 に、提案手法を利用して効率的に移動ができた実験参加者の移動ログを示す。このユーザは、最初に直進しながらチェックポイント『3』と『2』の位置を確認し、チェックポイント『1』を訪問した（赤実線矢印）。続いて、『2』に近い位置へ履歴を使って移動し（青破線矢印）、『2』を訪問した後（青実線矢印）、『3』に近い位置へ履歴により移動し（黄色破線矢印）、『3』を訪問した（黄色実線矢印）。この通り、提案手法を利用すると、一度訪問した場所であればテレポートを繰り返すことなく、一度の操作で瞬間的に移動できる。

タスクを実施した各 VR シーンにおける全実験参加者のテレポートと提案手法それぞれのタスク完了時間を図 7 に示す。続いて、各 VR シーンにおける全実験参加者のテレポートと提案手法それぞれの移動操作回数を図 8 示す。移動操作回数について、提案手法による探索ではテレポートによる移動とミニチュアによる移動（訪問履歴を利用した移動）の 2 種類の操作が行われるため、これらを別々にカウントした。

タスク完了時間に関するグラフを見ると、シーン D において、テレポートよりも提案手法を使った時の方がタス

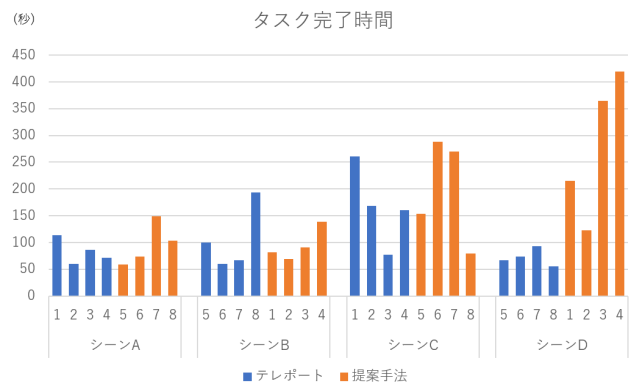


図 7 各 VR 空間における全実験参加者のテレポートと提案手法それぞれのタスク完了時間。

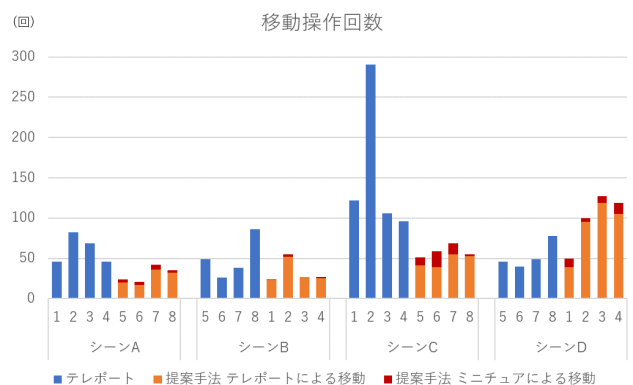


図 8 各 VR 空間における全実験参加者のテレポートと提案手法それぞれの移動操作回数。

ク完了時間が長い傾向が観察できる。この理由は、提案手法の利用時にはチェックポイントを見逃しやすくなってしまったためだと考えられる。今回の実験設定では、チェックポイントはミニチュア上には表示されず VR 空間のみに表示されるため、タスク遂行時には手元のミニチュアではなく VR 空間をよく観察する必要がある。しかし、提案手法は移動のたびにミニチュアを表示するため、ユーザはミニチュアを注視しがちになり、VR 空間の観察が不十分になってしまった可能性がある。VR 空間にミニチュアを表示した際のユーザの注目先の詳細な調査は今後の課題である。

操作回数のグラフを見ると、シーン A やシーン C では、提案手法を利用するとテレポートと比較して移動操作の回数が少なくなる傾向が観察される。提案手法は、一度の操作で長距離を移動できるため、訪問履歴を効果的に利用すれば、少ない操作回数で探索を行えると考えられる。

テレポートと提案手法それぞれの SUS スコアを図 9 に、IPQ の結果を図 10 示す。SUS スコアについて対応のある両側 t 検定を行ったところ、テレポートと提案手法間に有意差が認められた ($p < 0.01$)。つまり、テレポートと提案手法（テレポートと訪問履歴の利用）を比較すると、提案

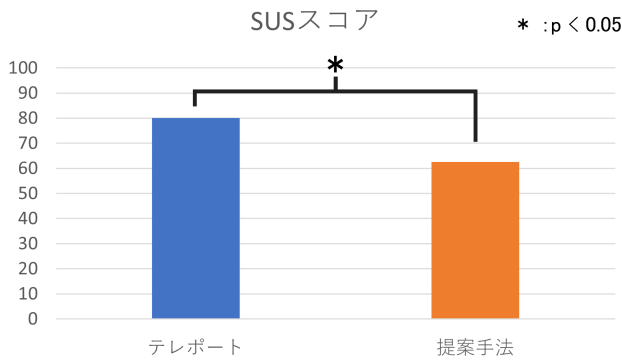


図9 テレポートと提案手法それぞれの SUS スコア.

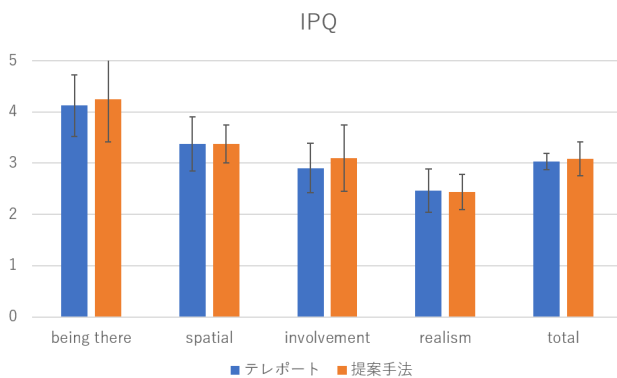


図10 テレポートと提案手法それぞれの IPQ の結果.

手法の方が、SUS スコアが低かったため、使いづらかったことがわかる。提案手法は、ミニチュアの移動時にジョイスティックとトリガーを両方同時に操作する必要があり、これがユーザビリティ低下の原因になったと考えられる。より使いやすい操作方法の検討と開発は将来課題である。

IPQ の各項目を見ると、テレポートと提案手法の間に明確な差は認められない。IPQ の各項目に関して対応のある両側 t 検定を行ったところ、有意差が認められた項目はなかった。これより、提案手法のプレゼンスに与える影響はテレポートと同程度であるという仮説 2 とは矛盾しない傾向が観察されている。

6. まとめと展望

本研究では、同一地点に複数回訪問するような VR 空間の探索を効率化することを目的とし、テレポートによる訪問履歴を利用できる移動手法を提案した。提案手法の有用性を検証するために、提案手法とテレポートを比較するユーザスタディを実施した。結果、提案手法を利用するとテレポートのみの移動に比べて、少ない移動操作で VR 空間を探索できる可能性が示唆された。一方、提案手法を利用すると VR 空間の探索において、チェックポイントを見逃しやすくなる可能性も観察された。

本研究の課題の一つは、ミニチュア操作のユーザビリ

ティにある。現在、ミニチュア上で移動履歴を選択するには、ジョイスティックとトリガーを同時に操作する必要がある。これがユーザビリティ低下の原因になっている。本研究のもう一つの将来課題は、より詳細なユーザスタディである。提案手法を利用すると、実験参加者が手元のミニチュアを注視してしまい VR 空間のチェックポイントを見逃しやすくなる可能性が確認された。移動中のユーザの視線計測を行い、ミニチュア表示のユーザへの影響のより詳細は調査を行いたい。

謝辞 ユーザスタディに協力していただいた実験参加者の方々に感謝の意を表する。

参考文献

- [1] Evren Bozgeyikli, Andrew Raij, Srinivas Katkoori, and Rajiv Dubey. Point & teleport locomotion technique for virtual reality. CHI PLAY '16, p. 205–216, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [2] Richard Stoakley, Matthew J. Conway, and Randy Pausch. Virtual reality on a wim: Interactive worlds in miniature. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '95, p. 265–272, USA, 1995. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [3] Costas Boletis. The new era of virtual reality locomotion: A systematic literature review of techniques and a proposed typology. 2017.
- [4] Costas Boletis, Jarl Erik Cedergren, and Marco Porta. Vr locomotion in the new era of virtual reality: An empirical comparison of prevalent techniques. *Adv. in Hum.-Comp. Int.*, Vol. 2019, , jan 2019.
- [5] Fabio Buttussi and Luca Chittaro. Locomotion in place in virtual reality: A comparative evaluation of joystick, teleport, and leaning. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 27, No. 1, p. 125–136, jan 2021.
- [6] Markus Funk, Florian Müller, Marco Fendrich, Megan Shene, Moritz Kolvenbach, Niclas Dobbartin, Sebastian Günther, and Max Mühlhäuser. Assessing the accuracy of point & teleport locomotion with orientation indication for virtual reality using curved trajectories. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, p. 1–12, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [7] Pauline Bimberg, Tim Weissker, Alexander Kulik, and Bernd Froehlich. Virtual rotations for maneuvering in immersive virtual environments. In *Proceedings of the 27th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '21, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [8] Andrii Matviienko, Florian Müller, Martin Schmitz, Marco Fendrich, and Max Mühlhäuser. Skyport: Investigating 3d teleportation methods in virtual environments. In *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [9] C.A. Wingrave, Y. Haciahmetoglu, and D.A. Bowman. Overcoming world in miniature limitations by a scaled and scrolling wim. In *3D User Interfaces (3DUI'06)*, pp. 11–16, 2006.
- [10] Laurenz Berger and Katrin Wolf. Wim: Fast locomotion

in virtual reality with spatial orientation gain & without motion sickness. In *Proceedings of the 17th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, MUM 2018, p. 19–24, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.

- [11] David Englmeier, Wanja Sajko, and Andreas Butz. Spherical world in miniature: Exploring the tiny planets metaphor for discrete locomotion in virtual reality. In *2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 345–352, 2021.
- [12] 増子恭平, 井尻敬. Turnteleport : 振り向きにより複数視界を切り替えられる vr 空間ナビゲーション. 研究報告 ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) 35, 2022-HCI-196, jan 2022.
- [13] Nathan Navarro Griffin and Eelke Folmer. Out-of-body locomotion: Vectionless navigation with a continuous avatar representation. In *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '19*, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [14] Sebastian Cmentowski, Andrey Krekhov, and Jens Krüger. Outstanding: A multi-perspective travel approach for virtual reality games. *CHI PLAY '19*, p. 287–299, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.