

## 光学式マウスのセンサーを用いた靴型 VR デバイスの開発と評価 Development and Evaluation of a Shoe-Type VR Device Using an Optical Mouse Sensor

伊藤 開斗<sup>†</sup>  
Kaito Ito

伊藤 久祥<sup>†</sup>  
Hisayoshi Ito

### 1. はじめに

Virtual Reality(VR)は仮想的な空間にオブジェクトを配置することで、現実と同様の体験を提供する。そのためには空間内を移動する操作は不可欠であるが、従来は手で把持したコントローラーを利用することが一般的である。近年、手の触覚や力覚を伝達する感覚ディスプレイが開発され、VR においても現実と同様の手の動作が求められるようになった[1]。これに伴い、コントローラー以外の操作手法で空間を移動する手段の必要性が高まっている。特に足による歩行動作を移動操作に割り当てる手法は、自然な対応づけが可能であることから、習熟しやすく幅広い層の利用者に対応できる可能性を持つ。

歩行動作を移動操作とするための入力装置としては、例えば VR トレッドミルのように専用のステージ上で専用靴を着用したユーザーが足を滑らせる手法が存在する[2]。しかしながら、動くユーザーを支えるために機器全体の大きさや重量が必要なため、設置場所が限られる上に移設も困難である。これに対して、Cybershoes[3]は座面の高い椅子に座りながら用いる靴型の入力装置で、底面のローラーによって爪先方向の前後移動を検出する。トレッドミルと比較すると、靴型デバイスを用いる手法は擬似的な歩行動作になる一方、設置や運搬をより手軽に行えるという利点がある。しかしながら、Cybershoes は足を左右方向へ滑らせる移動に対応できないため、現実の脚部動作の一部しか再現できない制約がある。

以上をふまえ、本研究では、特に靴型の入力装置に着目し、より自由度の高い入力を受けつけ、現実により近い多様な歩行動作を再現することを目指した VR 空間移動用コントローラーを提案する。本稿では、著者が試作した靴型デバイスを使用して VR 空間内での歩行動作を行い、従来の手による操作と比較して操作性や没入感などの主観にどのような差が生じるかを検討する。

### 2. 提案手法

本研究のために開発した靴型 VR デバイスおよび靴型 VR デバイス用 VR システムについて以下に説明する。

#### 2.1 靴型 VR デバイス

前述した Cybershoes は、ローラーにより前後方向の移動のみを検出することが可能であり、操作の自由度に制限があった。これに対し、本研究で提案する靴型 VR デバイスは、光学式マウスに用いられるセンサーを利用することで、前後左右、2 次元方向の足の移動量を検出できる。このセンサーは、3D プリンターで製造したケースに固定されており、靴底に設置されている。

さらに、使用者の足の動きを阻害しないよう、自然な歩行動作を可能にするため、つま先部分と踵部分の 2 箇所にてケースを分けて設計した。また、足が床に接地する際には踵側がわずかに高くなるように踵側のケースに  $8.5^\circ$  の勾配を設けている。この工夫により、装着者はより自然な姿勢で VR 空間を歩行することが可能となり、さらに没入感と操作の快適性を向上させることが期待される。実際に制作したデバイスを図 1 に示す。



図 1 開発した靴型 VR デバイス

#### 2.2 VR システム

Cybershoes 同様に、回転椅子に着席した状態で使用することで、転倒のリスクを減らしながらも  $360^\circ$  全方位への移動を可能とする。本研究におけるシステムの概要図を図 2 に示す。

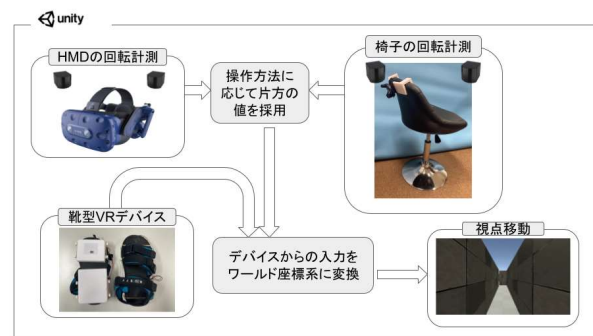


図 2 システム概要図

本システムは提案デバイス及び VR ヘッドセットである HTC Vive, Unity の 3 つから構成される。以下よりシステムの詳細について説明する。

##### 2.2.1 靴型 VR デバイス

本システムでは、Unity のスクリプトを通じてマウスセンサーから得られる値を直接使用している。このセンサーはローカル座標系における 2 次元方向の移動量を検出し、x 軸は右方向が正、左方向が負、y 軸は上方向が正、下方向

<sup>†</sup> 岩手県立大学 Iwate Prefectural University



### 3.3 実験手順

被験者ごとに焦点距離が異なるため、初めに焦点距離の調整を行った。

実験では(a)コントローラー、(b)頭部計測、(c)腰部計測の3種類の操作方法について、全6通りの提示順を設定し被験者ごとに割り振った。

被験者は各操作方法の説明を受け練習を行った後、タスクを実行し、IPQ、SSQ、SUSに回答する。3回目のタスク終了後、事後アンケートに回答し実験終了とした。

### 3.4 結果

次節より各アンケートの結果について説明する。

#### 3.4.1 Igroup Presence Questionnaire (IPQ)

各操作方法におけるカテゴリ別平均スコアを表1に示す。

表1 カテゴリ別平均スコア(IPQ)

カテゴリ	(a)	(b)	(c)
一般的な臨場感	4.0556	4.6111	4.5556
空間的な臨場感	3.3111	3.900	3.8556
没入感	3.5556	3.5139	3.5139
現実感	1.8778	2.2222	2.5972

平均値は一般的な臨場感と空間的な臨場感の項目において(b), (c), (a)の順にスコアが高かった。没入感のカテゴリでは(a)が一番高く、(b), (c)は等しい結果となった。現実感のカテゴリにおいては(c), (b), (a)の順でスコアが高くなっていた。

次に各標本についてカテゴリ別に検定を行った。検定にあたり標本の正規性をシャピロ・ウィルク検定により検定したところ、一般的な臨場感については正規性が認められず、他3つのカテゴリについては正規性が認められた。また、正規性が認められたカテゴリについてルビーン検定を行ったところ3つのカテゴリにおいて等分散性が認められた。したがって本研究における検定では一般的な臨場感についてはフリードマン検定、他3つのカテゴリについては反復測定分散分析を採用し、3群間の比較を行った。各カテゴリの3群比較の結果を表2に示す。

表2 3群比較の結果(IPQ)

カテゴリ	p値
一般的な臨場感	0.1389
空間的な臨場感	0.0467 *
没入感	0.9736
現実感	0.0105 *

p < 0.05 : \*

検定の結果、空間的な臨場感と現実感カテゴリにおいてp < 0.05となり、3群間で有意差が見られたが、一般的な臨場感と没入感カテゴリでは有意差が見られなかった。

次に有意差があると判断した空間的な臨場感と現実感カテゴリにおいてそれぞれ2群比較を行った。(a), (b)の2群比較の結果を表3、(a), (c)の結果を表4に示す。

表3 (a), (b)の2群比較の結果(IPQ)

カテゴリ	p値
空間的な臨場感	0.0942
現実感	0.0153 *

p < 0.0167 : \* (補正後)

表4 (a), (c)の2群比較の結果(IPQ)

カテゴリ	p値
空間的な臨場感	0.0148 *
現実感	0.0769

p < 0.0167 : \* (補正後)

2群比較にはボンフェローニ補正を用いたペアワイズt検定を採用した。

((a)(b))の2群比較では空間的な臨場感には有意差が見られたが、現実感については有意差が見られなかった。

((a)(c))の2群比較では現実感には有意差が見られたが、空間的な臨場感については有意差が見られなかった。

#### 3.4.2 Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)

各操作方法におけるカテゴリ別平均スコアを表5に示す。

表5 カテゴリ別平均スコア(SSQ)

カテゴリ	(a)	(b)	(c)
吐き気	11.1300	18.0200	19.6100
眼精疲労	19.7922	23.5822	27.7933
失見当識	21.6533	28.6133	26.2933
総合スコア	19.9467	26.3878	28.4655

平均値では失見当識のカテゴリにおいて(b), (c), (a)の順にスコアが高くなっており、その他の3つのカテゴリでは(c), (b), (a)の順にスコアが高くなっている。

SSQにおいても標本の正規性について検定を行ったところ、すべてのカテゴリで正規性は認められなかった。よって、IPQと同様にフリードマン検定を採用した。各カテゴリの3群比較の結果を表6に示す。

表6 3群比較の結果(SSQ)

カテゴリ	p値
吐き気	0.1794
眼精疲労	0.0426 *
失見当識	0.7442
総合スコア	0.0684

p < 0.05 : \*

検定の結果、眼精疲労のみ有意水準0.05で3群間に有意差があると判断した。

次に眼精疲労における2群比較の結果を表7に示す。2群比較にはウィルコクソンの符号順位検定を採用した。

表7 2群比較の結果(SSQ - 眼精疲労)

組み合わせ	p値
(a), (b)	0.3598
(a), (c)	0.0912
(b), (c)	0.1833

p < 0.05 : \*

眼精疲労のカテゴリにおいて、3群間に有意差は見られたが、2群間ではすべての組み合わせで有意差は見られなかった。

### 3.4.3 System Usability Scale (SUS)

各操作方法におけるカテゴリ別平均スコアを表 8 に示す。

表 8 カテゴリ別平均スコア (SUS)

カテゴリ	(a)	(b)	(c)
総合スコア	77.2222	66.5278	69.0278

平均値では(b), (c), (a)の順にスコアが高い。SUS においても IPQ 同様検定を行ったところ、正規性、等分散性が認められたため、反復測定分散分析を行った。3 群比較の結果、p 値は 0.1542 となり、SUS において 3 群間に有意差は見られなかった。

### 3.4.4 事後アンケート

被験者が最も使いやすいと回答した操作方法について、被験者 18 名中 13 名が(a), 残り 5 名が(c)と回答した。

次に、靴型 VR デバイスを使用して良いと思った点、悪いと思った点について回答した内容を表 9 に示す。末尾の数字は件数を表す。

表 9 提案手法を使用した感想

良いと思った点	悪いと思った点
現実感: 8	センサーの精度: 8
直感的な操作が可能: 6	疲労感: 6
没入感: 1	装着感: 2
	酔い: 1

## 4. 考察

本研究では、IPQ において、従来のコントローラーを使用した操作方法と比較して、頭部計測、腰部計測ともに現実感のカテゴリで高いスコアを得たことが示された。特に腰部計測の手法では、有意差が認められ、VR 環境における現実に近い歩行動作の入力が現実感を増す要因であると考えられる。

一方、一般的な臨場感および空間的な臨場感に関しては、腰部計測の手法が低いスコアとなった。これは、方向転換に際して椅子を回転させる必要があったため、実際の空間の椅子の位置を意識することが現実を意識させ、臨場感を損ねたと推測される。

SSQ では、眼精疲労のカテゴリにのみ有意差が見られた。このカテゴリに属する SSQ の設問には「fatigue」という項目が含まれており、この項目を「疲労感」と訳してアンケートを実施した。そのため、足を動かす必要がある提案手法において、疲労感のスコアが高くなり、結果として眼精疲労のスコアが高くなった可能性がある。そこで、「fatigue」の項目のみを除いて再度集計し、3 群比較を行った。眼精疲労の平均スコアを表 10、3 群比較の結果を表 11 に示す。

表 10 眼精疲労の平均スコア (一部項目)

カテゴリ	(a)	(b)	(c)
眼精疲労	16.4233	16.8444	19.7922

表 11 眼精疲労の 3 群比較の結果 (一部項目)

カテゴリ	p値
眼精疲労	0.1778

p < 0.05 : \*

3 群比較の結果、有意差は見られなかった。このことから、眼精疲労に加えて身体運動に伴う疲れが疲労感の評価に強く影響を与えた可能性が考えられる。

SUS においては、コントローラーが最も高いスコアを示し、次いで腰部計測のスコアが高かった。腰部計測が頭部計測よりも高いスコアを得たのは、移動する方位の決定に腰部の向きを用いることで、現実の歩行動作により近い直感的な操作が可能となったためであると考えられる。しかし、どちらの提案手法でも足を常に動かし続ける必要があり、これが操作の面倒さとして反映されたため、コントローラーが最も高いスコアを示したと考えられる。

提案手法に対するネガティブなフィードバックとしては、意図しない動作の報告が多く見られた。これは、マウスセンサーからの値を直接使用していたために生じるノイズが原因であると推測される。ノイズの原因としては、センサーの精度、床面の素材、足と床の接触時に発生するブレなどが考えられる。また、デバイスの装着感についても不満が寄せられた。この問題に対処するためには、マウスセンサーを靴に固定するケースの形状や固定方法の再検討が求められる。

## 5. おわりに

本稿では、著者が試作した靴型デバイスを使用した VR 空間内での歩行動作と、従来の手による操作を比較して操作性や没入感などの主観にどのような差が生じるかを検討した。結果、靴型デバイスを使用することで現実感を高めることが示唆された。

今後の課題としては、VIVE Tracker を使用することで得られた現実感をさらに増大させるために、9 軸 IMU を活用して現実空間の動作により近づけることが考えられる。このアプローチにより、さらなる現実感の向上が期待される。

また、実験中には意図しない動作が顕著に観察され、これが IPQ や SSQ のスコアに影響を及ぼしていると考えられる。このため、ノイズの原因を特定し、それを減少させることによって、より自然な歩行動作を実現し、最終的には操作性や没入感をさらに向上させることが今後の重要な課題である。

## 参考文献

- [1] Vivian Shen, Tucker Rae-Grant, Joe Mullenbach, Chris Harrison, and Craig Shultz. "Fluid Reality: High-Resolution, Untethered Haptic Gloves using Electroosmotic Pump Arrays", UIST '23: Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, Article 8, Pages 1–20, October 2023.
- [2] KATVR : <https://katvr.jp/> (2024.6.13)
- [3] Cybershoes : <https://www.cybershoes.com/> (2024.6.13)
- [4] 大道雄也, 伊藤久祥, "ドームスクリーンを用いた VR における頭部運動補償の効果の検討", FIT2022(第 21 回情報科学技術フォーラム), 第 3 分冊, pp109-112, 2022
- [5] igroup.org: igroup presence questionnaire (IPQ) overview , <http://www.igroup.org/pq/ipq/index.php>(2024.6.13)
- [6] R.S.Kennedy, et al.: Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness, The International Journal of Aviation Psychology, 3(3), pp.203-220, 1993
- [7] Brooke J: SUS: A "quick and dirty" usability scale, usability evaluation in industry, pp. 107-114, 1996.