

# VR空間における遠距離物体選択のための手だけテレポート

大原 佳梨<sup>1,a)</sup> 齊藤 翼<sup>1</sup> 井尻 敬<sup>1</sup>

**概要：**Virtual Reality (VR) 空間における物体選択では、手に持ったコントローラから投射した直線状のレイを物体と交差させる手法が広く用いられる。しかし、この手法では手の微小回転がレイの大きな変化を引き起こすため遠距離物体の選択が難しいという問題がある。本研究では、VR空間において手軽にかつ正確に遠距離物体を選択できる手法の実現を目的とし、選択対象付近に手(コントローラ)だけをテレポートさせ、テレポートした手から選択用のレイを投射する手法を提案する。特に本研究では、複数の選択可能物体が垂直な壁に並んだ状態を仮定し、選択対象の大きかな方向をポインティングすることで手のテレポート先を決定する。提案手法の有用性を確認するため、手元のコントローラからレイを投射する従来手法と提案手法を利用して遠距離物体選択を行う際の選択にかかる時間と選択ミス数を比較した。その結果、提案手法を利用することで、遠距離物体の選択を近距離物体と似た感覚で行える可能性や、遠距離物体の選択ミスを削減できる可能性が示唆された。

## 1. はじめに

Virtual Reality (VR) 空間における物体選択は、基本的かつ重要なタスクである。VR空間における物体選択には、手に持ったコントローラから投射した直線状のレイと物体との交差を利用する手法が広く利用される [1]。しかし、この選択手法では手の微小回転がレイの大きな変化を引き起こすため、遠距離にある物体の選択が難しいという問題がある。

VR空間において遠距離物体とインタラクションするために様々な手法が研究されている。例えば、別視点より得られる映像を提示する窓を通じて物体選択する手法や [2]、VR空間の2地点をつなぐポータル概念を利用し遠距離物体を選択する手法 [3]、鏡を利用して遮蔽物の後ろに隠れた物体を選択する手法 [4] などが発表されている。しかし、これらの手法では、物体選択の前に窓・ポータル・鏡を選択対象が見易い位置に設置する必要がある。

本研究では、VR空間においてユーザから遠距離にある物体を手軽にかつ正確に選択できる手法の実現を目的とし、選択対象付近に手(コントローラ)だけをテレポートさせ、テレポートした手からレイを投射する手法を提案する。VR空間ではアプリケーションに依存して様々な対象を選択することが考えられるが、本研究では、複数の選択対象が垂直な壁に複数配置された状態を仮定する。提案手法において、まずユーザは、把持したコントローラから投

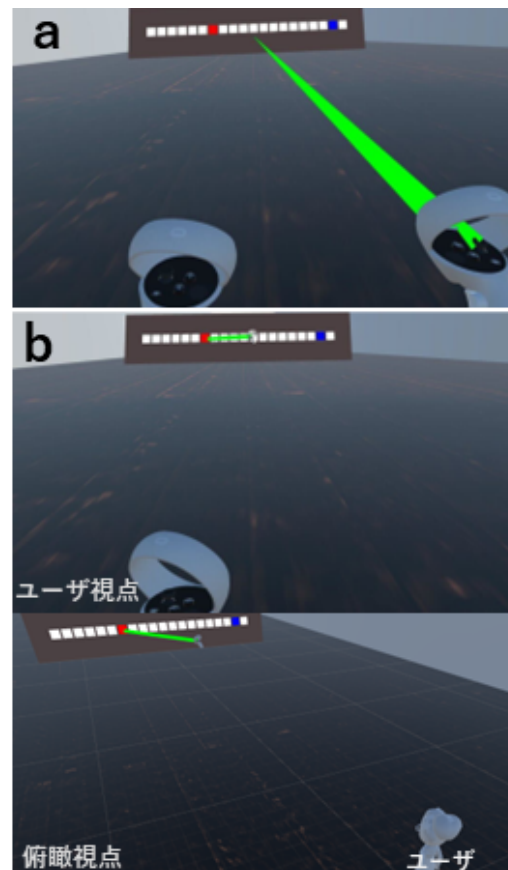


図 1 提案手法による物体選択。レイを選択対象の方向に大きかなに向けて『テレポートボタン』を押すと手(コントローラ)だけがテレポートし(a)、その位置から選択用のレイが投射される(b)。

<sup>1</sup> 芝浦工業大学  
<sup>a)</sup> al20083@shibaura-it.ac.jp

射されるレイを選択対象に大まかに向けた状態で『レポートボタン』を押す。すると、現在のレイ上でかつ選択対象付近の点へ手だけがレポートする。次に、ユーザは、レポートした手から投射されるレイを選択対象と交差させて『選択ボタン』を押すことで対象を選択する。この手法では、レイを投射する手を選択対象付近に配置することで、手の回転の影響が相対的に小さくなり、近くにある物体を選択するのと同じ感覚で遠距離物体を選択できるようになると考えられる。

提案手法の有用性を確認するため、手元のコントローラからレイを投射する従来手法と、レポートしたコントローラからレイを投射する提案手法を利用して遠距離物体選択を行うユーザスタディを実施した。その結果、提案手法を利用することで、遠距離物体の選択を近距離物体と似た感覚で行える可能性や、遠距離物体選択における選択ミスを削減できる可能性が示唆された。

## 2. 関連研究

### 2.1 VR空間における遠距離物体選択

VR空間における物体選択には、自身の手を利用して直接対象に触れる手法 [5] と、手や視線の方向に投射されるレイを用いて間接的に対象に触れる手法 [1] が存在する。さらに、VR空間における遠距離物体を選択するため、これらの手法と、身体拡張・ポータル・レポートを組み合わせた手法が提案されている。

身体拡張の概念を利用した遠距離物体の選択手法が提案されている。Poupyrevら [6] は、ユーザの手的位置が腕の長さの $\frac{2}{3}$ よりも遠くなると、仮想的な手の距離を非線形に伸ばすことで、遠距離物体に直接触れられる手法を提案した。また、Liら [7] は、手を伸ばした距離を線形に引き延ばすことで、遠距離物体の直接選択を実現した。しかし、これらの手法は手の距離を伸長するものであるため手が届く距離に限界があり、また、微小な手の方向の違いが遠方では大きな差となるため正確な遠距離物体の選択が難しい。

ポータルの概念を利用し遠距離物体を選択する手法も存在する。ポータルとは、VR空間における異なる2地点を繋げる通路のことである。Kiyokawaら [2] は、選択したい遠距離物体の近くに視点を配置し、この視点からの映像を表示する窓状のインタフェース Tunnel Window を提案した。この手法では、窓枠内にレイを向けることで窓枠内の遠距離物体を選択できる。Liら [4] は、遮蔽物の後ろに隠れた物体を選択するため、VR空間に鏡を配置し、鏡に映った物体をレイにより選択できる手法を提案した。Hanら [3] は、VR空間に二つの地点を結ぶポータルを配置し、このポータルを通じて遠距離物体を選択・操作できる手法を提案した。これらの手法では遠距離物体や遮蔽物体の選択が可能であるが、物体選択の前に窓・鏡・ポータルを選択対象が見やすい位置に注意深く設置する必要がある。

レポートを活用した遠距離物体の選択手法も存在する。Mendesら [8] は、選択操作を繰り返すことで段階的に選択対象付近にレポートする手法を提案した。この手法では、ユーザが円錐状の選択領域を用いて選択操作を行うと、その円錐領域内の複数の物体が選択され、選択された複数物体の近くにユーザがレポートする。ユーザはこの操作を繰り返すことで、目標物体を選択できる。しかし、この手法では逐次的な選択が必要となり、選択に時間がかかる可能性がある。

### 2.2 運動行動モデル

物体を選択する際にかかる時間を予測するための運動行動モデルとして Fitts の法則 [9] が知られる。このモデルは、以下のように表される、

$$MT = a + b \cdot ID. \quad (1)$$

ここで、 $MT$  はターゲットをポインティングするのにかかる時間、 $a$  および  $b$  は実験結果から線形回帰によって求められる定数である。また、 $ID$  はポインティングの困難度を表す指標であり、直線的に手を動かして対象をポインティングするタスクでは下記のものが利用される [10]、

$$ID_{line} = \log_2 \left( \frac{A}{W} + 1 \right). \quad (2)$$

ここで、 $A$  は開始時の位置からターゲットまでの距離、 $W$  はターゲットの幅である。

Fitts の法則は、様々な種類の選択操作へ応用されている。Kopperら [11] は、直線状のレイによる物体のポインティングに Fitts の法則を応用し次の困難度指標を提案した、

$$ID_{ray} = \left[ \log_2 \left( \frac{\alpha}{\omega^k} + 1 \right) \right]^2. \quad (3)$$

ここで、 $\alpha$  は開始時のレイの方向と目標物体への方向とのなす角、 $\omega$  は目標物体の角度幅、 $k$  は重み定数である。本研究では、この Kopper らの運動モデルを用いて実験結果の解析を行う。

## 3. 提案手法

本研究の目的は、VR空間においてユーザから遠距離にある物体を手軽にかつ正確に選択できる手法の実現である。ここで、把持したコントローラからレイを投射し物体選択を行う従来手法では、手の微小回転が遠距離ではレイの大きな変化を引き起こすため、遠距離物体の選択が困難である。そこで本研究では、(Step1) まず手 (コントローラ) のみを選択対象付近にレポートさせ、(Step2) レポートした手から選択用のレイを投射する手法を提案する。レイを投射する手を選択対象付近に配置することで、手の回転の影響が相対的に小さくなり、近くにある物体を選択するのと同じ感覚で遠距離物体を選択できるようになると考

えられる。

Step1 の手のテレポート先を決定する効率的な手法は、選択対象の状態（大きさ、向き、選択可能物体の配置・分布）に依存して複数考えられる。本研究では、複数の物体が垂直な壁に並んだ状態を仮定し、レイにより対象物体付近をポインティングすることで手のテレポート先を決定する手法を提案する。具体的な提案手法のユーザインタフェースは次のとおりである。ユーザが、壁のある地点をレイによりポインティング（図 1a）して『テレポートボタン』を押すと、壁からの距離が 20m でレイ上の点に手だけがテレポートする（図 1b）。次に、ユーザは、テレポートした手から出るレイを選択対象と交差させて『選択ボタン』を押すことで、その物体を選択できる。また、『戻るボタン』により、テレポートした手をもとの位置に戻すことも可能である。

#### 4. ユーザスタディ

提案手法の有用性を評価するため、ユーザスタディを実施する。本ユーザスタディでは、従来手法（手元のコントローラからレイを投射）と提案手法（テレポートしたコントローラからレイを投射）を用いて遠距離物体選択を行った場合の選択にかかる時間と選択ミス数を比較する。

実験に利用する VR 空間を図 2 に示す。この空間では、実験参加者から  $D$  m 離れた垂直の壁にサイズ 1 m × 1m のボタンが 20 個並んで配置され、このうち 2 つが赤と青にハイライトされる。選択タスクが始まると、実験参加者は、まず赤いボタンを選択し次に青いボタンを選択する。赤青 2 回のボタン選択が完了すると、赤と青の位置が変化し次の選択タスクが開始される。

まず、実験参加者は練習タスクを実施する。練習タスクでは、壁までの距離  $D = 50$  m の条件の下、従来手法と提案手法それぞれを用いて選択タスクを 5 分間繰り返す。次に実験参加者は計測タスクを実施する。計測タスクでは、下記の 4 条件それぞれで選択タスクを 50 回ずつ実施する、

- 条件 1 :  $D = 50$  m, 従来手法を利用 (図 2a),
- 条件 2 :  $D = 100$  m, 従来手法を利用,
- 条件 3 :  $D = 50$  m, 提案手法を利用 (図 2b),
- 条件 4 :  $D = 100$  m, 提案手法を利用.

従来手法 (条件 1, 2) と提案手法 (条件 3, 4) の実施順番は参加者ごとに变化させ、条件 1-2-3-4 の順に実施する参加者と条件 3-4-1-2 の順に実施する参加者が均等になるようにする。また、本ユーザスタディでは、選択タスク 1 回ごとにテレポートを実施するのではなく、ユーザが選択しづらいと感じた時にコントローラを手元に戻し再度テレポートさせることとした。すべてのタスク終了後、System Usability Scale (SUS) に回答してもらう。

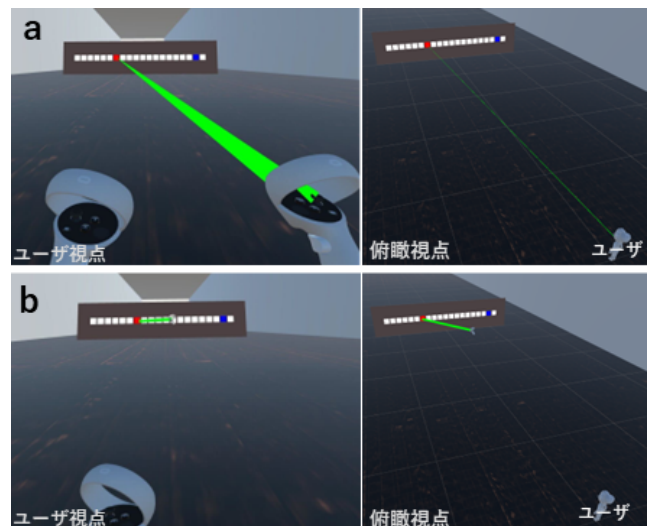


図 2 選択タスクにおけるユーザ視点と俯瞰視点の映像。(a)  $D = 50$  m で従来手法を利用した選択と、(b)  $D = 50$  m で提案手法を利用した選択。

#### 5. 結果と考察

工学系の大学生 5 名の協力のもとユーザスタディを実施した。実験参加者のうち 2 名 (A,B) は Head Mounted Display (HMD) の利用経験があまりなく、残りの 3 名 (C,D,E) は普段から HMD を利用していた。

選択タスクにかかった時間を図 3 に示す。各グラフの横軸は Kopper らの困難度指標  $ID_{ray}$  [11] (式 3) であり、縦軸は選択タスクにかかった時間  $MT_{ray}$  である。ここで、 $MT_{ray}$  の計算の際、 $\alpha$  は赤色と青色のボタンのなす角、 $\omega$  は青色のボタンの角度幅、 $k = 2$  とした。さらに、各実験参加者・各条件の結果に対して回帰分析を適用した際の決定係数  $R^2$  と選択ミス数を表 1, 2 に示す。

従来手法を用いた選択タスクの結果 (条件 1, 2) を見ると、散布図のばらつきが大きく決定係数も小さいことから、比較的近距离の物体選択に対して設計された Kopper のモデルでは、遠距離物体の選択にかかる時間を正しく予測できていないことが分かる。一方、提案手法の結果 (条件 3, 4) を見ると、全 10 件の結果のうち 8 件で決定係数の値が 0.5 を超えており、良い予測精度が得られている。これにより、選択対象付近にテレポートさせた手からレイを投射することで、近距离物体の選択と似た感覚で遠距離物体を選択できる可能性が示唆された。

選択ミス (表 2) に着目すると、従来手法と比較して、提案手法を利用することで、選択ミスを大幅に削減できたことが分かる。これにより、手だけを選択対象付近にテレポートさせることで、遠距離物体選択の正確性を向上できる可能性も示唆された。

最後に、提案手法に対する SUS アンケートの結果を図 4 に示す。SUS スコアの平均は 84.5 で、非常に高い値を示

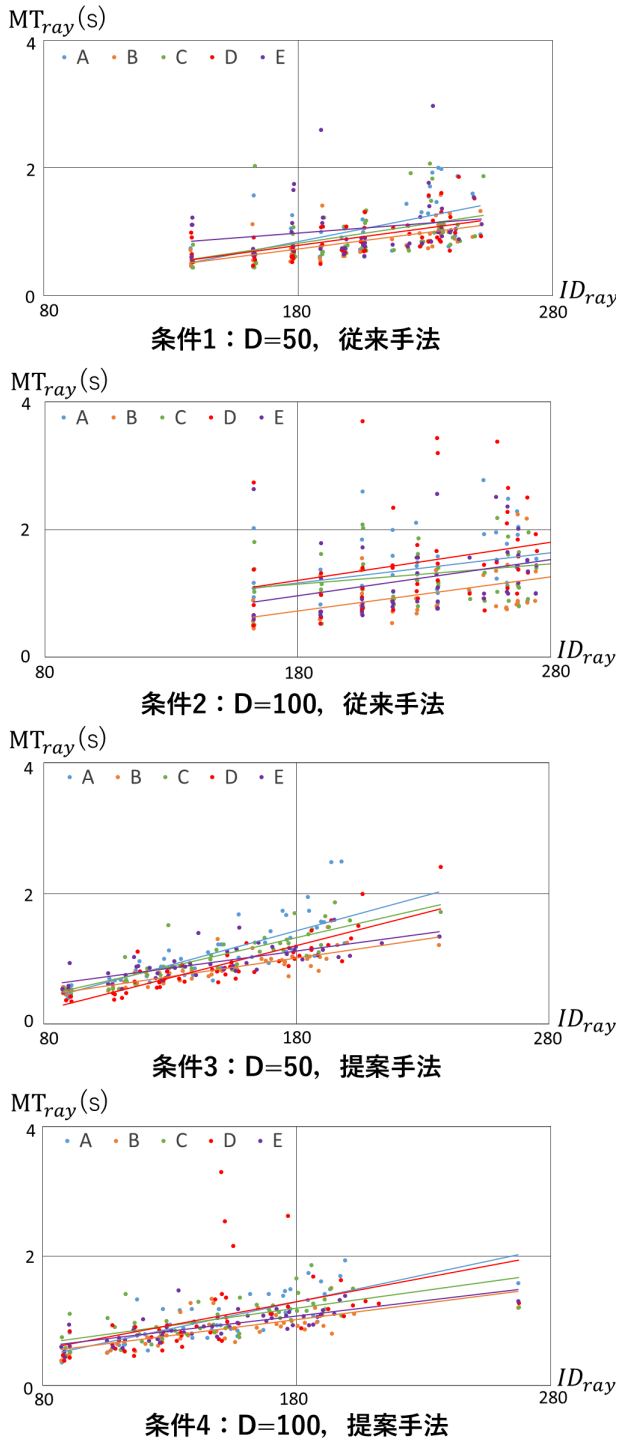


図3 条件 1-4 で選択タスクを 50 回実施した結果.

した. 具体的な SUS の質問項目において『たいていの人は、手だけテレポートシステムの利用方法をすぐに理解できると思う』については、全参加者が「5. そう思う」と回答した. また、『手だけテレポートシステムが使いやすいと感じた』という質問項目に対しては、全参加者が「4. ややそう思う」と回答した. これらの結果から、提案手法の操作方法は多くのユーザにとって容易で使いやすいことが示唆された. 一方で、『手だけテレポートシステムは、とても操作しづらいと感じた』については、2人が「4. やや

表 1 選択タスクの計測結果に線形回帰を適用した際の決定係数.

| 決定係数 $R^2$   | A    | B    | C    | D    | E    |
|--------------|------|------|------|------|------|
| 従来手法 D = 50  | 0.38 | 0.38 | 0.24 | 0.34 | 0.05 |
| 従来手法 D = 100 | 0.10 | 0.20 | 0.04 | 0.07 | 0.14 |
| 提案手法 D = 50  | 0.62 | 0.71 | 0.74 | 0.75 | 0.56 |
| 提案手法 D = 100 | 0.65 | 0.52 | 0.43 | 0.23 | 0.57 |

表 2 選択タスクにおける選択ミス回数.

| 選択ミス数      | A  | B  | C   | D   | E  |
|------------|----|----|-----|-----|----|
| 従来手法 D=50  | 39 | 31 | 53  | 106 | 37 |
| 従来手法 D=100 | 68 | 60 | 125 | 233 | 62 |
| 提案手法 D=50  | 30 | 9  | 19  | 19  | 14 |
| 提案手法 D=100 | 23 | 18 | 29  | 28  | 12 |

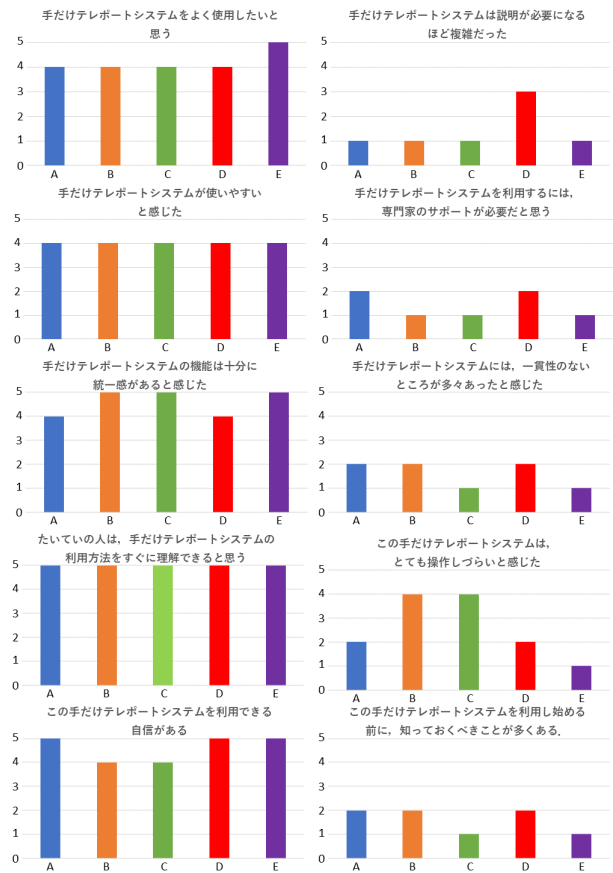


図 4 提案手法に関する System Usability Scale アンケートの結果.

そう思う」と回答した. これは、レイが床を指している状態でテレポートボタンを押したときに、手が床に埋まってしまうことがあったためだと考えられる.

## 6. まとめと展望

本研究では、VR 空間においてユーザから遠距離にある物体を手軽にかつ正確に選択できる手法の実現を目的として、手 (コントローラ) だけを選択対象付近にテレポートさせ、その手から投射したレイを利用して物体選択を行う手法を提案した. 複数の選択可能物体が垂直な壁に並んだ状態を仮定し、ユーザスタディを実施した. その結果、提案手法を利用することで、遠距離物体の選択を近距離物体

と似た感覚で行える可能性や、遠距離物体の選択をより正確に行える可能性が示唆された。また、SUS アンケートの結果より、提案手法は容易に利用できる可能性が確認された。

将来課題のひとつは、より詳細なユーザスタディの実施である。多様な条件下で選択タスクを実施することで、提案手法により最も効率的に選択を行える距離や、提案手法により選択可能な最長距離を調査したい。また、現在のプロトタイプでは、レイが床方向を向いた状態で手をテレポートすると、手が床に埋まるという問題があった。今後、VR 空間内のすべての物体とレイとの交差判定を行うようにテレポート先の決定手法を改良することでユーザビリティの改善を目指したい。

## 参考文献

- [1] Mine, M. R.: Virtual environment interaction techniques, *Technical report, UNC Chapel Hill CS Dept* (1995).
- [2] Kiyokawa, K. and Takemura, H.: A tunnel window and its variations: Seamless teleportation techniques in a virtual environment, *Proceedings HCI International* (2005).
- [3] an, D., Kim, D. and Cho, I.: PORTAL: Portal Widget for Remote Target Acquisition and Control in Immersive Virtual Environments, *Proceedings of the 28th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp. 1–11 (2022).
- [4] Li, N., Zhang, Z., Liu, C., Yang, Z., Fu, Y., Tian, F., Han, T. and Fan, M.: vMirror: Enhancing the interaction with occluded or distant objects in vr with virtual mirrors, *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (2021).
- [5] Mine, M. R., Brooks, F. P. and Sequin, C. H.: Moving Objects in Space: Exploiting Proprioception in Virtual-Environment Interaction, *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '97, USA, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.*, p. 19–26 (online), DOI: 10.1145/258734.258747 (1997).
- [6] Poupyrev, I., Billinghurst, M., Weghorst, S. and Ichikawa, T.: The Go-Go Interaction Technique: Non-Linear Mapping for Direct Manipulation in VR, *Proceedings of the 9th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '96, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery*, p. 79–80 (online), DOI: 10.1145/237091.237102 (1996).
- [7] Li, J., Cho, I. and Wartell, Z.: Evaluation of 3D virtual cursor offset techniques for navigation tasks in a multi-display virtual environment, *2015 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 59–66 (online), DOI: 10.1109/3DUI.2015.7131727 (2015).
- [8] Mendes, D., Medeiros, D., Sousa, M., Cordeiro, E., Ferreira, A. and Jorge, J. A.: Design and evaluation of a novel out-of-reach selection technique for VR using iterative refinement, *Computers and Graphics*, Vol. 67, pp. 95–102 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cag.2017.06.003> (2017).
- [9] Fitts, P. M.: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement, *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 47, No. 6, pp. 381–391 (1954).
- [10] Mackenzie, I. S.: A note on the information-theoretic basis of Fitts' law, *Journal of motor behavior*, Vol. 21, pp. 323–330 (online), available from <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:2634291> (1989).
- [11] Kopper, R., Bowman, D. A., Silva, M. G. and McMahan, R. P.: A human motor behavior model for distal pointing tasks, *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 68, No. 10, pp. 603–615 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2010.05.001> (2010).