

片眼のみに表示されるポインタを用いた xR 向け選択手法

鈴木 悠真* 折居 篤* 志築 文太郎†

概要. xR におけるオブジェクト選択手法に関する課題として、両眼視差による問題がある。両眼視差とは、左右の眼の位置あるいは網膜像の違いを表す。これにより、奥行き異なる複数の物体を見たときに片方の物体の像が二重に見える現象が引き起こされ、オブジェクトの選択が困難になる。この問題を生じない手法として、本研究は、片眼のみに表示されるポインタを用いた xR 向け選択手法を実装した。本手法の性能を評価するために、両眼に表示されるポインタを用いた従来手法に対する、Fitts の法則に基づく比較実験を行った。その結果、本手法は従来手法と比較して、選択のための移動時間、エラー率、スループット、作業負荷、およびユーザビリティについてより優れた性能をもつことが示された。また、ポインタを表示する眼の決定には、利き眼だけでなくユーザの好みを考慮する必要があることが示唆された。

1 はじめに

xR において、ユーザから離れた位置に存在する仮想オブジェクトを選択する操作は、不可欠なもののひとつである [5]。これについて、ポインタをオブジェクトにかざすことにより選択を行う手法 [9, 11] が研究されている。この手法は、xR において一般的に用いられるレイによる手法と比較してユーザの手の震えの影響を受けにくいと、特に奥行きが深く、小さいオブジェクトを選択する際に、正確な選択を行えるという特徴がある [11]。

しかしこの手法は、両眼視差による問題を生じうる。両眼視差とは、左右の眼の位置の違いにより生じる左右の網膜像の違いを表す。これにより人間は物体の奥行きを知覚できる。しかし、奥行き異なる複数の物体を見たときには、片方の物体のみに焦点が合い、もう片方の物体の像が二重に見える現象が生じる。特に奥行きが深く、小さいオブジェクトに対してユーザが選択を行う際には、ポインタあるいはオブジェクトのいずれかが二重に見えることにより、選択が困難になる [8]。両眼視差による問題は人間の左右の眼の焦点が特定の 1 つの位置以外に合わないことにより引き起こされる。そのためこの問題の解決のために、片眼のみを用いてオブジェクトを見る工夫が考えられる。しかしこの手法では、xR の特色である立体視を行えない。

本研究の目的は、立体視を妨げないままに、両眼視差による問題を生じない xR 向け選択手法を実現することである。このために本研究は、視野闘争と呼ばれる人間の視覚に関する現象を利用する。視野闘争とは、左右の眼において異なる映像を見た時に、それぞれの眼に対応する映像が交わって認識される現象である。特に、左右の眼に映る映像のうち異なる

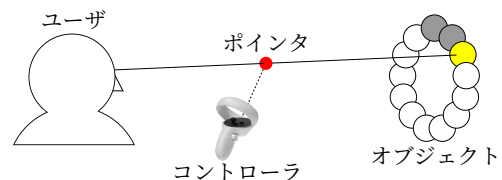


図 1. 本手法における選択の様子。ユーザはポインタをオブジェクトにかざすことにより選択を行う。ポインタはコントローラに付随しており、片眼のみに表示される。

部分が小さい、コントラストが高い、あるいは動く物体である場合、その部分は反対の眼に映る映像に抑制されることなく見え続ける傾向がある。また、立体視および視野闘争は異なる経路によって制御されるため、視野闘争は立体視による奥行き知覚を妨げない [13]。この現象に基づき、本研究は、立体視を妨げないままに両眼視差による問題を生じない、片眼のみに表示されるポインタを用いた xR 向け選択手法を示す (図 1)。また、本手法を実装した後、その性能を評価するための実験を行う。

2 関連研究

本節では、本研究に関連する研究として xR におけるオブジェクト選択手法および左右の眼に異なる映像を提示する xR 手法に関する研究を示す。また、それらに対する本研究の位置づけを述べる。

2.1 xR におけるオブジェクト選択手法

ポインタをかざすことによる選択手法および両眼視差による問題を解決するための選択手法に関する研究を示す。

Copyright is held by the author(s).

* 筑波大学 情報理工学位プログラム

† 筑波大学 システム情報系

2.1.1 ポインタをかざすことによる選択手法

Diako ら [9] は VR において「EyeSeeThrough」という手法を示した。この手法においてユーザは、オブジェクトに対して行う操作が並んで表示された半透明メニューをオブジェクトにかざした後、視線を用いてオブジェクトを選択する。この手法はオブジェクトおよび行う操作を同時に選択することで、高速かつ直感的なオブジェクト操作を実現した。

Uta ら [12] は 3D 環境において「Gaze-Hand Alignment」という手法を用いた。この手法においてユーザは、ターゲットに対して視線を合わせた後に手を用いてポインティングを行い、この2つを一致させることによりオブジェクトを選択した。この手法は両眼視差による問題から、ターゲットの奥行きが増すほどポインティング性能が低下することが示された。

Yue ら [10] は AR においてターゲットをスマートフォンによって一人称視点的に遮蔽することによって選択する選択手法を示した。実装されたプロトタイプシステムでは、フロントカメラからユーザの虹彩の位置を識別し、同時にリアカメラからスマートフォンによって遮られた矩形領域を推定した。

本研究は、これらの研究と同様に、ユーザがポインタを選択の対象とするオブジェクトにかざすことによりオブジェクトを選択する手法を示す。

2.1.2 両眼視差による問題を解決するための選択手法

両眼視差による問題に対して、これまで様々なアプローチが行われてきた。

Ferran[1] らは立体ディスプレイ環境において、カメラのファインダのような効果を用いた選択手法を示した。ユーザが選択を行う方向に対して、その奥にあるオブジェクトを平面的に描画する仮想スクリーンを表示し、それを通して選択を行った。これにより、選択における両眼視差による曖昧性を回避した。

Joon[8] らは VR においてスマートフォンを用いた選択手法を示した。ユーザは透明なウィンドウとして描画されたスマートフォンをオブジェクトにかざし、その画面上にてタップすることによりオブジェクトを選択する。この際、選択操作中にのみオブジェクトを平面的に描画することにより、両眼視差による問題を生じない選択手法を実現した。

これらの手法は、両眼視差による問題を生じないために、特定の領域においてオブジェクトを平面的に描画するという方法をとった。しかし、この方法は立体視を妨げるとともに、選択の度に平面的なレンダリングへ切り替えるための操作およびそれを行うための時間を必要とする。

Adrian[11] らは VR においてユーザの頭部に固定された平面内を移動するカーソルを用いた選択手法を示した。ユーザは外部入力デバイスを用いてカーソルを操作し、2D デスクトップのように選択を行う

ことができた。このとき、オブジェクトの大きさや位置をオブジェクトの奥行きに合わせて動的に変化させることにより、両眼視差による問題に対処した。

本研究は、選択に用いるポインタを片眼のみに表示することにより、両眼視差による問題を生じない手法を示す。

2.2 左右の眼に異なる映像を提示する xR 手法

Colin[13] らは 3D ステレオグラフィック環境において、片眼のみに提示された 2D カーソルを用いた選択手法を示した。実験において参加者は、2D 選択においてはカーソルをターゲットの上に置くように、3D 選択においてはカーソルをターゲットの内部に合わせるように指示された。その結果、2D 選択は 3D 選択より有意に高速であり、またエラー率も有意に低かった。

郭ら [16] は xR において視野闘争を用いたユーザインタフェース提示手法を示した。画面の重畳による情報の欠落を防ぐため、ユーザの片眼のみに不透明なユーザインタフェース画面を提示した。その結果、半透明ユーザインタフェースと比べ視覚的印象が低下した一方、ビジュアルシーンの変化への認識精度と認識の確信度が向上することが示された。

山本ら [17] は VR において左右それぞれの眼に異なる第一人称視点を提示する、複数環境の同時体験インタラクション手法を示した。この手法においてユーザは、VR 酔いを誘発することなく、異なる2つの視点を同時に知覚できた。

現在、左右の眼に異なる映像を提示する手法を xR 向け選択手法に用いた研究は行われていない。

3 片眼のみに表示されるポインタを用いた xR 向け選択手法

本手法においてユーザは、利き手用コントローラに付随して表示されるポインタ（赤色の球体、コントローラの中心から前方の 0.2m の位置、大きさは奥行きに関わらず常に 0.5°、片眼のみに表示される）をオブジェクトにかざした状態において、コントローラの人差し指トリガボタンを押すことにより選択を行う。このとき、ユーザの眼のうちポインタが表示されている眼の位置を基準点として、そこからポインタの中心を結んだ直線上にあるオブジェクトのうち、ユーザに最も近いオブジェクトが選択される（図2左）。ポインタは片眼のみに表示されるため、ユーザはポインタに焦点を合わせる必要がない。したがって、両眼視差による問題が生じない。また、ポインタを除く他のオブジェクトは通常通り両眼に表示される。したがって、ユーザは選択の対象とするオブジェクトを両眼によって視認できるため、立体視が可能である。

なお本研究では、ポインタを表示する眼として利

片眼のみに表示されるポインタを用いた xR 向け選択手法

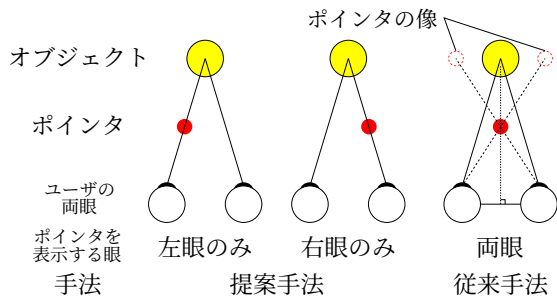


図 2. 各手法における選択の時のユーザの両眼、ポインタ、およびオブジェクトの位置関係。特に従来手法においては、両眼視差によりオブジェクトに焦点を合わせた時ポインタの像が二重に見える。

き眼とする (Dominant) のが良いか、あるいは非利き眼とする (NonDominant) のが良いかについても併せて調査する。

4 参加者実験

本手法を評価するための参加者実験を行った。

4.1 参加者

参加者は研究室外の大学生および大学院生 12 名 (男性 11 名, 女性 1 名, 平均年齢 22.7 歳, $SD = 0.99$, 全員右利き) である。VR・AR 機器の使用頻度を、5 段階評価 (5: 日常的に使う, 4: 頻度は低いが定期的に使う, 3: 不定期で使うことがある, 2: 使ったことがある, 1: なし, の 5 段階) にて集計した。その結果, 2 名が 4, 3 名が 3, 6 名が 2, 1 名が 1 と回答し, 5 と回答した参加者はいなかった。また利き眼について Miles 法に基づく検査法 [19] による検査を行ったところ, 11 名が右眼, 1 名が左眼と判別された。

4.2 実験装置および環境

参加者は実験用アプリケーションがインストールされたヘッドマウントディスプレイ (以下, HMD) を頭部に装着した。HMD として, Meta Quest 2 を用いた。また, 利き手 (参加者が両利きである場合には右手) にコントローラを把持した。反対側の手は操作に使用しなかった。

実験のためのアプリケーションを実装した (図 3)。実装環境は Unity 2022.3.22f1 である。実験アプリケーションにおける配色は Adrian ら [11] による実験を, 各色のカラーコードはカラーユニバーサルデザイン推奨配色セット [15] をそれぞれ参考とした。アプリケーションが開始されると, 正面方向奥行き 1.5 m の位置に, 直径 0.1 m の青色の球体であるスタートターゲットが表示された。ユーザがこのターゲットを選択することにより, タスクが開始された。

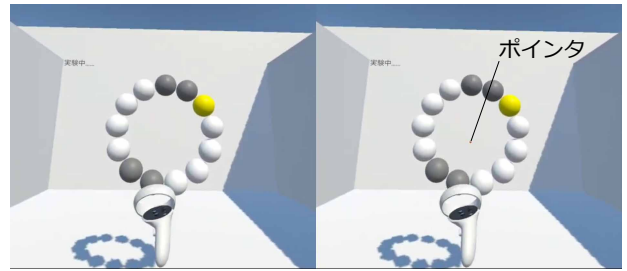


図 3. 実験用アプリケーションにおけるユーザの視界。左眼に表示される映像 (左側) と右眼に表示される映像 (右側) が異なり, ポインタ (赤色の球体) は片眼のみに表示されている。(この図はイメージであり, 左側の画像には編集が加えられている)



図 4. 実験における参加者の様子。参加者は頭部に HMD を装着し, 利き手 (右手) に把持したコントローラを用いて選択を行った。

タスクが開始されるとスタートターゲットは消えた。タスクがひとつ終了すると再びスタートターゲットが表示された。これを選択することによりユーザは, 即座にセッション内の次のタスクを開始できた。

参加者は, 参加者の腕の動きを阻害しない程度に十分広い空間において, 椅子に座った状態にて実験に参加した (図 4)。実験中参加者は移動しないよう求められたが, 頭部の動きは制限されなかった。

4.3 タスク

実験に用いたタスクは, Fitts の法則に基づくタスク [6, 5, 12, 4] であった。

各条件において, タスクが開始されると参加者の正面に円形に配置された 13 個のターゲットが表示された。タスクの間, 参加者が現在選択すべきターゲットは黄色, まだ選択していないターゲットは白色, 既に選択したターゲットは灰色にて表示された。参加者が選択すべきターゲットにポインタをかざした状態にてボタンを押した場合, 選択に成功し, 次に選択すべきターゲットが新たに黄色に表示された。選択すべきターゲットの外側にポインタをかざした状態にてボタンを押した場合, 選択に失敗し, 現在選択すべきターゲットが赤色に点滅することにより強

調された。選択に成功するまで現在選択すべきターゲットは変化しなかった。

参加者は異なるターゲットの大きさおよびターゲット間の距離ごとに6条件×13ターゲット=78回の選択を行った。これを1タスクとして、ターゲットの奥行きごとに計3回のタスクを行った。これを1セッションとして、異なる手法ごとに計3回のセッションを行った。実験全体において参加者は、3タスク×3セッション×78回=702回の選択を行った。各タスクにおいて参加者は、あるターゲットの大きさについてターゲット間の距離の近い順に選択を行い、これをターゲットの大きさの大きい順に行った。このタスクを、各セッションにおいてターゲットの奥行きの小さい順に行った。セッションにおける手法の順番はラテン方格法により参加者間において均等になるよう設定された。

4.4 実験設計

本手法を評価するための比較対象として、従来手法である両眼に表示されるポイントを用いた選択手法(Both)を用いた。この手法において選択されるオブジェクトを決めるための基準点としては、ユーザの両眼の中央の位置を用いた(図2右)。

本実験における独立変数を以下に示す。各値の基準はユーザがHMDを装着した時のユーザの頭部位置とした。

- 手法: Both, Dominant, NonDominant
- ターゲットの奥行き(D): 0.5 m, 1.0 m, 2.0 m
- ターゲットの大きさ(W): 6°, 4°, 2°
- ターゲット間の振幅(A): 25°, 50°

また、従属変数には、移動時間(以下, MT)、エラー率(以下, ER)、および性能を評価するための指標としてThroughput(以下, TP)を用いた。また、作業負荷およびユーザビリティを評価するための指標として、NASA-Task Load Index(以下, NASA-TLX) [3, 18] および System Usability Scale(以下, SUS) [2] を用いた。さらに、3つの手法のうちどの手法がより好みであったかについて、参加者に順位付けを求めた。併せて、記述式のアンケートにより各手法に対するコメントを求めた。

MT は、現在選択すべきターゲットが赤色に表示されてからそのターゲットが正しく選択されるまでの時間である。 ER はすべての選択に対する、参加者が選択すべきターゲットの外側にポイントをかざした状態にてボタンを押すことにより失敗とみなされた選択の割合である。 TP の算出には式1を用いた。

$$TP = \frac{ID}{MT}, \quad ID = \log_2\left(\frac{A}{W} + 1\right) \quad (1)$$

4.5 実験手順

参加者はまず本研究に関する説明を受け、実験前アンケートに回答した。次にHMDを装着し、楽な

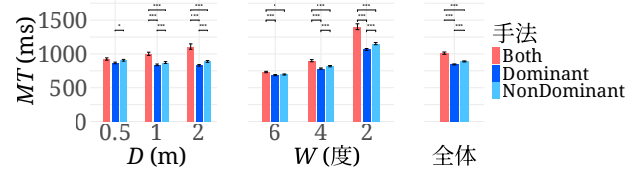


図 5. 各条件および手法における MT の平均値。エラーバーは標準偏差を示す。(*: $p < 0.05$, ***: $p < 0.001$)

姿勢をとって椅子に座った。その状態において、その時の頭部の位置がシステムにおける基準位置となるよう、実験用アプリケーションがリセットされた。次に参加者は実験用アプリケーションの操作について説明を受けながら、練習タスクを行った。練習タスクでは、 $D = 1.0$ m, $W = 4^\circ$, $A = 25^\circ$ の1条件について、13回の選択を行った。その後、参加者はなるべく速く、かつなるべく正確にタスクを行うよう指示された。各タスクは、スタートターゲットを選択することにより、参加者によって開始された。各タスクが終了したとき、参加者はHMDを装着したままその場で休憩をとることができた。本実験はゴリラアーム現象 [7] を引き起こす腕への負荷をもたらすため、参加者は実験前の説明にて、各タスクが終了したとき毎回1分程度の休憩をとるよう促された。参加者が休憩を十分取ったと判断したときに、参加者によってタスクは再開された。各セッションが終了したとき、参加者はその条件に関してNASA-TLX および SUS に基づくアンケートに回答した。すべてのセッションが終了したとき、参加者は記述式の実験後アンケートに回答した。またその内容についてインタビューを受けた。実験は最大で60分の時間を要した。

4.6 実験結果

MT , ER , TP のそれぞれについて、アンダーソン-ダーリング検定を行った結果正規性は確認されなかった。そのため、手法、 D および W の3要因を独立変数として整列ランク変換 [14] を行った後、三元配置分散分析を行った。その後、下位検定としてフリードマン検定、およびウィルコクソンの符号順位検定による多重比較を行った。この際 p 値の補正にはホルムの方法を用いた。

4.6.1 MT

各条件および手法における MT を図5に示す。手法 ($F_{2,22} = 8.30$, $p < 0.001$)、 D ($F_{2,22} = 9.17$, $p < 0.01$)、 W ($F_{2,22} = 297.43$, $p < 0.001$) において主効果が認められた。また、手法および D ($F_{4,44} = 9.04$, $p < 0.001$)、手法および W ($F_{4,44} = 11.48$, $p < 0.001$)、 D および W ($F_{4,44} = 13.66$, $p < 0.001$) の各2要因間、および手法、 D および W の3要因間

片眼のみに表示されるポインタを用いた xR 向け選択手法

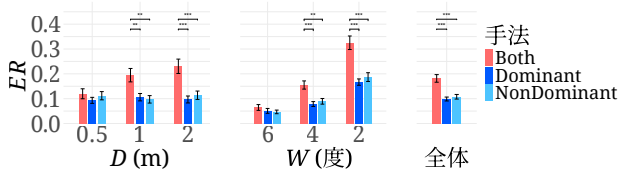


図 6. 各条件および手法における ER の平均値。エラーバーは標準誤差を示す。(**: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$)

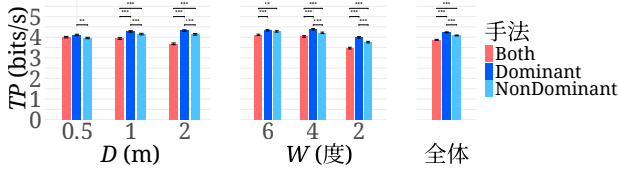


図 7. 各条件および手法における TP の平均値。エラーバーは標準誤差を示す。(**: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$)

($F_{8,88} = 3.50$, $p < 0.01$) で交互作用が認められた。各 D および W では、 $D = 1.0$ m, $D = 2.0$ m, $W = 4^\circ$, $W = 2^\circ$ においてすべての手法間で有意差が見られ、Both が最も遅く Dominant が最も高速であった。

4.6.2 ER

各条件および手法における ER を図 6 に示す。手法 ($F_{2,22} = 13.98$, $p < 0.001$), D ($F_{2,22} = 4.79$, $p < 0.05$), W ($F_{2,22} = 149.02$, $p < 0.001$) において主効果が認められた。また、手法および D ($F_{4,44} = 7.95$, $p < 0.001$), 手法および W ($F_{4,44} = 13.94$, $p < 0.001$), D および W ($F_{4,44} = 5.12$, $p < 0.01$) の各 2 要因間、および手法、 D および W の 3 要因間 ($F_{8,88} = 2.28$, $p < 0.05$) で交互作用が認められた。

各 D および W では、 $D = 1.0$ m, $D = 2.0$ m, $W = 4^\circ$, $W = 2^\circ$ において Both および Dominant 間と Both および NonDominant 間で有意差が見られ、Both が最もエラーが多く Dominant が最も正確であった。

4.6.3 TP

各条件および手法における TP を図 7 に示す。手法 ($F_{2,22} = 3.47$, $p < 0.05$), D ($F_{2,22} = 3.51$, $p < 0.05$), W ($F_{2,22} = 15.92$, $p < 0.001$) において主効果が認められた。また、手法および D ($F_{4,44} = 3.96$, $p < 0.01$), D および W ($F_{4,44} = 10.35$, $p < 0.001$) の各 2 要因間で交互作用が認められた。

各 D および W では、 $D = 1.0$ m, $D = 2.0$ m, $W = 4^\circ$, $W = 2^\circ$ においてすべての手法間で有意差が見られ、Both が最も性能が低く Dominant が最も性能が高かった。

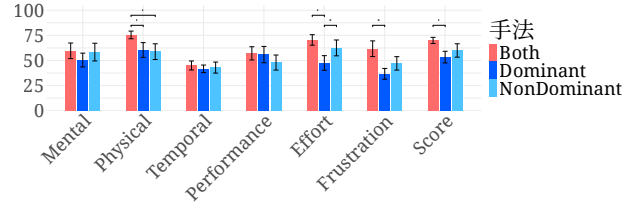


図 8. 各手法における NASA-TLX スコアの平均値。エラーバーは標準誤差を示す。(*: $p < 0.05$)

4.6.4 NASA-TLX

各手法のスコアの平均値はそれぞれ、Both は 69.97 ($SD = 10.59$), Dominant は 53.33 ($SD = 20.06$), NonDominant は 59.94 ($SD = 23.07$) であった (図 8)。このうち Both-Dominant 間には有意な差が見られた。各項目のスコアについては、Physical における Both-Dominant 間および Both-NonDominant 間、Effort における Both-Dominant 間および Both-NonDominant 間、Frustration における Both-Dominant 間で有意差が見られた。

4.6.5 SUS

各手法のスコアの平均値はそれぞれ、Both は 47.29 ($SD = 22.57$), Dominant は 82.50 ($SD = 13.10$), NonDominant は 74.79 ($SD = 17.07$) であった。このうち Both-Dominant 間 ($p < 0.01$) および Both-NonDominant 間 ($p < 0.05$) に有意な差が見られ、Dominant および NonDominant が高いユーザビリティを持つと評価された。

4.6.6 好み

各手法の好みに関する平均順位は、Both が 2.92 位 (1 位: 0 人, 2 位: 1 人, 3 位: 11 人), Dominant が 1.25 位 (1 位: 9 人, 2 位: 3 人, 3 位: 0 人), NonDominant が 1.92 位 (1 位: 3 人, 2 位: 8 人, 3 位: 1 人) であった。したがって、Dominant が最も好まれ、また Both が最も好まれなかった。

4.6.7 アンケート

Both について、参加者はポインタが「2 つに見える (P1, P2, P5, P6, P8, P10, P11, P12)」と感じた。ターゲットを選択するためにそれら 2 つの像の中央部分に合わせて狙う必要があり (P1, P2, P5, P6, P8, P11, P12), ターゲットの選択が難しいと感じた。あるいは、ポインタが「実際の位置と異なる (P3, P9, P11)」と感じたり、ポインタをターゲットに合わせても選択できない (P4, P5, P9) と感じたりした。

本手法について、参加者はポインタが「2 つに分かれない (P2, P3, P6, P7, P9, P12)」と感じた。このため「直感的 (P1, P10)」で「選択しやすい

(P2, P3, P5, P9, P12)」と感じ、また「眼への負荷が少ない (P5)」と感じた。左右の目に異なる映像が提示されることには、多くの参加者は違和感を覚えなかった (P1, P2, P4, P11, P12)。しかし同時に慣れが必要 (P4, P12) だと感じたりポイントが見えづらい (P3, P8) と感じた参加者もいた。

本手法の中でも NonDominant については、いくつかの参加者は違和感を覚えた。ポイントがずれていた (P4, P7, P10) と感じたり、「腕がふわっとするよう (P1)」に感じたり、「常に VR 酔いの少し手前のような感覚がした (P5)」参加者もいた。ポイントが「やや薄く (P9)」なったと感じた参加者や、「消えて見えることがあった (P6)」と回答した参加者もいた。しかし、Dominant と同じ (P2, P11, P12) であったと感じた参加者や、NonDominant のほうがポイントが「はっきり映っていて」操作しやすかった (P3, P8) と感じた参加者もいた。

4.7 考察

図 5, 図 6, 図 7 より、本手法は従来手法と比べて、奥行きが深く小さいターゲットを選択する際に有意に高速かつ正確に操作を行うことができ、また高いスループットを実現することが示された。これは、従来手法において参加者は両眼視差による問題によりターゲットに正確に狙いを定めることができずターゲットの選択に苦労したことに対して、本手法においてはその問題が発生せず容易に選択を行うことができたためと考えられる。

また、Dominant と NonDominant の間では、Dominant のほうが有意に高速であり、かつ高いスループットを実現することが示された。これは、NonDominant における問題が Dominant において発生しなかった参加者が多かったためと考えられる。

図 8 より、本手法は従来手法と比べて、Physical, Effort, および Frustration に関して作業負荷が低いことが示された。これは、Both においてポイントが「ぶれて 2 つに見え」ることによる選択時間の増加が腕への負荷に繋がったり、意図しない操作に繋がったりしたことが理由であると考えられる。また、Dominant は他の手法と比べて、有意に優れたユーザビリティをもつことが示された。

本手法について、アンケートにてより好みであると回答した手法と MT の平均がより速い手法が異なる参加者がいた (P1: Dominant がより好みと回答したが NonDominant の方が速い, P3: P1 と逆)。しかし、両参加者において MT の平均がより速い手法はいずれもより後に行った手法であり、この結果には学習による順序効果が影響した可能性がある。ここから、本手法には習熟による選択性能の向上の可能性があると考えられる。

実験後アンケートの結果から、NonDominant におけるポイントの見え方に関して個人差が見られた。

ここから、単に利き眼あるいは非利き眼と言っても、左右の眼それぞれへの依存度には個人差があることが示唆された。そのため、ポイントを左右どちらの眼のみに表示するかを決定する際には、機械的な判別ではなく、ユーザの好みや感じ方を反映できる方法を用いる必要があると考えられる。

5 今後の課題

5.1 サンプルの多様化

本実験の参加者は全員が 20 代かつ右利きであり、そのうち左眼が利き眼であったのは 1 人のみであった。さらに、参加者全体の人数も 12 人と少なかった。今後の実験においては、より多数の、かつより多様な属性をもつ参加者を対象とすることにより、より正確な実験結果が得られると考えられる。

5.2 他の多様な手法との比較

本研究においては、従来手法として、両眼に表示されるポイントを用いた選択手法を本手法の評価のための比較対象とした。しかし、実際の xR 環境においては、この手法以外にも多様な選択手法が存在する。これらに対する比較実験を行うことにより、より正確に本手法を評価できると考えられる。

5.3 実際の xR 環境を想定した参加者実験の実施

本研究における実験環境について、実験の単純化のために、背景には平坦で模様のない白色の壁を用いた。また、選択すべきターゲット以外に、紛らわしいオブジェクトは存在しなかった。しかし実際の xR 環境においては、よりオブジェクトとカーソルが視認しにくい環境での操作が求められる。このような実際の xR 環境を想定した状況における各手法の性能については、追加の調査が必要である。

6 まとめ

本研究は、xR におけるオブジェクト選択に関して、両眼視差による問題を生じない、片眼のみに表示されるポイントを用いた手法を示した。また、本手法を実装した後、その性能を評価するための Fitts の法則に基づく比較実験を行った。その結果、本手法は従来手法と比べて、より奥行きが深く小さいオブジェクトを選択する際に、操作時間、エラー率、スループット、作業負荷、およびユーザビリティに関してより高い性能をもつことが示された。また、ポイントを表示する眼の決定には、利き眼だけでなくユーザの好みを考慮する必要があることが示唆された。

参考文献

- [1] F. Argelaguet and C. Andujar. Visual Feedback Techniques for Virtual Pointing on Stereoscopic

- Displays. In *Proceedings of the 16th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '09, pp. 163–170, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery.
- [2] J. Brooke. SUS: A quick and dirty usability scale. *Usability Evaluation in Industry*, pp. 189–194, 1996.
- [3] J. C. Byers, A. C. Bittner, and S. G. Hill. Traditional and raw task load index (TLX) correlations: Are paired comparisons necessary? In A. Vol. 1, pp. 481–485, 1989.
- [4] P. Fitts. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47(6):381–391, June 1954.
- [5] J. Gabel, S. Schmidt, O. Ariza, and F. Steinicke. Redirecting Rays: Evaluation of Assistive Raycasting Techniques in Virtual Reality. In *Proceedings of the 29th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '23, pp. 1–11, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [6] International Organization for Standardization. Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) - Part 9: Requirements for non-keyboard input devices, 2000.
- [7] S. Jang, W. Stuerzlinger, S. Ambike, and K. Ramani. Modeling Cumulative Arm Fatigue in Mid-Air Interaction based on Perceived Exertion and Kinetics of Arm Motion. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 3328–3339, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [8] J. H. Lee, T. Jin, S.-H. Lee, S.-J. Lee, and S.-H. Bae. Stereoscopic Viewing and Monoscopic Touching: Selecting Distant Objects in VR Through a Mobile Device. In *Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '23, pp. 1–7, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [9] D. Mardanbegi, B. Mayer, K. Pfeuffer, S. Jalaliniya, H. Gellersen, and A. Perzl. Eye-SeeThrough: Unifying Tool Selection and Application in Virtual Environments. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 474–483, 2019.
- [10] Y. Qin, C. Yu, W. Yao, J. Yao, C. Liang, Y. Weng, Y. Yan, and Y. Shi. Selecting Real World Objects via User-Perspective Phone Occlusion. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, pp. 1–13, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [11] A. Ramcharitar and R. J. Teather. EZCursorVR: 2D Selection with Virtual Reality Head-Mounted Displays. In *Proceedings of the 44th Graphics Interface Conference*, GI '18, pp. 123–130, Waterloo, CAN, 2018. Canadian Human-Computer Communications Society.
- [12] U. Wagner, M. N. Lystbæk, P. Manakhov, J. E. S. Grønbaek, K. Pfeuffer, and H. Gellersen. A Fitts' Law Study of Gaze-Hand Alignment for Selection in 3D User Interfaces. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, pp. 1–15, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [13] C. Ware and K. Lowther. Selection using a one-eyed cursor in a fish tank VR environment. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 4(4):309–322, Dec. 1997.
- [14] J. O. Wobbrock, L. Findlater, D. Gergle, and J. J. Higgins. The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pp. 143–146, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [15] カラーユニバーサルデザイン機構. カラーユニバーサルデザイン推奨配色セットについて, 2018. https://cudo.jp/?page_id=1565 [アクセス日: 2025/08/26].
- [16] 郭凱, 下村祐樹, 細井十楽, 伴祐樹, 割澤伸一. ビジュアルシーンと重畳せずに認識可能な視野闘争を用いた視覚的な UI 提示手法の検討. インタラクション 2024 論文集, インタラクション 2024, pp. 1011–1016, 2024.
- [17] 山本航世, 渡邊恵太. ParaSights: 両眼視野闘争によって 2つの環境と並行してインタラクションできる空間提示手法. WISS 2024 予稿集, WISS 2024, 2024.
- [18] 芳賀繁, 水上直樹. 日本語版 NASA-TLX によるメンタルワークロード測定-各種室内実験課題の困難度に対するワークロード得点の感度. 日本人間工学会誌, 32(2):71–79, 1996.
- [19] 北澤一樹, 勝山しおり, 古川智巳, 外里富佐江. 5種類の利き眼検査による一致性の検討. 長野保健医療大学紀要 Vol. 6, pp. 13–17, 2021.