

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

増子 恭平^{1,a)} 井尻 敬¹

概要：本研究では、VR空間における効率的な移動方法の確立を目的とし、振り向くだけで視点位置を切り替えられる新しいナビゲーション手法 TurnTeleport を提案する。提案手法において、まずユーザは、VR空間内に複数の視点を配置する。すると、ユーザの視点を囲む天球状の視界が視点数に応じて部分視界に分割され、各部分視界が各視点と対応付けられる。その後、ユーザが振り向き動作によりある部分視界の方向を向くと、ユーザの視点がその視界に対応する視点に自動的に移動する。つまり、ユーザは振り向きにより異なる部分視界の方向を向くことで、視点を瞬間的に切り替えることが可能となる。提案手法の有用性を確認するため、実空間の歩行・テレポート・提案手法を比較するユーザスタディ、および、ボタンによる視点切り替えと提案手法を比較するユーザスタディを実施した。結果、手法間に優位な差は見られなかったものの、提案手法はテレポートに比べ短時間で、また、歩行と同程度の時間でタスクを終了できる傾向が観察された。

1. はじめに

Virtual Reality (VR) は、映像視聴やゲームだけでなく、ペインティングやモデリング、空間デザインといった制作活動にも活用され始めている。例えば、VR空間にストロークを描ける Tilt Brush や、VR空間内で詳細な3Dモデルをデザインできる Gravity Sketch などが、VRを制作に利用するアプリケーションの例として挙げられる。このような制作活動のためのVRアプリケーションでは、作品を編集する過程において、VR空間内で視点移動を何度も繰り返す必要がある。そのため、とりわけ制作用のVRアプリケーションでは、VR空間内の移動コストを抑えることが重要な課題となっている。

実際、VR空間内の移動手法に関して、多くの手法が提案されている。本研究に関連の深いものとして、有限の実空間を歩行することで広大なVR空間を移動できる Redirected Walking、歩行ジェスチャによるVR空間移動、VRコントローラでポイントした場所へ瞬間移動するテレポートなどが挙げられる。これらの手法は、有限の実空間を活用した移動手段や、効率的な移動手段を提供する。しかし、これらの手法ではVR空間の移動時に、実空間を歩行する、歩行ジェスチャを行う、VRコントローラを利用するといった操作が依然として必要になる。

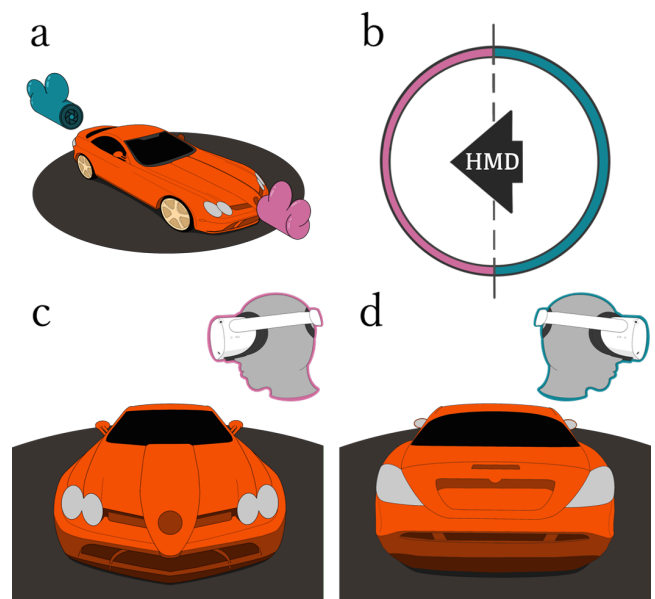


図1 TurnTeleport法の全体像。ユーザがVR空間のミニチュア内に複数の視点を配置すると(a)、ユーザの視界が複数の部分視界に分割され視点と部分視界が対応付けられる(b)。その後、ユーザが、振り向きによりある視界方向を向くと対応する視点位置へテレポートできる(c, d)。

本研究では、VR空間の効率的な移動方法の確立を目的とし、振り向きにより視界を切り替えられるナビゲーション手法 TurnTeleport を提案する(図1)。提案手法において、まずユーザは、VR空間全体をミニチュアとして提示

¹ 芝浦工業大学

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

するインタフェース [1] を利用し VR 空間内に複数視点を配置する (図 1a). すると, ユーザの視点を囲む天球状の視界が視点数に応じて部分視界に分割され, 各部分視界が各視点と対応付けられる (図 1b). その後, ユーザが振り向き動作によりある部分視界の方向を向くと, ユーザの視点がその視界に対応する視点に自動的に移動する (図 1c, d). つまり, ユーザは, 振り向きジェスチャのみにより, 予め指定した VR 空間内の視点位置に瞬間的に移動することが可能となる. これにより, 提案手法は, 物体移動や形状編集など, 視点切り替えが多く発生するアプリケーションの効率化につながると期待できる.

提案手法の有用性を評価するため, 提案手法・歩行による移動・テレポートによる移動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では, 実験参加者は, VR 空間に配置された複数のボタンを押す作業を, 上記の 3 つの移動手法を用いて実施した. 結果, 手法間に優位な差は見られなかったものの, 提案手法はテレポートに比べ短時間で, また, 実世界の歩行と同程度の時間でタスクを終了できる傾向が観察された.

2. 関連研究

本章では, 本研究と特に関連の深い Redirected Walking, Walk-in-place, テレポートという 3 つの VR 空間移動手法について紹介する.

Redirected Walking[2] とは, ユーザ自身の VR 空間における位置や方向をユーザが無意識のうちに変化させることで, 有限の実空間を効率的に利用し, より広い VR 空間を探索出来るようにする手法である. これまで, サッカー運動を利用した手法 [3] や, 瞬きを利用した手法 [4] が提案されている. 他にも, CAVE 環境 [5] において, ポータルを利用して方向付けを行うことで, 歩く方向を変化させる手法も知られる [6]. しかし, Redirected Walking を利用するためには, VR 空間ほどではないが, ある程度の広さの実空間が必要となる.

歩行ジェスチャにより VR 空間を移動する Walk-in-place という手法が研究されている. Walk-in-Place[7] では, ユーザが足踏みジェスチャを行うと, 足に装着したセンサよりジェスチャが検出され, ユーザが把持した VR コントローラの方へ VR 空間を移動できる. より簡便に利用できるツールの実現を目的とし, スマートフォンに搭載される慣性センサのみを利用した VR-Step[8] や頭の傾きにより進行方向を決定することで全方位に移動可能な手法 [9] などが提案されている. この Walk-in-place 法では, 最小限の実空間で広大な VR 空間を探索可能である. しかし, 長い距離を移動する場合は歩行動作を繰り返す必要があるため, 移動に時間がかかりユーザに疲労感を与えるという問題がある.

テレポートは 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り, 効率的な移動が可能, VR 酔いを引き起しにくいという利点から広く利用されている. Bozgeyikli らの提案した, Point&Teleport[10] では, ユーザは VR コントローラによりポイントした地点へ移動することが可能である. また, テレポート時にトラックパッド/ジョイスティックのピッチ軸角度を変更することやコントローラを傾げることで, テレポート後のユーザの向きを指定できる手法 [11] や, 3 人称視点から自身を表すアバターを移動させ, 1 人称視点と 3 人称視点をシームレスに切り替えることで, 連続的なテレポートを実現した Out-of-body Locomotion[12] も提案されている. しかし, これらの手法は効率的な移動法を提案しているものの, 移動先となる地点をポイントするという操作自体が依然として必要となる.

3. 提案手法

本研究では, VR 空間の効率的な移動方法の確立を目的とし, 振り向くだけで視点を切り替えられるナビゲーション手法 TurnTeleport を提案する. 特に本研究では, VR 空間の同じ位置に何度も移動する必要のある, 3D モデリングやペインティングといったシステムへの利用を想定している. TurnTeleport による VR 空間内の移動は, 事前の視点配置と振り向きによる視点移動の 2 ステップに分けられる. 事前の視点配置では, VR 空間のミニチュアを利用し, 空間全体を俯瞰しながら複数の視点を配置する (3.1 節). 複数の視点を配置すると, 配置した視点数に応じてユーザの視界が部分視界に分割され, ユーザが振り向きによりある部分視界の方向を向くとユーザの視点が移動する (3.2 節).

TurnTeleport 法では, 振り向くという単純なジェスチャのみで視点を移動できるため, 同じ視点位置を繰り返し利用する必要のある 3D モデリング等の VR アプリケーションへの応用が期待できる. なお, 提案手法の実装には, スタンドアロン型 Head Mounted Display (HMD) である Oculus Quest2 と付属コントローラを利用した.

3.1 ミニチュアを利用した視点配置

VR 空間を俯瞰しながら複数の視点を移動・生成・削除できるように, 本研究では World-In-Miniature[1] を応用したユーザインタフェースを提案する. まず, ユーザが VR コントローラのミニチュア表示ボタンを押すと, VR 空間全体のミニチュアが手元に表示される (図 2a). 提案手法の起動時にすでにひとつの視点が配置されており, これが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る. 起動時に配置されるこの視点は, 現在ユーザが VR 空間を見ている視点に対応する.

ユーザは, ミニチュア上で視点 (カメラオブジェクト) の移動・生成・削除を行える. 通常は視点移動モードとなっ

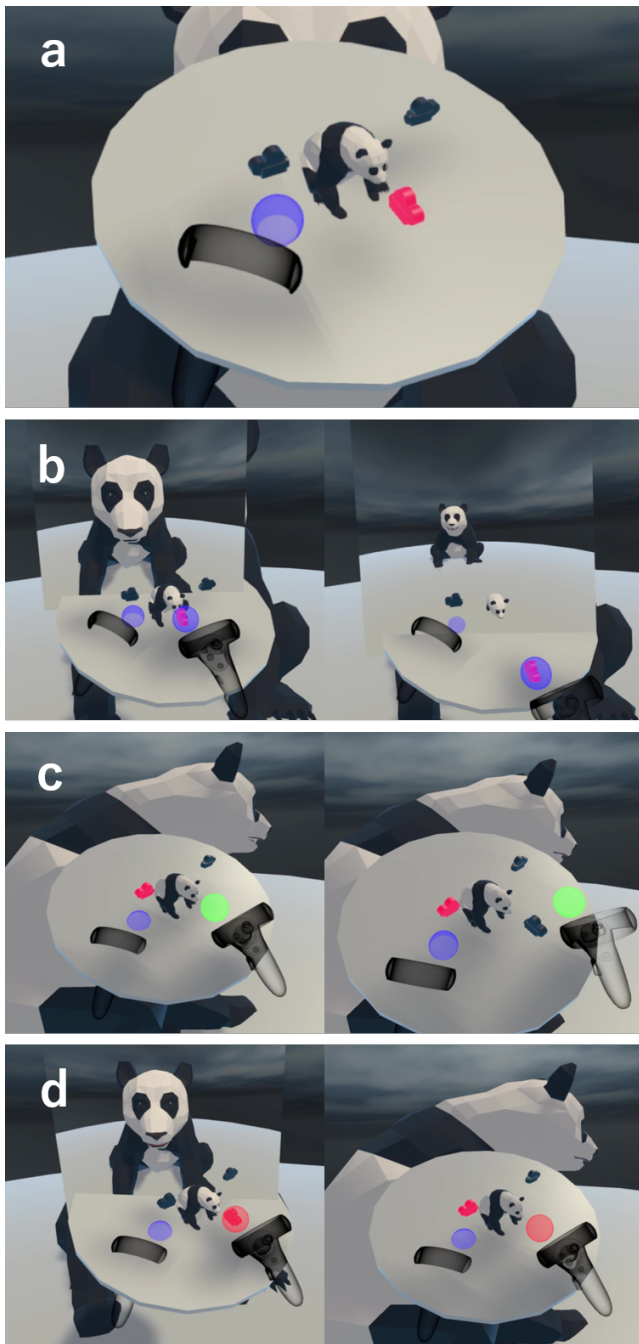


図 2 ミニチュアを利用した視点配置. VR 空間のミニチュア (a) が、ユーザの手元に表示される. VR コントローラ操作により視点の移動 (b)、視点の追加 (c)、視点の削除 (d) ができる. コントローラ上のスフィアの色が、各編集操作に対応する.

ており、VR コントローラ操作によりカメラオブジェクトをドラッグできる (図 2b). VR コントローラのジョイスティックを上方向に倒すと視点生成モードとなり、その下で生成ボタンを押すとコントローラの位置・方向に応じて新しい視点 (カメラオブジェクト) が生成される (図 2c). ジョイスティックを下方向に倒すと視点削除モードとなり、VR コントローラ操作によりカメラオブジェクトを削除できる. (図 2d).

現在の編集モードがわかりやすいよう、コントローラ上

のスフィアの色でモードが可視化される. 移動・生成・削除が、それぞれ、青・緑・赤に対応する. また、このスフィアとカメラオブジェクトを重ね合わせると、この視点から見た際のプレビューが表示される (図 2b). ユーザは、この視点のプレビューを見ながらカメラオブジェクトを移動させることで、現在どの視点にいても、任意のカメラオブジェクトの位置を調整できる.

3.2 視界の分割と振り向きによる移動

提案手法では、ミニチュア上に配置された視点の数だけ、ユーザの視界を分割する. ここで、ユーザの『視界』として、ユーザの装着した HMD を中心とする球を考え、この球を縦方向に分割する. 例えば、VR 空間に 3 個の視点が配置された場合、方位角 120° 区切りで球を分割する (3a). 本研究では、分割された視界を部分視界と呼ぶこととし、各部分視界を VR 空間に配置された視点と対応付ける. 実際の VR 空間移動時には、HMD よりユーザの顔の向きを取得し、ユーザが向いた部分視界に対応する視点位置へユーザを移動させる. 視点移動時の急激な画面の変化を避けるため、提案手法では移動の際に 2 秒程度の暗転エフェクトを付与している.

VR 空間に配置された視点と部分視界は、作成順に応じて対応付けられる. 例えば、3 個の視点が配置された下で新たな視点を配置した場合、視界を 4 分割し新たな視点と 4 個目の部分視界を対応付ける (図 3b). また、視点の削除時には、対応する視点と部分視界を削除し、視界全体を分割し直す (図 3c).

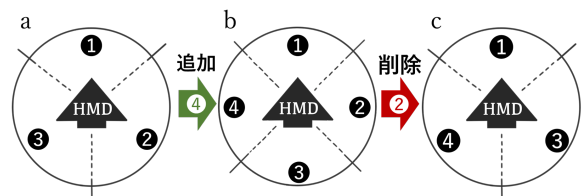


図 3 分割された視界を真上方向から俯瞰した際のイメージ図. 視点追加時の視界の分割方法 (a, b) と視点消去時の視界の分割方法 (b, c).

4. ユーザスタディ

提案手法の有用性を評価するため 2 つのユーザスタディを実施する. 1 つめは、歩行・Point&Teleport・提案手法の移動効率の比較するものである. 2 つめは、移動する視点がすでに配置された状況において、ボタンによる視点切り替えと振り向きによる視点切り替え (提案手法) の移動効率を比較するものである. それぞれ詳細を説明する.

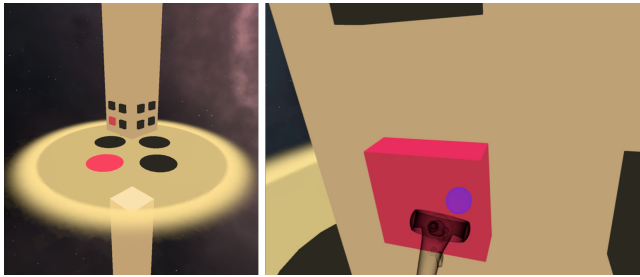


図 4 実験 1 に利用した VR 空間。

4.1 実験 1: 歩行・Point&Teleport・TrunTeleport の比較

本実験では、VR 空間における代表的な移動手法である、歩行による移動、移動先をポインティングしてテレポートする Point&Teleport と、提案手法 (TrunTeleport) の移動効率を比較する。提案手法は 3D モデリングやペインティングのような制作アプリケーションを目的としたものであるため、本実験では繰り返し同じ視点に移動する状況を想定している。

実験に利用する VR 空間を図 4 に示す。VR 空間の中央に柱が配置され、柱の各面には 4 個ずつ、計 16 個のボタンが配置されている。この 16 個のボタンのうち 1 個だけが赤く光り、実験参加者が赤いボタンを押すとそのボタンは黒色に戻り、他の側面のボタンが新たに赤く光る。この赤いボタンを VR コントローラで押すことを 1 ステップとして、12 ステップ繰り返すことをタスクとする。実験参加者は、歩行・Point&Teleport・TrunTeleport の 3 手法でこのタスクを実施する。3 手法の順番は実験参加者ごとにランダムに変化させる。また、各手法における実際のタスクの前に 3 分程度の練習時間を設ける。

柱のある側面のボタンが赤く光る時、そのボタンがある側面の足元も赤くハイライトされる (図 4)。これは、本実験では、実験参加者が赤いボタンを探す効率でなく、定まった移動先へ移動する効率を評価することが目的であるためである。また、提案手法によるタスクの直前に、タスク遂行に必要なだけ視点を配置するための時間を設ける。すべてのタスクが完了した後、実験参加者には System Usability Scale (SUS) とミニチュア操作に関するアンケートに回答してもらう。

4.2 実験 2: ボタンと振り向きによる視点切り替えの比較

本実験では、TurnTeleport 法における振り向きによる視点移動の効率を評価することを目的とし、複数視点が配置された状況において、ボタンによる視点切り替えと振り向きによる視点切り替え (提案手法) の移動効率を比較する。

本実験では、ある動物モデルとその周りに複数の視点が時計回りに配置された、3 つの VR 空間を用意する。

- シーン 1. イノシシモデルと 3 つの視点 (図 5a)。
- シーン 2. パンダモデルと 4 つの視点 (図 5b)。

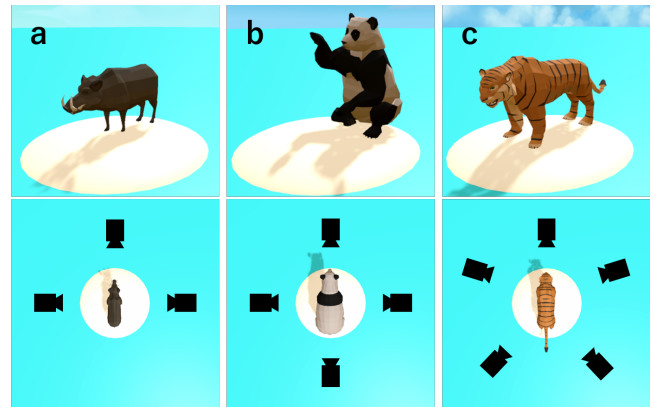


図 5 実験 2 に利用した 3 つの VR 空間。



図 6 実験 2 における移動目標の指示画面。

- シーン 3. トラモデルと 5 つの視点 (図 5c)。

実験参加者は、これらの VR 空間において、ボタン操作、または、振り向き (提案手法) により視点を切り替える。このボタン操作では、VR コントローラ上の上ボタン・下ボタンを 1 回押すと隣の視点に移動できる。上ボタンと下ボタンでは移動できる視点の順番が逆転する。

図 6 に示すとおり、VR 空間の上部に目標の視点が提示され、実験参加者はその視点へ移動し決定ボタンを押す。このステップを 11 回繰り返すことをタスクとする。実験参加者は、シーン 1、シーン 2、シーン 3 の順に、ボタン操作・振り向きの 2 手法を用いてタスクを実施する。利用する手法の順番はランダムに決定する。すべてのタスクが完了した後、実験参加者にはユーザビリティに関するアンケートに回答してもらう。

5. 結果と考察

5.1 実験 1: 歩行・Point&Teleport・TrunTeleport の比較結果

前述の実験 1 を、大学生 9 名の協力のもと実施した。実験参加者のうち 4 名が HMD を装着した経験がなく、残りの協力者は過去に数回程度の HMD を利用した経験があった。3 種の異なる移動手法を利用した場合の平均タスク完了時間を図 7 に示す。ただし、この図は各タスクにおける 12 回のステップのうち、最初の 1 回を除いた 11 回の平均

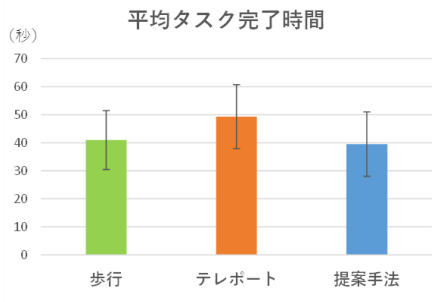


図 7 歩行・Point&Teleport・TurnTeleport における平均タスク完了時間。

表 1 歩行・Point&Teleport・TurnTeleport の SUS スコア。

手法	SUS スコア (Grade)	評価
歩行	92.5 (A)	Excellent
テレポート	70.28 (B)	Good
提案手法	67.22 (C)	Borderline Okay

値を示している。3種の移動手法に関して一元配置分散分析を行った結果、有意差は認められなかった。

有意差は認められなかったものの、提案手法を用いた場合のタスク終了までの平均時間は、Point&Teleport よりも10秒程度短かく、歩行と同程度であった。目標の場所が柱の裏側である状況など、1回のテレポートで移動できない場合には、提案手法の方が高速に移動できる可能性がある。また、歩行を利用する場合には実空間に5m×5m程度の空間が必要であるのに対し、提案手法ではその場に留まったままVR空間を移動できる。

次に、SUS アンケート結果を図8に、SUSスコアの平均を表1に、また、ミニチュア操作に関するアンケートの結果を図9に示す。SUS アンケートの「この移動手法は容易に使いこなす事ができると思った」や「この移動方法を利用できる自信がある」などといった手法のポジティブな側面を測る項目について、提案手法は歩行やPoint&Teleportと同程度に高いスコアを取得した。一方で、提案手法は「この移動方法を利用するには、説明が必要となるほど複雑であると感じた」や「この移動方法を利用し始める前に、知っておくべきことが多くあると思う」といった項目についてネガティブな評価を受けた。提案手法のSUSスコアは、歩行に比べて低かったものの、Point&Teleportと同程度であった。

SUS アンケートにて、ネガティブな評価を受けたのは、ミニチュア操作を行うために多くの前提知識が必要であり、ミニチュア内に思い通りに視点を配置することが難しいためと推測される。今後、ボタン入力による視点の微調整機能や視点の自動配置機能を追加することで、ユーザビリティを改善したい。

5.2 実験2: ボタンと振り向きによる視点の比較結果

ボタン操作および振り向きにより移動タスクを行った際

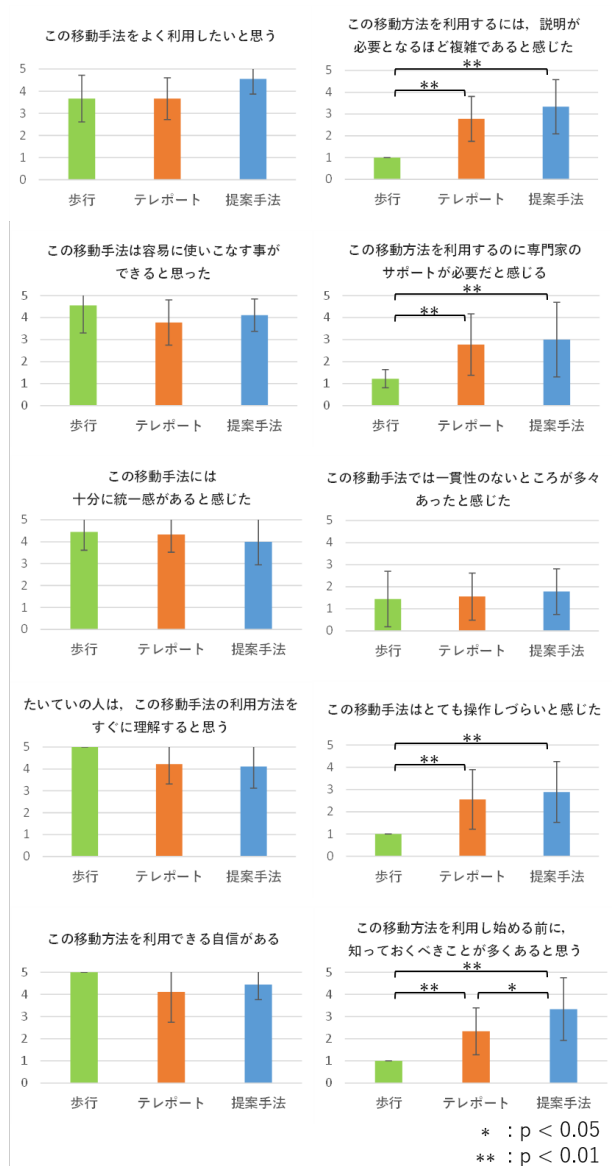


図 8 歩行・Point&Teleport・TurnTeleport の比較における System Usability Scale アンケート結果。

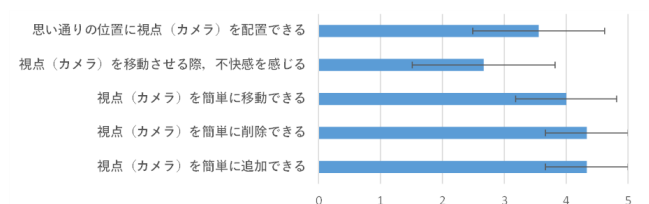


図 9 ミニチュア操作に関するアンケート結果。

のタスク完了までの平均時間を図10に示す。ただし、この図は各タスクにおける11回の視点移動のうち最初の1回を除いた10回の平均値を示している。2種の移動手法に関してt検定を行った結果、有意差は認められなかった。このユーザスタディでは、3視点のシーン1よりも4視点のシーン2や、5視点のシーン3の方が、タスク完了までの時間が短かった。この理由として、シーン1、シーン2、シーン3の順でタスクを行ったことによる学習効果が働いた可

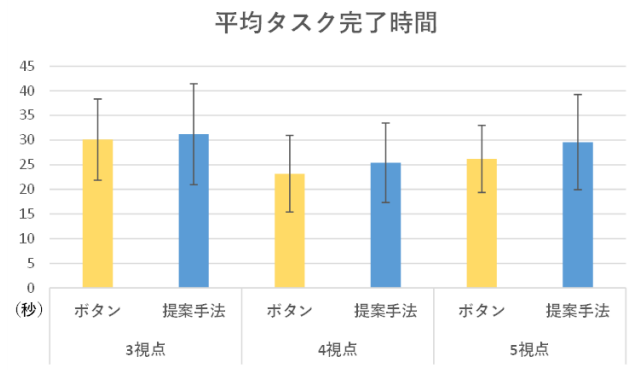


図 10 実験 2: ボタンと振り向きによる視点の比較における平均タスク完了時間。

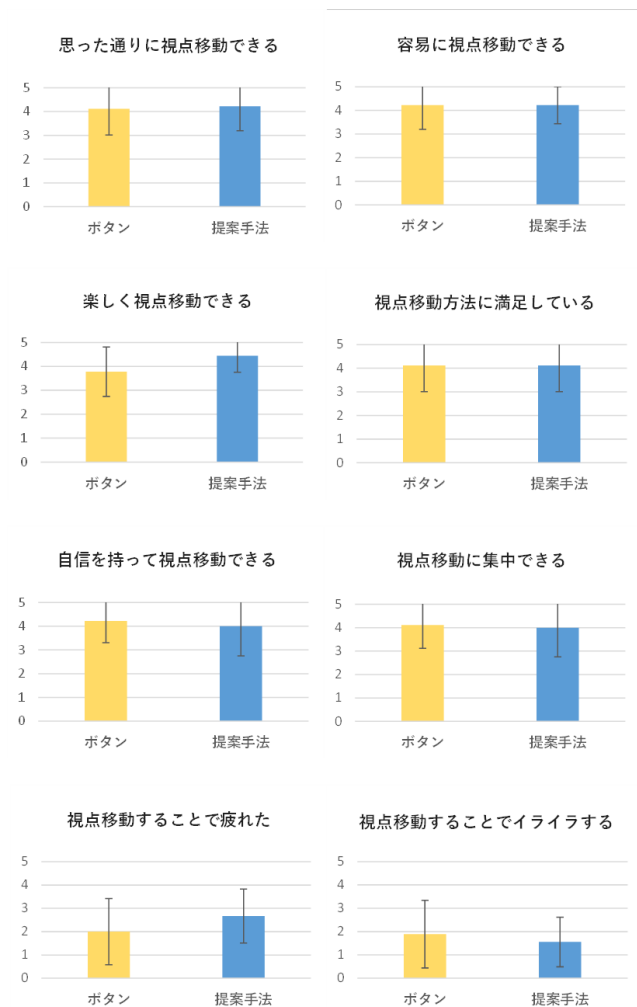


図 11 実験 2: ボタンと振り向きによる視点の比較におけるユーザビリティに関するアンケート結果。

能性がある。また、ユーザビリティに関するアンケートの結果を、図 11 に示す。ユーザビリティの評価は、ボタン操作および振り向きによる移動のどちらも高評価であった。

6. まとめと展望

本研究では、VR 空間の効率的な移動方法の確立を目的とし、振り向くだけで視点を切り替えられる新しいナビゲー

ション手法 TurnTeleport を提案した。TurnTeleport では、VR 空間内に複数の視点を事前に配置し、振り向きジェスチャによりこの視点を自由に切り替えられる。TurnTeleport の有用性を検証するために、歩行・Point&Teleport と TurnTeleport を比較する実験 1 と、ボタン操作と振り向きジェスチャ（提案手法）を比較する実験 2 を実施した。結果、実験 1 では手法間に優位な差は見られなかったものの、提案手法はテレポートに比べ短時間で、また、実世界の歩行と同程度の時間でタスクを終了できる傾向が観察された。また、実験 2 では、振り向きジェスチャにより視点切り替えは、ボタンによる視点切り替えと同程度の効率で視点移動タスクを行える可能性が示唆された。

提案手法の課題は、ミニチュアを用いた視点配置が容易でないことである。今後、ボタン操作による視点の微調整機能や視点の自動配置機能を追加することで提案手法のユーザビリティを改善したい。現在の提案手法のもう一つの課題は、振り向きによる移動先が視覚的に分からない点である。今後、複数の部分視界やその境界を同時に可視化することで、振り向いた際の移動先が見えるように提案手法を改善したい。

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] Richard Stoakley, Matthew J. Conway, and Randy Pausch. Virtual reality on a whim: Interactive worlds in miniature. In *Proc. SIGCHI 95*, pp. 265–272, 1995.
- [2] Sharif Razzaque, Zachariah Kohn, and Mary C. Whitton. Redirected Walking. In *Eurographics 2001 - Short Presentations*. Eurographics Association, 2001.
- [3] Benjamin Bolte and Markus Lappe. Subliminal reorientation and repositioning in immersive virtual environments using saccadic suppression. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, p. 545–552, apr 2015.
- [4] Eike Langbehn, Frank Steinicke, Markus Lappe, Gregory F. Welch, and Gerd Bruder. In the blink of an eye: Leveraging blink-induced suppression for imperceptible position and orientation redirection in virtual reality. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 37, No. 4, jul 2018.
- [5] Carolina Cruz-Neira, Daniel J Sandin, and Thomas A DeFanti. Surround-screen projection-based virtual reality: the design and implementation of the cave. In *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 135–142, 1993.
- [6] S. Freitag, D. Rausch, and T. Kuhlen. Reorientation in virtual environments using interactive portals. In *2014 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 119–122, 2014.
- [7] James N. Templeman, Patricia S. Denbrook, and Linda E. Sibert. Virtual locomotion: Walking in place through virtual environments. *Presence: Teleoper. Virtual Environ.*, Vol. 8, No. 6, p. 598–617, dec 1999.
- [8] Sam Tregillus and Eelke Folmer. Vr-step: Walking-in-place using inertial sensing for hands free navigation in mobile vr environments. In *Proceedings of the 2016 CHI*

- Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, p. 1250–1255, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [9] Sam Tregillus, Majed Al Zayer, and Eelke Folmer. Handsfree omnidirectional vr navigation using head tilt. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, p. 4063–4068, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [10] Evren Bozgeyikli, Andrew Raij, Srinivas Katkoori, and Rajiv Dubey. Point & teleport locomotion technique for virtual reality. In *Proceedings of the 2016 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, pp. 205–216, 2016.
- [11] Markus Funk, Florian Müller, Marco Fendrich, Megan Shene, Moritz Kolvenbach, Niclas Dobbertin, Sebastian Günther, and Max Mühlhäuser. *Assessing the Accuracy of Point & Teleport Locomotion with Orientation Indication for Virtual Reality Using Curved Trajectories*, p. 1–12. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2019.
- [12] 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.