

視線と仮想ボタンを用いた仮想空間内のハンズフリー瞬間移動

肖晔倩^{†1} 岡哲資^{†2}

概要: 仮想空間内の瞬間移動の方法は数多く研究されている中、手持ちデバイスを使用しないハンズフリーな方法の研究や実用例は少ない。ヘッドマウントディスプレイのみを用いて瞬間移動ができるハンズフリーなシステムは、仮想体験の利便性を向上する。本研究では、視線と仮想ボタンを用いた仮想空間内のハンズフリーな瞬間移動方法を評価した。この方法では、移動先を選択するための光線（仮想ポインタ）を HMD よりも少し低い位置から出し、体や首の回転によってターゲットに当てる。そして、仮想空間に出現するボタン（仮想ボタン）に手で触れることによって、瞬間移動を行う。24 人の参加者による評価では、移動時間、移動しやすさ、VR 酔い、疲労について、コントローラを用いた方法と比較した。移動時間は、コントローラよりも有意に長く、移動しやすさの評価値も有意に低かった。しかし、それらの差が小さいこと、移動速度が十分であること、参加者の好みには差がないことなどから、ハンズフリーな移動方法の有用性が確認できた。

1. はじめに

近年、安価なヘッドマウントディスプレイ (HMD) を使用することで、家庭などでも様々な仮想現実 (Virtual Reality, VR) 体験が行えるようになってきている。これらのインサイドアウト方式の HMD は、外部デバイスや PC を必要とせず、持ち運びが容易である。また、HMD に搭載されたセンサでハンドトラッキングを行うことで、HMD のみでの VR 体験も可能である。今後、手持ちコントローラなしでのハンズフリーな VR 体験の質が向上すれば、HMD の持ち運びのみで、どこでも VR 空間に没入できるようになるため、利便性が向上する。手持ちコントローラが不要であれば、HMD を装着したまま現実空間の物体が扱いやすくなる。また、コントローラを用いるよりも、自身の手で仮想空間に置かれた物体を手にとったり、ジェスチャを行ったりすることで、体験のリアリティや臨場感が高まることも期待できる。

仮想空間内を自由に移動することで、VR 体験の質は向上する。HMD の位置姿勢の追跡により、ルームスケールの移動は、現実移動するだけで行うことができる。より広い空間の移動には、ジョイスティックなどによる連続的な移動方法、瞬間移動など、様々な方法が用いられている。瞬間移動は、移動効率の高さや VR 酔いの生じにくさなどの点で利点があると考えられており、実際に多くの VR アプリケーションや VR ゲームでも採用されている。瞬間移動は、手持ちコントローラから光線を出して移動先を選択し、物理ボタンを用いて移動を決定する方法が一般的である。しかし、手持ちコントローラを使用しないハンズフリーな瞬間移動が可能なアプリケーションやゲームは、見当たらない。また、ハンズフリーな瞬間移動方法を他の方法と比較する研究も十分に行われてきたとは言いがたい。

本稿では、視線 (Head Gaze) と仮想ボタンを用いた仮

想空間内のハンズフリーな瞬間移動方法の評価について述べる。移動先を選択するための光線（仮想ポインタ）を手持ちコントローラからではなく、HMD よりも少し低い位置から出し、体や首の回転によってターゲットに当てる。これは HMD の追跡技術のみで実現できる。また、コントローラの物理ボタンの代わりに、仮想空間に出現するボタン（仮想ボタン）に手で触れることによって、瞬間移動を行う。この操作は、手の位置の追跡のみで実現できる。評価では、この移動方法をコントローラを用いた瞬間移動方法と移動効率、移動の容易さ、疲労度、VR 酔いなどの観点から比較した。

2. 関連研究

2.1 仮想空間内の移動方法

仮想空間内の移動方法 (Virtual Locomotion Technique, VLT) に関する研究は、現在までに数多く、様々なものが行われてきている[1, 2]。その中には、瞬間移動方法と他の VLT を比較する研究と瞬間移動方法を改良するための研究が含まれる[3]。これらの研究の多くは、手持ちコントローラを用いるハンズフリーでない移動方法を取り上げている。手持ちコントローラを使用する瞬間移動方法は、市販されている Meta Quest 2 などのインサイドアウト方式の HMD で利用できることから、有用である。多くの研究結果から、瞬間移動は、移動効率が良く、VR 酔いが生じにくい点で優れていると考えられている[3]。また、これらの研究によって、臨場感や方向感覚に関する知見も得られている。

2.2 仮想空間内のハンズフリーな瞬間移動

ハンズフリーな瞬間移動方法を取り上げた研究は、手持ちコントローラを使用する方法の研究に比べて多くない。視線 (Head Gaze) を用いる方法、手によって移動先を選択する方法、足によって移動先を選択する方法が提案され、

^{†1} 日本大学大学院生産工学研究科

^{†2} 日本大学

研究されている[3].

視線 (Head Gaze) を用いるハンズフリーな移動方法としては, The Jumper Metaphor が挙げられる[4]. この方法では, 移動先を 500 ミリ秒間見続けて選択し, 同じ方向に加速度を与えることで瞬間移動する. この方法は, HMD 内のセンサのみで実現可能であり, 最近のインサイドアウト方法の HMD でも利用できる. しかし, 移動先を見続けなければいけない点, 首などに負担がかかる点などが問題である.

Bozgeyikli らは, 手で移動先を選択して瞬間移動する方法を評価した[5]. この方法では, 肩と手を結ぶ直線に移動先が 2 秒間触れると, 瞬間移動が起こる. 他の VLT と比較した結果, 衝突回数, 所要時間, 楽しさにおいて, 優れていた. しかし, この方法は, 意図しない移動が起きやすいと考える. また, 評価では, 肩, 手, 頭, 足などのマーカーと外部に設置した多数のカメラを用いて評価しており, HMD のみの条件での評価は行われていない.

Schäfer らは, 手の姿勢を用いて移動先を指定し, 手のジェスチャを用いて瞬間移動する二つの方法を比較した[6]. 一つ目の方法では, 片方の手で移動先を選択し, もう片方の手で人差し指を伸ばすジェスチャを用いる. 二つ目の方法では, 片手のみを用い, 選択動作を 1.5 秒間維持する. 両者の比較では, 大きな違いが見られなかった. これらの方法と他の VLT との比較による評価は行われていない. どちらの方法も, HMD に搭載されたセンサのみを用いる場合は, 手の位置及び姿勢を精度よく推定できなければ, 移動先の選択が行いにくくなり, 移動効率が低下すると推測する.

Pfeuffer らは, 仮想空間内の小さなアバターを手でつかみ, 縮小環境モデル内の移動先に置くことで, 自身が瞬間移動する方法を提案した[7]. この方式では, 左手の位置に表示された部屋の縮小モデルの特定の位置にアバターを移動し, 手を離すと, 瞬間移動する. これは, HMD の追跡とハンドトラッキングによって, インサイドアウト方式の HMD 単体で実現可能である. しかし, ユーザ評価は行われていない. また, 移動したい場所を縮小モデル上で探す必要があるため, 移動のための認知負荷が高いと考える.

足を用いる方法は, Podoportation と呼ばれ, 足にデバイスを装着する条件で評価されている[8]. しかし, 追加のデバイスを必要とする場合は, 利便性が損なわれる. また, HMD に搭載されたカメラなどで足を追跡する場合は, 追跡可能範囲と追跡精度が問題になる.

3. 視線と仮想ボタンを用いた仮想空間内のハンズフリー瞬間移動

本研究で評価する移動方法では, 頭 (HMD) を回転し, 仮想空間内の移動ターゲットとなる物体 (ソファなど) を見て, 「仮想ボタン」に手で触れることで瞬間移動を行

う. 仮想空間には, 視線と同じ方向に伸びる長さ 6m の「仮想ポインタ」が表示される. 仮想ポインタがターゲットに触れると, 仮想ボタンと移動先を示す下向きの矢印が表示される. 図 1 に, 移動方法のイメージ図を示す.

仮想ポインタは, 式 (1) に示す位置を中心に, 頭と同じ姿勢を取る. ただし, $\vec{p}_{Pointer}$ および \vec{p}_{Head} は仮想ポインタの回転中心および頭 (HMD) の位置ベクトルである. 評価ではこの回転中心を頭から 0.2m 低い位置とした.

$$\vec{p}_{Pointer} = \vec{p}_{Head} + [0 \quad -a \quad 0]^T \quad (1)$$

$$q_{Pointer} = q_{Head} \quad (2)$$

$q_{Pointer}$ および q_{Head} は, 仮想ポインタと HMD の姿勢を表す四元数であり, これらは常に等しい. したがって, 頭を回転することで, 仮想ポインタを回転し, 仮想空間内のターゲットを選択できる.

仮想ボタンは, 式 (3) に示す通り, 手で触れやすい位置に固定されている. \vec{p}_{Button} は仮想ボタンの位置ベクトル, R_{head} は HMD のワールド座標系での姿勢を表す回転行列である. 仮想ボタンのワールド座標は, ターゲットが選択された時点で決定し, その後は変化しない. 評価では, HMD に固定された座標系で視線方向に 0.4m, 下に 0.14m, 右に 0.03m の位置とした.

$$\vec{p}_{Button} = \vec{p}_{Head} + R_{head} [b \quad -c \quad d]^T \quad (3)$$

仮想ボタンに手で触れると, 仮想ポインタで選択したターゲットに近い, 決められた位置に瞬間移動する.

本移動方法は, ドア, 看板, 家具などのオブジェクトをターゲットとすることで, メタバースなどの仮想的な室内 (生活空間, オフィス, 博物館, 美術館, 店舗など) および屋外 (商店街など) での移動に応用可能である. また, HMD に搭載されたカメラセンサを用いたハンドトラッキング技術によって, 実現可能であるため, 手持ちのコントローラ, HMD 以外のウェアラブルデバイス, 環境に設置するカメラなどの外部デバイスを必要としない. 他のハンズフリーな瞬間移動方法に比べると, ターゲットの選択後, 移動するまでの時間が短い点, 意図しない移動の可能性が低い点, 自然な動作のみで移動できる点などで優れていると考える.

ハンズフリーで手の回転を用いたターゲット選択を行う場合, 高精度なハンドトラッキングが必要であるが, 本移動方法では, HMD の回転を用いているため, その必要がない. また, 特別なジェスチャやキーワードなどを覚えなくても, 仮想ボタンが見えるため, 移動方法が誰にでもわかりやすいと推測される.

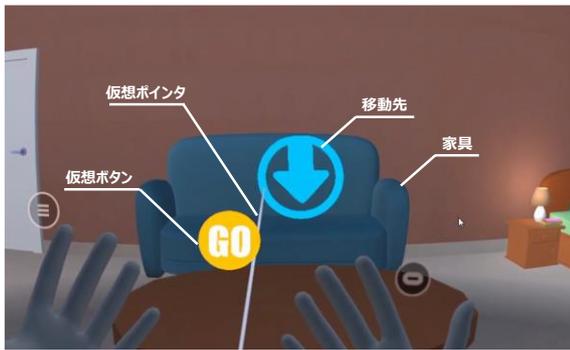


図 1. 提案手法イメージ図

4. 評価用アプリケーション

評価用アプリケーションを、ゲームエンジン Unity (2019.4.4.16f1) で作成した。ハンドトラッキングや HMD の座標取得などに Oculus によるアセット Oculus Integration を用いる。HMD はインサイドアウト方式の Meta Quest 2 を使用した。コントローラを用いる瞬間移動方法とハンズフリーな瞬間移動方法を実装したアプリケーションを開発した。コントローラを用いるアプリケーションでは、仮想ポインタの回転中心はコントローラに固定されている。また、仮想ボタンは表示されず、コントローラのトリガーボタンを人差し指で押して移動する。

図 2 の仮想部屋には、ドア、ソファ、ベッドなど、7つの家具をターゲットとして設置されている。これらのターゲットは、部屋の中の瞬間移動に用いることができる。図 3 にターゲットの配置とターゲット間の距離を示す。



図 2. 実験用仮想空間側面図

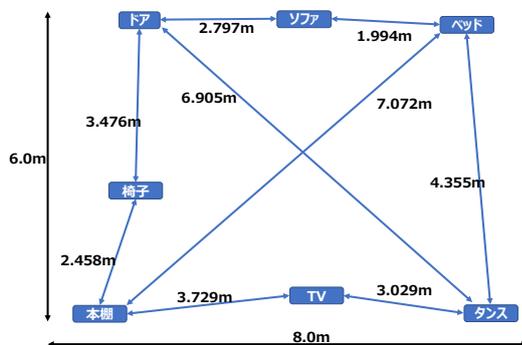


図 3. 実験用仮想空間俯瞰イメージ図

5. ユーザ評価

18~24 歳の大学生と大学院生の男女 24 人の参加者によるユーザ評価を行った。各参加者は、2つの瞬間移動方法

で図 2 に示す仮想的な部屋の中を移動したのち、アンケートに回答した。参加者が用いる移動方法の順序は、ランダムに決定した。

参加者には、指定されたルートで部屋を移動するように指示を行った。表 1 に、3つの移動タスクで選択すべきターゲットを示す。

参加者は、立った状態でタスクを実行した。まず、体験している評価用アプリケーションにおける移動方法とタスク内容の説明を受けた。つぎに、仮想空間 (図 2) を目視で確認し、瞬間移動の試行を 1-2 回行った。その後、移動するたびに、次に選択すべきターゲットが、口頭で伝えられた。また、移動先を間違えた場合は、移動前の場所に戻るよう指示された。

表 1. 実験移動タスク

タスク 1	ソファ-ベッド-ダンス-TV-本棚-椅子-ドア
タスク 2	ベッド-ダンス-本棚-ドア
タスク 3	ダンス-ベッド-本棚-ドア

アンケートでは、5段階評価、移動方法の選択、自由記述の3種類の設問に対する回答を得た。「簡単であるか」、「VR 酔いを感じたか」、「疲れを感じたか」については、「全くあてはまらない (1)」から「とても当てはまる (5)」の5段階で評価した。移動方法は、「どちらが簡単か」、「どちらが疲れを感じたか」、「瞬間移動に使用したい手法」について、「コントローラ」、「どちらかといえばコントローラ」、「どちらとも言えない」、「どちらかといえば手」、「手」から選択することで、比較した。参加者は、両アプリケーションの体験中に気づいた点を最後に記述した。

6. 結果

6.1 所要時間および移動速度

図 4-5 にタスク 1、タスク 2、タスク 3、3つ合計での所要時間を手法別で示す。全ての結果において、ハンズフリーで移動した場合の方が、平均移動時間が有意に長くなっている。各タスクにおける平均移動速度を表 2 に示す。

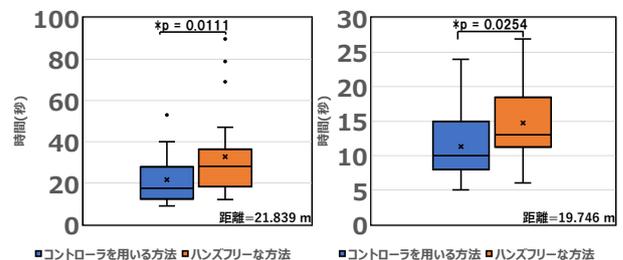


図 4. タスク 1(左)及び 2 の所要時間

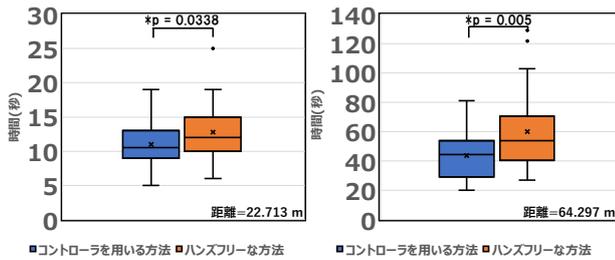


図 5. タスク 3(左)及び合計の所要時間

表 2. 平均速度(km/h)

タスク	コントローラ	ハンズフリー
1	4.674	3.673
2	7.459	5.734
3	8.489	7.075

6.2 移動の失敗

タスク 1 において「本棚から椅子への移動」ではハンズフリーな瞬間移動方法による移動の失敗が多く確認された。失敗時は、椅子の選択後、ドアが選択された状態で仮想ボタンを押し、ドアに移動していた。表 3 にそれぞれの方法での成功と失敗の回数を示す。コントローラを用いる方法では 1 回に対し、ハンズフリーな方法では 13 回の失敗が起きた。タスク 2 及び 3 において、同様の事例はほとんどなかった。

表 3. 本棚から椅子への移動の失敗回数

使用方法	成功回数	失敗回数
コントローラ	23	1
ハンズフリー	20	13

6.3 容易さ

容易さの 5 段階評価を図 6 に、一対比較結果図 7 を示す。2 つの 5 段階評価結果に対し、対応ありの t 検定を行った結果、ハンズフリーな移動方法の平均が有意に低かった。

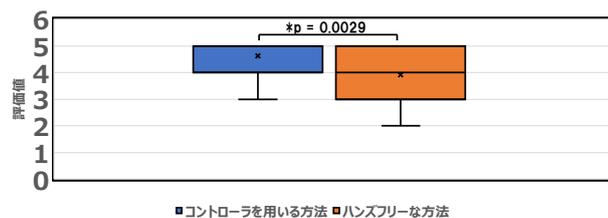


図 6. 容易さ 5 段階評価結果

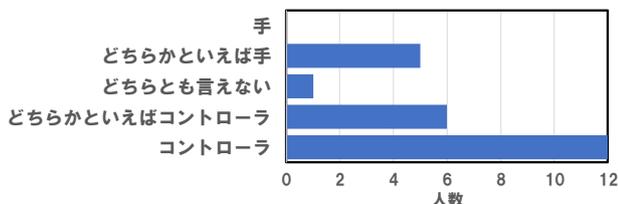


図 7. 容易さの一対比較結果

6.4 疲労度および VR 酔い

疲労度の一対比較結果を図 8 に、使用中感じた疲労及び VR 酔いの程度の結果を図 9 に示す。使用中感じた疲労及

び VR 酔いの 5 段階評価結果に対して、対応ありの t 検定を行った結果、どちらの結果にも有意差は確認されなかった。

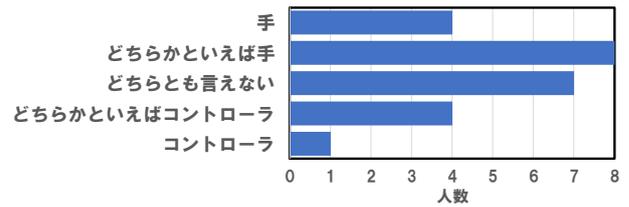


図 8. 疲労度の一対比較結果

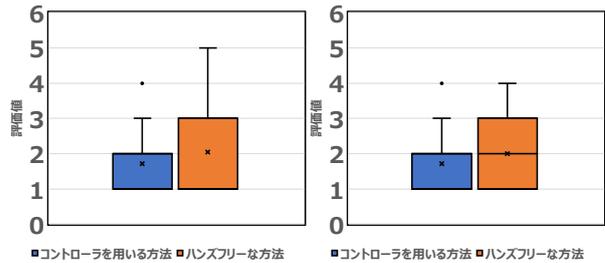


図 9. 疲労(左)および VR 酔いの 5 段階評価結果

6.5 今後使用したい方法

図 10 では今後使用したい方法について、一対比較の結果を示す。

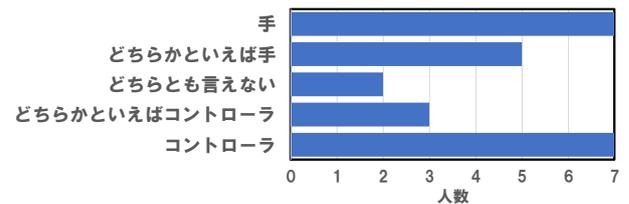


図 10. 今後使用したい方法の一対選択結果

6.6 コメント

ハンズフリーな瞬間移動方法に対して、以下のコメントが記述された。

- ・ボタンと矢印の表示で混乱してしまう
- ・ボタンの位置が不自然な場合があった
- ・HMD が重くて操作しづらい
- ・首が疲れる
- ・VR 酔いを感じた
- ・直感的操作ができた
- ・コントローラより自然に操作できる

7. 考察

7.1 移動効率

本研究で評価したハンズフリーな瞬間移動方法の移動効率は、コントローラを使用した方法よりもやや悪いと考える。第一に、図 4 および 5 に示す通り、各タスクの所要時間は、コントローラ方法より有意に長かった。第二に、表 3 に示す失敗回数ではタスク 1 においてコントローラ方法より多かった。しかし、表 2 に示す平均速度が現実世界の歩行速度と同程度であることから、ハンズフリーな方法

でも実用上十分効率的に仮想空間内を移動できると考える。瞬間移動の平均距離が長いほど、効率が向上する傾向が図3及び表2から確認できる。

7.2 容易さ

ハンズフリーな瞬間移動方法は、コントローラを用いた移動方法よりも移動がやや難しいと考える。第一に、図6に示す評価結果で有意な差があった。第二に、図7に示す一対比較結果において、コントローラの方が容易であると感じた参加者が多かった。しかし、5段階評価の平均(3.92)および中央値(4)から、ハンズフリーな方法でも多くの人が容易に移動できると考える。

7.3 疲労およびVR酔い

移動による疲労とVR酔いの程度には、2つの方法に大きな違いがないと考える。図9の結果において、どちらにも有意な差がなかったからである。移動に必要な頭と手の動きは、ハンズフリーな方法の方が大きい、その影響は小さいものと考えられる。

7.4 有用性

本研究で評価した視線と仮想ボタンを用いた仮想空間内のハンズフリーな瞬間移動方法は、有用と考えられる。まず、効率と容易さは、コントローラを用いた移動方法にやや及ばないものの、移動速度と5段階評価の結果をみると実用上十分なレベルにあるといえる。そして、図10の結果から、ハンズフリーな方法を選択するユーザが一定以上の割合であることも、有用性を示している。

7.5 問題点

既に述べた通り、ハンズフリーな移動方法は、手持ちコントローラを用いる移動方法よりも効率と容易さでやや劣るという問題があると考えられる。移動先がより低い位置に設置された場合、仮想ポインタを当てた後、使用者が仮想ボタンに触れる前に視線の移動が発生し、移動先の変更が起きやすい点が弱点とみられる。椅子への移動を行うべき時に、その後にあるドアに移動する失敗が多く発生していた(表3)。また、参加者のコメントなどから、仮想ボタンと移動先の矢印の両方に注意を向ける必要がある点、HMDの重量によっては、重さを感じ、疲れの原因になりうる点も、弱点として挙げられる。仮想ボタンの位置、選択された移動先の視覚フィードバック方法などについても検討の余地があり、これらの改善によって、効率や容易さも向上するかもしれない。

8. おわりに

視線と仮想ボタンを用いたハンズフリーな瞬間移動方法と手持ちコントローラを用いた移動方法を移動効率、移動の容易さ、疲労度、VR酔いなどの観点から比較した。移動効率と移動の容易さは、コントローラを用いた方法の方が優れているもののその差は大きくなく、実用上十分であると考えられる。また、疲労とVR酔いは、ハンズフリーな

方法でも問題にならないと考える。以上から、本研究で評価したハンズフリーな瞬間移動の方法は、有用であり、ハンズフリーなVR体験での実用に耐えるものであると予測する。椅子やソファなど、低い位置の物体を見て移動先を選択する場合は、無意識に別の移動先を選択する失敗が起きやすくなる点、移動先以外に仮想ボタンや矢印表示に注意を向けることで認知負荷が高くなる点などから、改善のヒントが得られた。

参考文献

- [1]Zayer, M. A., MacNeilage, P., and Folmer, E. Virtual Locomotion: A Survey. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics* 26, 2315–2334. doi:10.1109/TVCG.2018.2887379 (2020).
- [2]Heni, C., Métayer, N., and Souliman, N. Literature review of locomotion techniques in virtual reality. *International Journal of Virtual Reality* (2020).
- [3]Prithul, A., Adhanom, I. B., Folmer, E. Teleportation in Virtual Reality; A Mini-Review; *Front. Virtual Real.* 2:730792. (2021).
- [4]Bolte, B., Bruder, G., and Steinicke, F. The Jumper Metaphor: An Effective Navigation Technique for Immersive Display Setups, in *Proceedings of Virtual Reality International Conference (VRIC)*, 6-8. (2011).
- [5]Bozgeyikli, E., Rajj, A., Katkooori, S., and Dubey, R. Point & Teleport Locomotion Technique for Virtual Reality; *Proceedings of the 2016 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, 205-216. (2016).
- [6]Schäfer, A., Reis, G., Stricker, D. Controlling Teleportation-Based Locomotion in Virtual Reality with Hand Gestures: A Comparative Evaluation of Two-Handed and One-Handed Techniques; *Electronics*. 2021, 10, 715. (2021).
- [7]Pfeuffer, K., Mayer, B., Mardanbegi, D., Gellersen, H. Gaze + pinch interaction in virtual reality; *Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction*. Pp.99-108. (2017).
- [8]Von Willich, J., Schmitz, M., Müller, F., Schmitt, D., and Mühlhäuser, M. Podoportation: Foot-Based Locomotion in Virtual Reality, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, April 2020, Pp.1-14 (2020).