

筑波大学大学院博士課程

理工情報生命学院

システム情報工学研究群修士論文

VRにおける動的エリアカーソル法を用いた視線
ポインティングの高速化

平井 李音

修士（工学）

（情報理工学位プログラム）

指導教員 志築 文太郎

2024年3月

概要

一般的なデスクトップ環境と同様に仮想現実（VR）システムにおいても、ポインティングはターゲットを選択するための基本的な操作である。近年、VR 環境におけるポインティングではアイトラッキングに基づいたハンズフリー手法も用いられている。一方、アイトラッキングによるポインティング手法ではサッケード運動によりある一点を注視し続けることが難しいため、ユーザから見て小さなターゲットを選択する際、サッケード運動によるポインティング性能に対する悪影響は顕著に表れる。本研究ではこの問題を軽減するために我々は視線インタフェースを用いた動的エリアカーソル法の一つ Bubble Gaze Cursor を 3次元に拡張したポインティング手法を実装し、その効果を調査した。本手法および従来手法を用いて様々な大きさのターゲットに対するポインティング性能の比較を行った。その結果、本手法がコントローラを用いたレイキャスト手法と同等の性能を発揮すること、およびその性能がターゲットの大きさに左右されないことを明らかにした。また、注視時間の動的化によるさらなるポインティング速度の高速化を行い、実験を通して高速化できることを明らかにした。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	目的およびアプローチ	2
1.3	貢献	2
1.4	本論文の構成	3
第2章	関連研究	4
2.1	ターゲットの幅を増大する手法	4
2.2	バブルカーソル	5
2.3	VR環境における視線によるポインティング	5
第3章	3次元 Bubble Gaze Cursor	7
3.1	ポインティング方法	7
3.2	ユーザインタフェースの提示	7
第4章	予備実験1	9
4.1	実験設計	9
4.1.1	機器	9
4.1.2	実験参加者および実験環境	9
4.1.3	ポインティングタスク	9
4.2	評価指標	9
4.3	実験手順	10
4.4	結果	11
4.4.1	タスク完了時間	11
4.4.2	エラー率	12
4.5	議論	12
第5章	予備実験2	13
5.1	実験設計	13
5.2	結果	13
5.2.1	タスク完了時間	14
5.2.2	エラー率	14

5.3	議論	14
第6章	実験1	15
6.1	実験設計	15
6.1.1	機器	15
6.2	実験参加者および実験環境	15
6.2.1	ポインティング手法	15
6.2.2	ポインティングタスク	16
6.3	評価指標	16
6.4	実験手順	17
6.5	結果	17
6.5.1	タスク完了時間	17
6.5.2	正答率	18
6.5.3	NASA-TLX	19
6.5.4	SUS	20
6.6	考察	20
第7章	注視時間の動的化	28
7.1	注視時間の累積	28
7.2	ターゲットの密集度合いに応じた動的化	28
7.3	Bubble Gaze Cursor と視線のレイを組み合わせた動的化	28
第8章	実験2	30
8.1	実験設計	30
8.1.1	機器	30
8.1.2	実験参加者および実験環境	30
8.1.3	ポインティング手法	30
8.1.4	ポインティングタスク	31
8.2	評価指標	31
8.3	実験手順	31
8.4	結果	32
8.4.1	タスク完了時間	32
8.4.2	エラー率	33
8.4.3	NASA-TLX	33
8.4.4	SUS	33
8.5	考察	34
第9章	議論	36
9.1	注視時間の動的化の基準時間	36
9.2	Bubble Gaze Cursor の仕組み	36

9.3 今後の展望	36
第 10 章 おわりに	38
謝辞	39
参考文献	40
付 録 A 実験におけるアンケート	48

目次

3.1	レイを用いた3次元 Bubble Cursor の仕組みの例. 最もレイとターゲットの中心間の距離が小さいターゲット (緑色の円) を含めるようにカーソル (赤色の半透明の円) が大きくなる.	8
4.1	ポインティングタスクを行うターゲット.	10
4.2	各注視時間におけるタスク完了時間.	11
4.3	各注視時間におけるエラー率.	12
5.1	移動平均フィルタの有無におけるタスク完了時間.	14
5.2	移動平均フィルタの有無におけるエラー率.	14
6.1	新たなターゲット配置条件. 左: 0.25 m, 中: 0.156 m, 右: 0.061 m.	16
6.2	タスク中の実験参加者の様子.	18
6.3	SteamVR にて各種キャリブレーションを行っている様子.	19
6.4	HMD を装着したままアンケートに回答している様子.	20
6.5	ターゲットの大きさが 0.25 m における各手法のタスク完了時間.	21
6.6	ターゲットの大きさが 0.156 m における各手法のタスク完了時間.	22
6.7	ターゲットの大きさが 0.061 m における各手法のタスク完了時間.	23
6.8	ターゲットの大きさが 0.25 m における各手法の正答率.	23
6.9	ターゲットの大きさが 0.156 m における各手法の正答率.	24
6.10	ターゲットの大きさが 0.061 m における各手法の正答率.	24
6.11	ターゲットの大きさが 0.25 m における各手法の平均 NASA-TLX スコア.	25
6.12	ターゲットの大きさが 0.156 m における各手法の平均 NASA-TLX スコア.	25
6.13	ターゲットの大きさが 0.061 m における各手法の平均 NASA-TLX スコア.	26
6.14	ターゲットの大きさが 0.25 m における各手法の平均 SUS スコア.	26
6.15	ターゲットの大きさが 0.156 m における各手法の平均 SUS スコア.	27
6.16	ターゲットの大きさが 0.061 m における各手法の平均 SUS スコア.	27
7.1	ターゲットの密集度合いに応じた動的化のイメージ図. 左のようにカーソルの中心位置から一定半径内に存在するターゲットが少ないほど必要な注視時間が短縮される. 右のように一定半径内に複数のターゲットが存在するほど短縮の度合いが小さくなる.	29

7.2	Bubble Gaze Cursor と視線のレイを組み合わせた動的化のイメージ図. 左のようにカーソル内に含んだ (注視状態となった) ターゲット視線に視線 (青矢印) を接触させている間, 必要な注視時間が短縮される. 右のようにターゲットへ視線が接触していない場合は通常の Bubble Gaze Cursor となる.	29
8.1	ポインティングタスクを行うターゲットの様子.	31
8.2	各手法におけるタスク完了時間.	33
8.3	各手法におけるエラー率.	34
8.4	各手法における平均 NASA-TLX スコア.	35
8.5	各手法における平均 SUS スコア.	35
9.1	各ターゲットの中心とユーザの頭部を結ぶ直線と視線が成す角度を用いた Bubble Gaze Cursor の例. 算出した角度 (上) 中で最も小さな角度を成したターゲットを視線に最も近いターゲットとする (下).	37
A.1	実験参加者の基本情報収集用のアンケート.	50
A.2	実験 1 における NASA-TLX 用のアンケート.	55
A.3	実験 1 における SUS 用のアンケート.	59
A.4	実験 2 における NASA-TLX 用のアンケート.	64
A.5	実験 2 における SUS 用のアンケート.	68

第1章 はじめに

仮想現実（以下，VR）とは、「みかけは現実ではないが，実質的には，現実であること」とされる [日本 11]。さらに VR は，Oculus Rift, HTC Vive, および PlayStation VR といった VR 用頭部装着ディスプレイ（以下，HMD）が発売した 2016 年以降に本格的に普及した [岩田 20]。これらの VR は，VR 用 HMD により人間の視覚および聴覚に感覚を提示することにより，人工的に作り出された現実に近い感覚がユーザに提示される。さらに，専用コントローラに内蔵された振動デバイスを用いて，触覚に対しても感覚提示を行うことができる。また，この人工的な感覚と現実の感覚を混合させることにより，現実のモノと仮想的なモノがリアルタイムにおいて相互作用しあう空間を構築する技術全般を複合現実（以下，MR）と呼ぶ [dSeSS09]。VR および MR は，実世界に存在する物理的な制約を克服できるという点において有望であるとされている [RH17]。そのため，アミューズメント分野 [Goo17, HY18]，医療分野 [MYA+19, 辻下 17]，および研究分野 [JRF+20] などの多種多様な分野において注目されつつある。

1.1 背景

ポインティング操作は，VR 環境においてターゲットを選択するための基本的な操作である。

また，ヒューマンコンピュータインタラクション分野において，アイトラッキング技術に基づいた視線インタフェースの研究は頻繁に行われている。特に頻繁に研究されているのは，ユーザの注視点をポインタとして操作し，ポインタがターゲット内に一定時間存在することにより選択を行う注視操作システムである。このシステムは，ユーザの視線のみを入力とするため筋萎縮性側索硬化症患者あるいは脊髄性筋萎縮症のように手指を動かすことが困難なユーザにおけるマウスの代替となる入力インタフェースとして活用されている [蜂巢 14, 立崎 21]。また，ユーザのマウス操作，タッチ操作，あるいは音声入力操作にユーザの視線情報を組み合わせることによる高速なポインティング手法 [ZMI99, MSAH08] および効率的かつ容易な操作手法 [PACG14, PAC+15] が提案されている。

近年，HTC 社の VIVE Pro Eye [Cor19]，およびメタ・プラットフォームズ社の Meta Quest Pro [Pla22] のように VR 用 HMD にアイトラッキングデバイスが内蔵されるようになった。それに伴い，VR 環境におけるポインティングにおいてもアイトラッキングによるハンズフリー手法が活用されるようになってきた。

しかし，アイトラッキングによるポインティング手法にはいくつかの問題がある。視線の方向をトラッキングするだけでは，ユーザが選択したいターゲットを選択するために注視しているのか，眺めているだけなのか，あるいは意図せず視線がターゲットへ接してしまった

だけなのかを区別できないため、ユーザの意図しない入力が行われてしまうという問題がある。この問題は、ギリシャ神話において手にて触れた物体を意思に関係なく黄金に変える力を持つミダースの逸話になぞらえて Midas Touch Problem [Jac91] (以下, ミダスタッチ) と呼ばれており, 決定ジェスチャなどの連続注視による入力を採用する場合に直面する。また, 小さなターゲットの選択が困難という問題もある。これは, 人間が持つ意図とは関係なく不随意に起こる非常に微小な眼球運動の一つであるサッケード運動 [Bro04], あるいはトラッキング精度の低い安価なアイトラッカーの影響により, ユーザが視線をターゲット内に維持し続けることが難しいために発生する。サッケード運動は人間が持つ生理的な反応でありユーザが意図して抑制することは困難なため, 小さなターゲットの選択が困難という問題を解決するには, ズームなどの手法を用いてターゲットを拡大することにより選択を容易とするようなユーザへの表示を工夫すること [MvM04, SMFH10, ADS05, vM05], あるいは大きなターゲットのみが配置されるようにユーザインタフェースを設計すること [RR12] が必要になる。しかし, これらの手法は, 小さなターゲットのポインティングを容易とするが, ポインティング性能およびインタフェースデザイン, あるいはコンテンツの文脈の汎用性を著しく損なう [崔明 20]。

1.2 目的およびアプローチ

これらの問題を軽減するために我々は動的エリアカーソル法の一つである Bubble Cursor [GB05] を用いることを考えた。一般的な視線インタフェースにおいて, 視線の方向と連動したポイントカーソルが用いられており, このカーソルを一定時間連続にてターゲットに接触させることにより選択を行う。このカーソルを, ターゲットを必ず1つだけ含む大きさにカーソルを拡大する手法である Bubble Cursor へ変更する。これにより, ターゲットの幅が実質的に拡大されるため, 特に小さなターゲットに対してポインティングが容易となる。特に, 本研究では視線インタフェースによるポインティングに Bubble Cursor を取り入れた, Bubble Gaze Cursor [崔明 20] を3次元に拡張したポインティング手法を実装した。今回, 我々はVRにおいて最も一般的とされるコントローラを用いたレイキャスト手法, および視線インタフェースにおいて最も一般的とされる視線のレイキャスト手法とその性能を比較する評価を行った。また, 視線の動きやターゲットの密集度合いに応じて動的に注視時間を変動させる手法を複数考案および実装し, それも比較評価を行った。

1.3 貢献

本研究の貢献は以下の通りである。

- ターゲットの大きさに対する3次元に拡張した Bubble Gaze Cursor のポインティング性能を調査した。
- 選択タスクである連続注視における注視時間を動的に変動させた。

1.4 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。第1章においては、本研究の背景、目的とアプローチ、および貢献を示す。第2章においては、本研究に関連する研究を述べ、本研究の位置付けを示す。第3章においては、本研究にて提案および実装した手法について述べる。第4章においては、提案手法における適切な注視時間の調査について述べる。第5章においては、提案手法における移動平均フィルタの必要性を確認する調査について述べる。第6章においては、提案手法の性能を調査するために行った実験について述べる。第7章においては、注視時間の動的化方法について述べる。第8章においては、動的化によるポインティング性能を調査するためにおこなった実験について述べる。第9章においては、議論および今後の展望について述べる。第10章においては、本研究の結論を述べる。

第2章 関連研究

本節では、ターゲットの幅を増大する手法、バブルカーソルに関する研究、および VR 環境における視線によるポインティングに関する研究を述べる。

2.1 ターゲットの幅を増大する手法

小さなターゲットを容易に選択できるようにするための一般的なアプローチはターゲットの幅（大きさ）を増大させることである。ターゲットの幅を増大させる手法として最も一般的なものは、ズームによるターゲットの幅の増大である。ズームによる増大は、ユーザのマウス操作において動作時間を有意に減少させ成立する。さらに、ズームしたターゲットの幅についてフィッツの法則 [Pau54, Mac92] がことも確認されている [MB02, ZCBLG03]。

Skovsgaard らは注視している点に対して離散的なズームを複数回行うことによりターゲットの幅を増大する手法を提案した [SMFH10] が、この手法を視線インタフェースに組み込む場合、画面をズームしている間はズーム領域外の情報が失われ、ターゲットの選択に要する時間に加えてズームの操作に要する時間も必要になるためタスク完了時間が増加することが考えられる。Ashmore らはズーム領域外の情報が失われないようにするために魚眼レンズを用いた局所的なズームによりターゲットの幅の増大を行う手法を提案した [ADS05] が、この手法も Skovsgaard らの手法 [SMFH10] と同じくズームの操作に要する時間分だけタスク完了時間が増加する。また、ズーム以外のアプローチにて実質的にターゲットの幅を増大させる手法も存在し、Špakov らは視線によってメニューを選択する際に一定時間注視することによりメニューの大きさが拡大されるインタフェースの設計を提案した [vM05]。この設計によりエラー率を 1/6 に減少させたが、動作時間が 39% 増加した。Miniotas らは視覚的なターゲットの幅よりも大きな判定領域を設定することにより実質的なターゲットの幅を増大する手法を提案した [MvM04]。この手法によってタスク完了時間は有意に減少したが、判定領域を静的に設定しているためインタフェースの設計を変更するたびに判定領域を手動にて再設定する必要がある。さらに判定領域を重ねることができないためターゲットを密集的に配置することができずインタフェースの設計に制約が生じる。

これらの手法は、ターゲットの幅を増大することによりポインティングを容易にするが、タスク完了時間の増加およびインタフェースの設計の汎用性の損失につながる。タスク完了時間については、視線が単一的な入力しか行えないために容易なポインティングとトレードオフの関係になっている。一方、我々の手法ではタスク完了時間や設計の汎用性は維持され、かつ小さなターゲットを容易に選択することができる。

2.2 バブルカーソル

ポインティングタスクにおいて、点のカーソルを用いて面のターゲットを選択すること、および面のカーソル（エリアカーソル）[KB95,WWBH97]を用いて点のターゲットを選択することは選択時間において同じ意味を持つ。しかし、エリアカーソルは点形状であるポインタ異なり一定の面積を持つため、ターゲットが密集している状況においてはエリアカーソルが複数のターゲットを同時に含んでしまう。そのため、密集状況において1つのターゲットを選択することができない。この問題を解消するために Bubble Cursor [GB05] という手法が提案されている。Bubble Cursor は、カーソルの中心位置およびターゲットの中心位置をもとにして、常にターゲットを1つだけ含むような大きさにカーソルの大きさを動的に変更し続ける円形状のエリアカーソルである。この特性により、Bubble Cursor を用いることにより Bubble Cursor の幅だけターゲットの幅を拡大することと同じ効果を得ることができる。

このバブルカーソルを視線インタフェースにて行った手法として崔らの Bubble Gaze Cursor [崔明 20] がある。我々の手法では、この Bubble Gaze Cursor を VR 環境（3次元）に拡張したものである。また、藤原らにより拡張現実（以下、AR）環境におけるバブルカーソルを用いた視線入力提案されている [藤原 22]。一方、我々は3次元に拡張した Bubble Gaze Cursor に適した注視時間およびサッケード運動の影響を抑制するための平滑化フィルタの有用性について調査している。

2.3 VR 環境における視線によるポインティング

これまでに、VR 環境における視線によるポインティングの研究が行われてきた。視線のみにより特定のターゲットの選択から選択の確定までを行う研究としては、滞留時間を設けた手法 [KOAB18,CSD03,CSO22] が挙げられる。さらに、選択の確定あるいは複数のターゲット候補の中から特定のターゲットを選択するために視線によるジェスチャを行う手法として次のものが挙げられる。Sidenmark ら [SCZ+20] は、VR 空間において遮蔽されたターゲットの輪郭を周回するオブジェクトを配置し、その動きに併せて視線を動かすことによるターゲット選択手法を提案した。Piumsomboon ら [PLL17] は、ユーザの注視した領域内にある全てのオブジェクトを異なる方向へ運動させ、その時のユーザの眼球運動によって遮蔽されたターゲットを選択する手法を提案した。崔ら [崔明 23,CSO22] は、ユーザの視線が動くことはほとんどない目の水平方向領域 45° を活用することにより、VR における視覚探索時の意図しない選択操作であるミダスタッチが減少する手法を提案した。

視線以外のものを併用する研究として、Ken らはハンドトラッキングされたユーザの手指と視線を組み合わせるにより、注視したターゲットを手指によるピンチジェスチャにて選択、および移動を行う手法を提案した [PMMG17]。また、Ludwig らは視線に HMD によりトラッキングされているユーザ頭部の姿勢を組み合わせるにより正確かつ容易なポインティングを行う手法 [SG19,SPBG21] を、Argenis らは片方の目の開閉（ウインク）によりもう片方の目にて注視しているターゲットの選択を確定する手法 [RGCSG21] を、大西らはサー

マルカメラにて観測した鼻と口の温度の変化から吸気および呼気を計測することにより呼吸にて注視しているターゲットの選択を確定する手法 [OMS+22] を提案した。

これらの手法では、ターゲットあるいはターゲットが存在する領域を注視した後に、新たにターゲットの選択を確定するための視線あるいは手指によるジェスチャを行う必要がある。一方、我々の手法ではユーザはターゲットへの連続注視のみにより選択を行うことができる。

第3章 3次元Bubble Gaze Cursor

2次元動的エリアカーソル法の1つであるBubble Gaze Cursor [崔明 20] を3次元に拡張したVR環境向けのポインティング手法を実装した。以下に、そのポインティング方法およびユーザインタフェースの提示を示す。

3.1 ポインティング方法

Bubble Gaze Cursorにおいては、アイトラッキングデバイスにより2次元の平面ディスプレイに対してユーザが向けた視線を取得し、その視線とディスプレイの衝突点（ユーザが見ている場所）を2次元の焦点座標とする。そして、その焦点座標と各ターゲットの中心間の距離を計測し、最も近いターゲットを検出する。本手法では、視線を焦点座標という点ではなく直線として扱うことによりBubble Gaze Cursorを3次元へ拡張する。HMDに搭載されたアイトラッキングデバイスにより、ユーザの視線情報（視線の根本および視線の向き）を取得する。取得した視線情報から視線の直線（以下、視線レイ）を引き、視線レイと各ターゲットの中心間の距離を計測し、最も近いターゲットを検出する。動的エリアカーソル法においてこの検出されている状態がカーソルと接触していることを意味する。同一のターゲットが一定時間連続して検出状態となった場合にそのターゲットが選択される（図 3.1）。これにより、ユーザは任意のターゲットを一定時間中止し続けることによりそのターゲットを選択することができる。なお、バブルカーソルはターゲットを必ず1つ含むような大きさに変形するカーソルであるため、つねにいずれかのターゲットを選択している状態となる。そのため、ユーザがターゲットから視線を逸らしていたとしてもいずれかのターゲットが選択されることになる。この問題を解決するために検出する際における直線と各ターゲット間の距離の上限を追加した。すなわち、焦点とターゲットの距離がこの上限より大きくなった場合はいずれかのターゲットも検出されず、連続注視により選択されることもない。この上限は、Oculusの公開している開発者用引き [Ocu19] に従い1.0mとしている。

3.2 ユーザインタフェースの提示

Bubble Gaze Cursorにより提示されるユーザインタフェースとしてカーソルおよび焦点がある。前述の通り、Bubble Cursorはターゲットを必ず1つ含むような大きさに変形するカーソルであるため、最も近いターゲット間の距離が大きすぎる場合、カーソルが巨大化してユーザの視界を覆うこととなる。カーソルの大きさに上限を設けたとしてもユーザの視界を上限ま

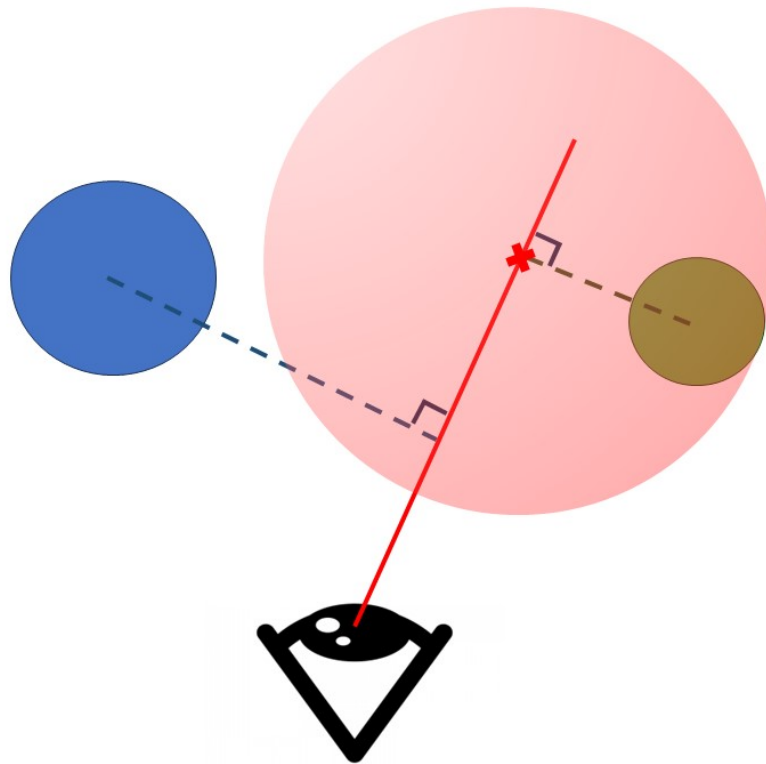


図 3.1: レイを用いた 3 次元 Bubble Cursor の仕組みの例. 最もレイとターゲットの中心間の距離が小さいターゲット (緑色の円) を含めるようにカーソル (赤色の半透明の円) が大きくなる.

で巨大化したカーソルが占める. さらに, ユーザがカーソルおよびカーソルに含まれたターゲットを認識するためには, カーソルが半透明である必要がある. しかし, この場合, カーソルの色とカーソルに含まれたターゲットの色が重なることにより, ユーザから見えるターゲットの色が変化するため, コンテンツの文脈を損なう可能性がある. 以上の理由により, カーソルを表示しないこととした.

焦点は 3 次元に拡張したことにより視線レイとなっている. カーソルを表示しない代わりに視線レイを表示することにより, ユーザが自身の視線の方向を認識できるようにする.

第4章 予備実験1

前述の通り，本手法のポインティングにおいては連続した一定時間の注視を行う．この注視の最適な時間として，Zhang の研究 [ZXZZ11] および夏目らの研究 [夏目 23] にて示された 600-1000 ms の間にて，実装した Bubble Gaze Cursor に最も適する注視時間を 600 ms，800 ms および 1000 ms の 3 種類の中から予備実験を通して調査した．

4.1 実験設計

以下に最適な注視時間の調査のために行った予備実験の詳細として，実験に使用した機器，実験参加者および実験環境，ポインティングタスクの条件，実験手順および評価指標を述べる．

4.1.1 機器

実験に用いた HMD は Vive Pro Eye であり，コンピュータは OMEN by HP17-an012TX [日本 17](CPU: Intel(R)Core i7-7700HQ, メモリ: 16 GB RAM, GPU: NVIDIA(R)GeForce(R)GTX1070, OS: Windows 10 Pro) を用いた．また，視線トラッキングには Vive Pro Eye に内蔵された専用のセンサを用いた．実験に用いたソフトウェアは，Unity および C# にて作成した．

4.1.2 実験参加者および実験環境

研究室内の 4 名 (21-24 歳，平均年齢 22.75 歳，全員男性) がボランティアとして実験に参加した．太陽光による外乱の影響を除くために直射日光が当たらない環境にて実験を行った．

4.1.3 ポインティングタスク

Lu らの研究 [LYS20] に倣い，実験参加者から 5.0 m の距離に，0.1 m の大きさのターゲットを 7 × 7 の正方形に配置する．また，隣接するターゲット間の距離は 0.02 m としている．

4.2 評価指標

評価に用いる指標には，ポインティング速度を計測するためのタスク完了時間，ポインティング精度を測定するためのエラー率の 2 つを使用した．

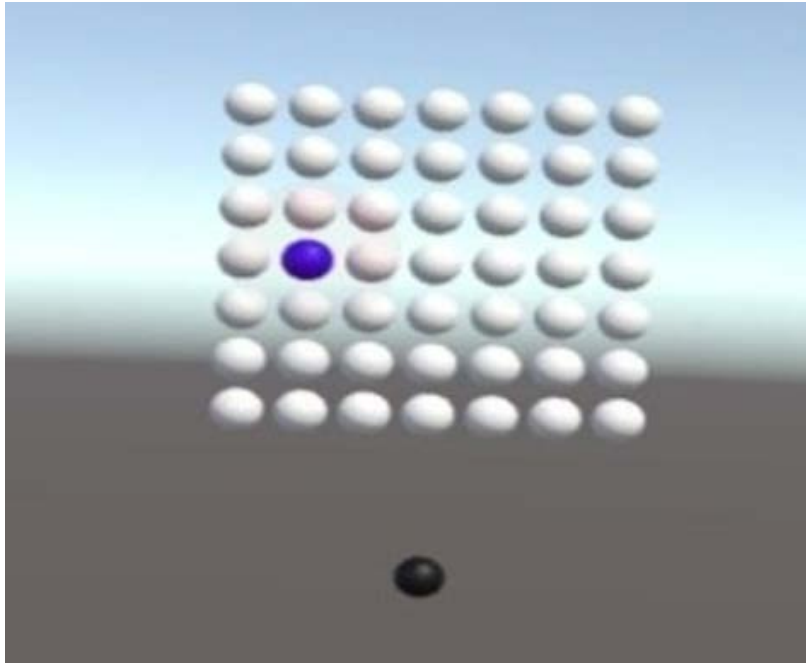


図 4.1: ポインティングタスクを行うターゲット.

4.3 実験手順

実験参加者は、HMD を装着した後、SteamVR にて正面姿勢および視線のキャリブレーションを行う。その後、実験アプリケーション（Unity のデバックモード）へ移行し、黒色のオブジェクトを選択することによってタスクを開始する。タスクが開始されると、表示されているターゲット群の中からランダムに1個が青色となり、青色となったターゲットを可能な限り高速かつ正確に選択する。ターゲットを選択した時、実験アプリケーションはそのターゲットを緑色にすることにより視覚的に実験参加者へ選択の成功を通知する。また正しいターゲットを選択した場合、および間違ったターゲットを選択した場合にはそれぞれの効果音によって聴覚的に実験参加者に通知する。正しいターゲットを選択した後、青色のオブジェクトが緑色を経由して白色に戻るため、再度黒色のオブジェクトを選択することにより、次のターゲット選択に移行する。黒色のオブジェクトを選択してから青色のターゲットを選択するまでを1タスクとして、計25回繰り返す。なお、同じターゲットは複数回ポインティングの対象となることなく、外縁のターゲットを除いたターゲットを全て1回ずつ選択することになる。規定回数のタスクが完了した時、実験アプリケーションはオブジェクトを全て緑色に変化させ、さらに効果音により、実験参加者へタスクの終了を知らせる。

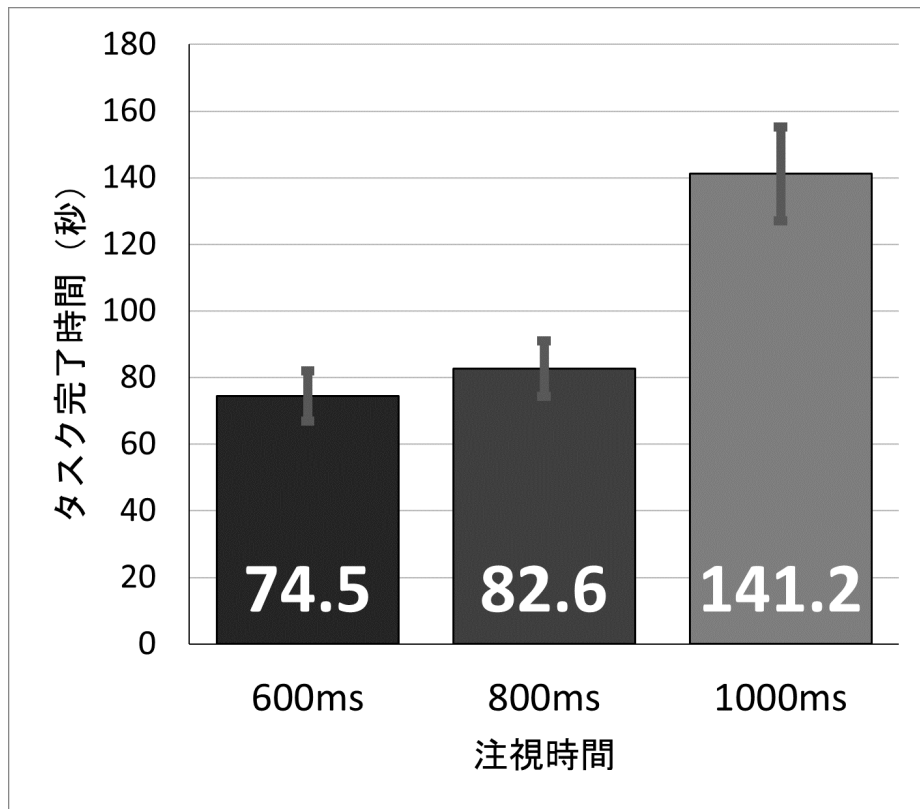


図 4.2: 各注視時間におけるタスク完了時間.

4.4 結果

独立変数は注視時間であり，従属変数はタスク完了時間およびエラー率である．分析には，データが正規分布に従っているかどうかを確認するために Shapiro-Wilk 検定 [SW65] を行った後に一元配置分散分析 [How02] を用いており，事後多重比較には Tukey の HSD 検定 [Tuk49] を用いた．なお検定に用いた有意水準は 5% である．図 4.2 および図 4.3 内のエラーバーは標準偏差を表す．

4.4.1 タスク完了時間

各注視時間におけるタスク完了時間を図 4.2 に示す．

各注視時間におけるタスク完了時間の平均は，600 ms において 74.46 秒 ($SD = 29.90$)，800 m において 82.65 秒 ($SD = 41.93$)，および 1000 m において 141.18 秒 ($SD = 65.90$) であり，分析の結果，条件間には有意な主効果は存在しなかった ($p = 0.2358 > 0.05$)．

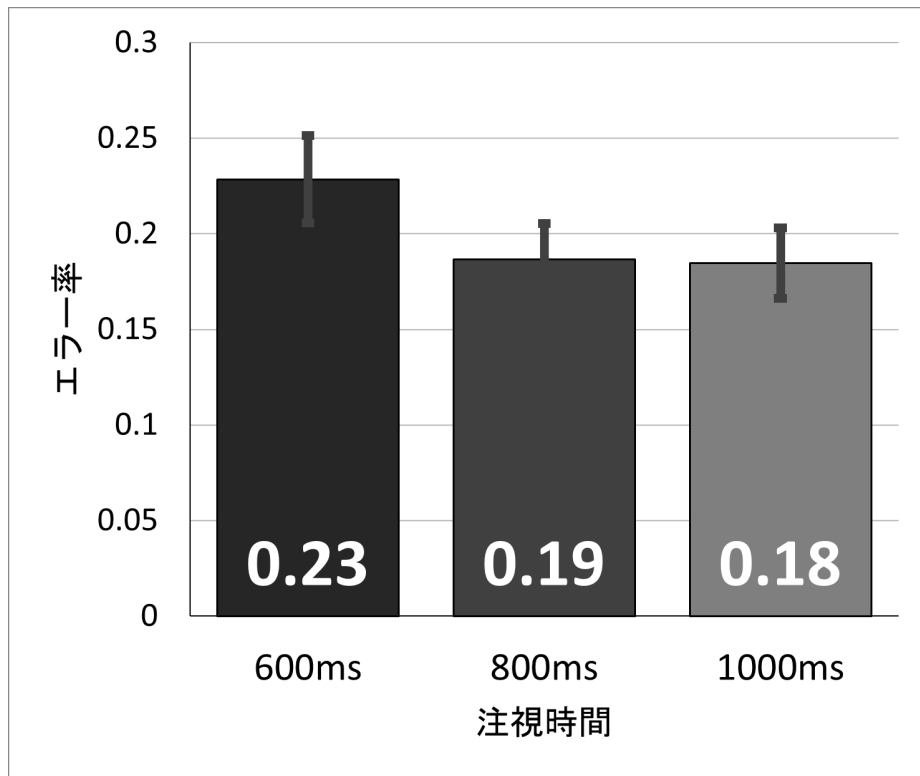


図 4.3: 各注視時間におけるエラー率.

4.4.2 エラー率

各注視時間におけるエラー率を図 4.3 に示す.

移動平均フィルタの有無における平均エラー率は、600 ms において 0.23 ($SD = 0.11$), 800 m において 0.19 ($SD = 0.11$), および 1000 m において 0.18 ($SD = 0.10$) であり, 分析の結果, 条件間には有意な主効果は存在しなかった ($p = 0.8440 > 0.05$).

4.5 議論

タスク完了時間およびエラー率ともに有意な主効果はなかったが, 600 ms において最もタスク完了時間が短くなったため, 注視時間には 600 ms を採用した.

第5章 予備実験2

前述の通り，視線インタフェースを用いたポインティングタスクにおいてサッケード運動の影響により正確なポインティングが行えない．Bubble Gaze Cursorを用いることによりサッケード運動の影響を軽減することはできるが，ターゲットが密集した環境ではサッケード運動の影響が強く出ることによりミダスタッチが生じる可能性を考え，平滑化のために移動平均フィルタ [IC75] を用いることによりサッケード運動の影響を抑制しようと考えた．移動平均の内，単純移動平均（以下，SMA）の式は，

$$SMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N P_i \quad (5.1)$$

であり， n はデータの数（フィルタサイズ）， P_i はフレームごとの視線情報となる．また， n は大きくなるほど視線の動きが緩慢となり，VR 環境においてはフレームレートが処理の大きさにより動的に変化することから，

$$n = \frac{\text{現在のフレームレート}}{4} \quad (5.2)$$

とした．これは，著者が実装を通して感覚的に設定した．

以下の示す予備実験にて，移動平均フィルタの必要性について調査した．

5.1 実験設計

2 以下に最適な注視時間の調査のために行った予備実験の詳細を述べる．実験設計は，研究室内の 5 名（2-24 歳，平均年齢 23.4 歳，全員男性）を実験参加者とした以外は適切な注視時間を調査した予備実験と同じであり，注視時間には 600 ms を採用した．

5.2 結果

独立変数は注視時間であり，従属変数はタスク完了時間およびエラー率である．分析には，データが正規分布に従っているかどうかを確認するために Shapiro-Wilk 検定 [SW65] を行った後に t 検定 [日本 99] を用いた．なお検定に用いた有意水準は 5 % である．

5.2.1 タスク完了時間

移動平均フィルタの有無におけるタスク完了時間を図 5.1 に示す。

移動平均フィルタの有無におけるタスク完了時間の平均は、移動平均フィルタがある場合において 47.34 秒 ($SD = 16.55$)、移動平均フィルタがない場合において 74.66 秒 ($SD = 47.26$) であり、分析の結果、条件間には有意な主効果は存在しなかった ($p = 0.3253 > 0.05$)。

5.2.2 エラー率

移動平均フィルタの有無における平均エラー率を図 5.2 に示す。

移動平均フィルタの有無における平均エラー率は、移動平均フィルタがある場合において 0.14 ($SD = 0.13$)、移動平均フィルタがない場合において 0.12 ($SD = 0.13$) であり、分析の結果、条件間には有意な主効果は存在しなかった ($p = 0.8440 > 0.05$)。

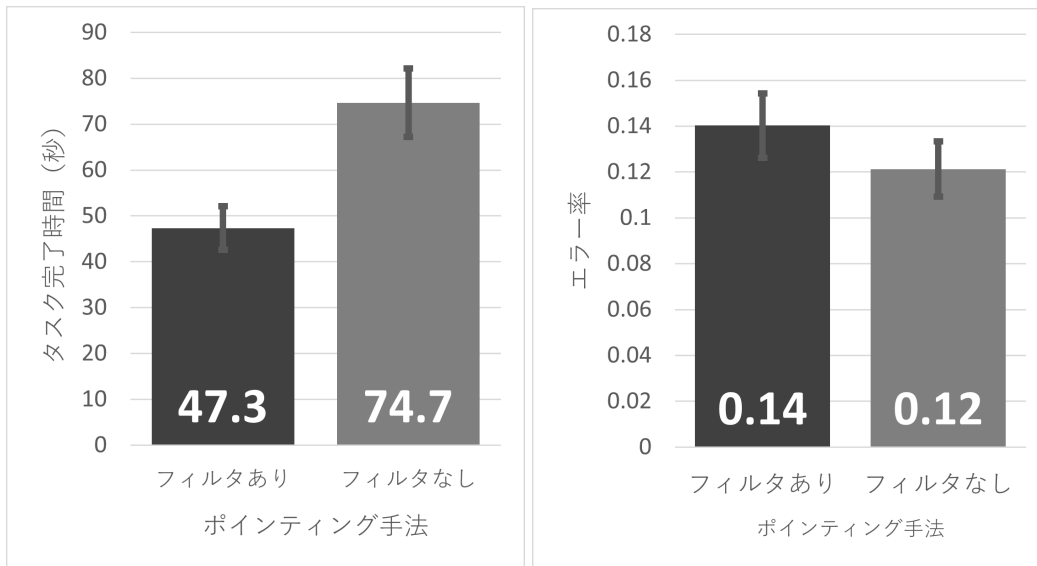


図 5.1: 移動平均フィルタの有無におけるタスク完了時間. 図 5.2: 移動平均フィルタの有無におけるエラー率.

5.3 議論

タスク完了時間およびエラー率ともに有意な主効果はなかったが、移動平均フィルタがある場合の方がタスク完了時間が短かったため、移動平均フィルタが必要であると判断する。

第6章 実験1

小さなターゲットに対する3次元 Bubble Gaze Cursor のポインティング性能を調査および評価するために実験を行った。本章では、実験設計および手順を述べた後に、実験の結果および考察を述べる。

6.1 実験設計

以下に実験に使用した機器、実験参加者および実験環境、ポインティング手法およびポインティングタスクの条件を述べる。

6.1.1 機器

実験に用いたHMDはVive Pro Eyeであり、コンピュータはOMEN by HP 16-c0161AX [日本21] (CPU: AMD Ryzen 7 5800H, メモリ: 16GB RAM, GPU: NVIDIA(R) GeForce(R) RTX3070, OS: Windows 11 Pro) を用いた。また、視線トラッキングにはVive Pro Eyeに内蔵された専用のセンサを用いた。実験に用いたソフトウェアは、Unity および C#にて作成した。

6.2 実験参加者および実験環境

研究室内の9名(22–25歳, 平均年齢23.22歳, 女性2名)がボランティアとして実験に参加した。実験前に7段階のリッカート尺度 [Lik32] (高いほど「ある」, 低いほど「ない」)にて質問したところ, マウスあるいはタッチパッドの使用経験は平均6.44 ($SD = 0.68$), VRの使用経験は平均3.78 ($SD = 1.75$), 視線インタフェースの使用経験は平均2.33 ($SD = 1.33$)であった。実験を行った環境を図6.2に示す。太陽光による外乱の影響を除くために直射日光が当たらない環境にて実験を行った。

6.2.1 ポインティング手法

提案手法である3次元 Bubble Gaze Cursor (以下, BGC) のポインティング性能を調査するための比較対象として, VR環境において最も普遍的に用いられるコントローラを用いたレイキャスト手法 (以下, RC), および視線インタフェースにおいて最も一般的な視線によるレイ

キャスト手法（以下，RG）を設定し，提案手法を含めて合計3つの手法にてポインティングタスクを行う。

6.2.2 ポインティングタスク

Luらの研究に倣い，ターゲットの大きさと位置を変更した以下の条件にてポインティングタスクを行う。Grossmanらの研究 [GB05] によると，Buuble Curcorにおいてもフィッツの法則 [Pau54, Mac92] が適用されることが確認されている。フィッツの法則の公式は，

$$MT = a + b \log_2\left(1 + \frac{A}{W}\right) \quad (6.1)$$

であり，MTは動作時間，Aは開始点からターゲットの中心までの距離，Wはターゲットの大きさ（幅），aおよびbは定数となる。この内，実験ではWを変更することとなるため， $\frac{A}{W}$ が一定になるようにAも変化させる。さらに，サッケード運動の振幅は最大1度以下である [Bro04] ため，ターゲットの大きさがユーザとターゲット間の距離 $\times \tan 1$ 以下であると，視線によるレイキャストでは選択が困難になる。これをターゲットの大きさの下限とすることにより，図6.1に示す3つの条件を設定した。

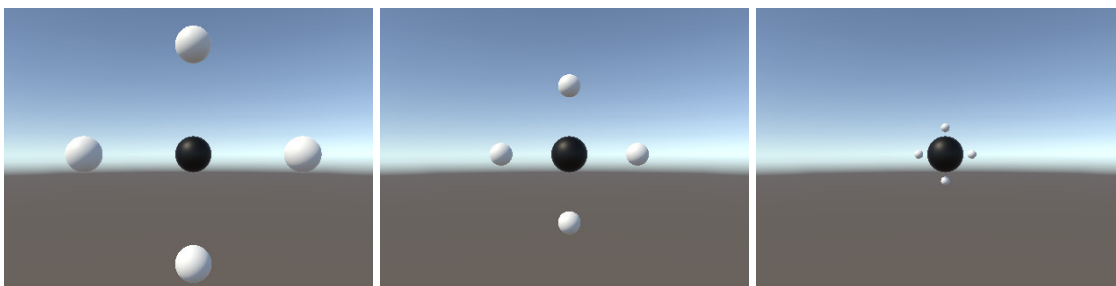


図 6.1: 新たなターゲット配置条件. 左：0.25 m, 中：0.156 m, 右：0.061 m.

6.3 評価指標

評価に用いる指標には，ポインティング速度を計測するためのタスク完了時間，ポインティング精度を測定するための正答率，ワークロード評価のために NASA Task Load Index [HS88, 芳賀96]（以下，NASA-TLX），およびユーザビリティ評価のための System Usability Scale [Bro96]（以下，SUS）の4つを使用した。NASA-TLX および SUS をアンケートを用いて評価する。NASA-TLX のスコアは大きいほど作業負荷が高いことを示し，SUS のスコアは大きいほどユーザビリティが高いことを示す。実験に用いたアンケートおよびその説明は付録に掲載する（付録 A.1，付録 A.2，および付録 A.3）。

6.4 実験手順

実験参加者は、HMDを装着した後、SteamVRにて正面姿勢および視線のキャリブレーションを行う(図6.3)。その後、実験アプリケーション(Unityのデバックモード)へ移行し、黒色のオブジェクトを選択することによってタスクを開始する。タスクが開始されると、表示されているターゲット群の中からランダムに1個が青色となり、青色となったターゲットを可能な限り高速かつ正確に選択する。ターゲットを選択した時、実験アプリケーションはそのターゲットを緑色にすることにより視覚的にユーザへ選択の成功を通知し、かつ正しいターゲットを選択した場合、および間違ったターゲットを選択した場合にはそれぞれの効果音によって聴覚的にユーザに通知する。正しいターゲットを選択した後、青色のオブジェクトが緑色を経由して白色に戻るため、再度黒色のオブジェクトを選択することにより、次のターゲット選択に移行する。黒色のオブジェクトを選択してから青色のターゲットを選択するまでを1タスクとして各ターゲットをそれぞれ6回ずつ、計24回繰り返す。規定回数のタスクが完了した時、実験アプリケーションはオブジェクトを全て緑色に変化させ、かつ効果音により、実験参加者へタスクの終了を知らせる。規定回数のタスクが完了する度に、NASA-TLX、SUSおよび自由記述式アンケートを行う。この時、HMDを外すと再度視線のキャリブレーションを行う必要があるため、デスクトップのミラーリング機能(デスクトップをVR上に表示する機能)を用いてVR上にて回答する(図6.4)。自由記述式アンケートに関しても、インタビュー形式にて回答する。この時、実験参加者はHMD用コントローラ、マウス、およびコンピュータ内蔵のタッチパッドにおいて最も操作しやすいものを使用した。

6.5 結果

独立変数はポインティング手法であり、従属変数はWPM、正答率、NASA-TLXの平均スコア、およびSUSの平均スコアである。分析には、データが正規分布に従っているかどうかを確認するためにShapiro-Wilk検定[SW65]を行った後に一元配置分散分析[How02]を用いており、事後多重比較にはTukeyのHSD検定[Tuk49]を用いた。なお検定に用いた有意水準は5%である。なお、図6.5、図6.6、図6.7、図6.8、図6.9、図6.10、図6.11、図6.12、図6.13、図6.14、図6.15および図6.16内に示すエラーバーは標準偏差を表す。

6.5.1 タスク完了時間

ターゲットの大きさ毎の各手法のタスク完了時間を図6.5、図6.6および図6.7に示す。

ターゲットの大きさが0.25mにおける各手法のタスク完了時間の平均は、BGCにおいて28.81秒($SD = 6.97$)、RGにおいて34.88秒($SD = 6.51$)、RCにおいて23.52秒($SD = 1.50$)であり、分析の結果、条件間には有意な主効果が存在した($p = 0.00398 < 0.05$)。事後多重比較において、RGとRCの間に有意差が存在した($p = 0.0028 < 0.05$)。

ターゲットの大きさが0.156mにおける各手法のタスク完了時間の平均は、BGCにおいて26.46秒($SD = 7.66$)、RGにおいて49.30秒($SD = 15.15$)、RCにおいて23.64秒($SD = 2.44$)



図 6.2: タスク中の実験参加者の様子.

であり、分析の結果、条件間には有意な主効果が存在した ($p = 0.000129 < 0.05$)。事後多重比較において、BGCとRGの間 ($p = 0.001 < 0.05$)、およびRGとRCの間 ($p = 0.001 < 0.05$) に有意差が存在した。

ターゲットの大きさが 0.061 m における各手法のタスク完了時間の平均は、BGC において 30.74 秒 ($SD = 10.26$)、RG において 170.04 秒 ($SD = 54.93$)、RC において 29.26 秒 ($SD = 3.08$) であり、分析の結果、条件間には有意な主効果が存在した ($p = 0.0000000319 < 0.05$)。事後多重比較において、BGCとRGの間 ($p = 0.001 < 0.05$)、およびRGとRCの間 ($p = 0.001 < 0.05$) に有意差が存在した。

6.5.2 正答率

ターゲットの大きさ毎の各手法の平均正答率を図 6.8、図 6.9 および図 6.10 に示す。

ターゲットの大きさが 0.25 m における各手法の正答率の平均は、全ての手法において 1 (完全正答) となった。

ターゲットの大きさが 0.156 m における各手法の正答率の平均は、BGC および RC において 1 (完全正答)、RG において 0.995 ($SD = 0.014$) であり、分析の結果、条件間には有意な主効果は存在しなかった ($p = 0.3847 > 0.05$)。

ターゲットの大きさが 0.061 m における各手法の正答率の平均は、BGC および RC において 1 (完全正答)、RG において 0.724 ($SD = 0.128$) であり、分析の結果、条件間には有意

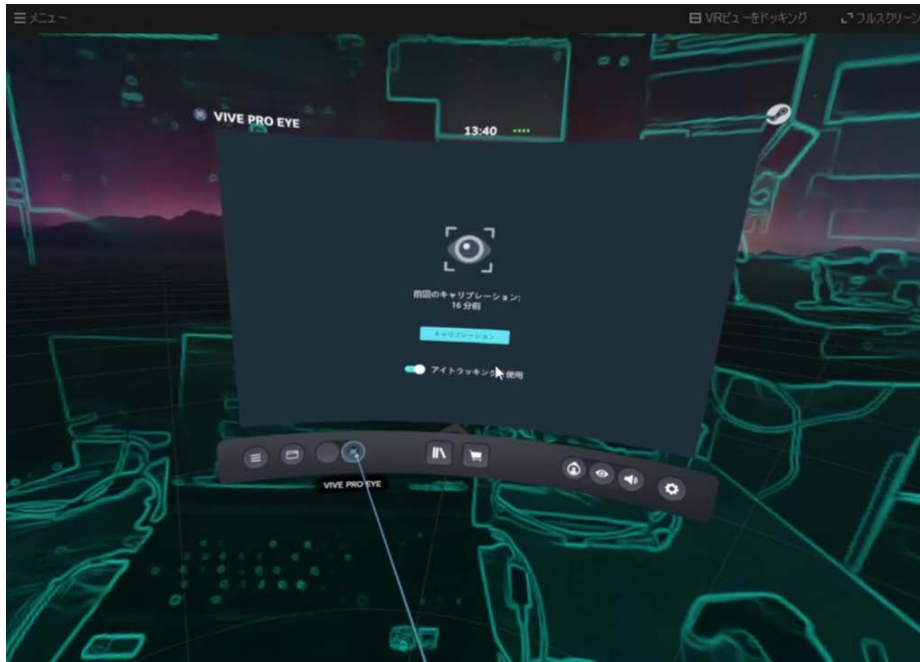


図 6.3: SteamVR にて各種キャリブレーションを行っている様子。

な主効果が存在した ($p = 0.0000003.82 < 0.05$)。事後多重比較において、BGC と RG の間 ($p = 0.001 < 0.05$)、および RG と RC の間 ($p = 0.001 < 0.05$) に有意差が存在した。

6.5.3 NASA-TLX

ターゲットの大きさ毎の各手法の NASA-TLX の平均スコアを図 6.11、図 6.12 および図 6.13 に示す。

ターゲットの大きさが 0.25 m における各手法の NASA-TLX の平均スコアは、BGC において 34.38 ($SD = 19.32$)、RG において 41.21 ($SD = 17.37$)、RC において 38.92 ($SD = 17.70$) であり、分析の結果、条件間には有意な主効果は存在しなかった ($p = 0.7758 > 0.05$)。

ターゲットの大きさが 0.156 m における各手法の NASA-TLX の平均スコアは、BGC において 35.04 ($SD = 15.85$)、RG において 49.79 ($SD = 16.53$)、RC において 37.54 ($SD = 16.37$) であり、分析の結果、条件間には有意な主効果が存在した ($p = 0.2158 > 0.05$)。

ターゲットの大きさが 0.061 m における各手法の NASA-TLX の平均スコアは、BGC において 41.13 ($SD = 19.49$)、RG において 66.63 ($SD = 17.16$)、RC において 37.88 ($SD = 16.31$) であり、分析の結果、条件間には有意な主効果が存在した ($p = 0.0117 < 0.05$)。事後多重比較において、BGC と RG の間 ($p = 0.0348 < 0.05$)、および RG と RC の間 ($p = 0.0165 < 0.05$) に有意差が存在した。

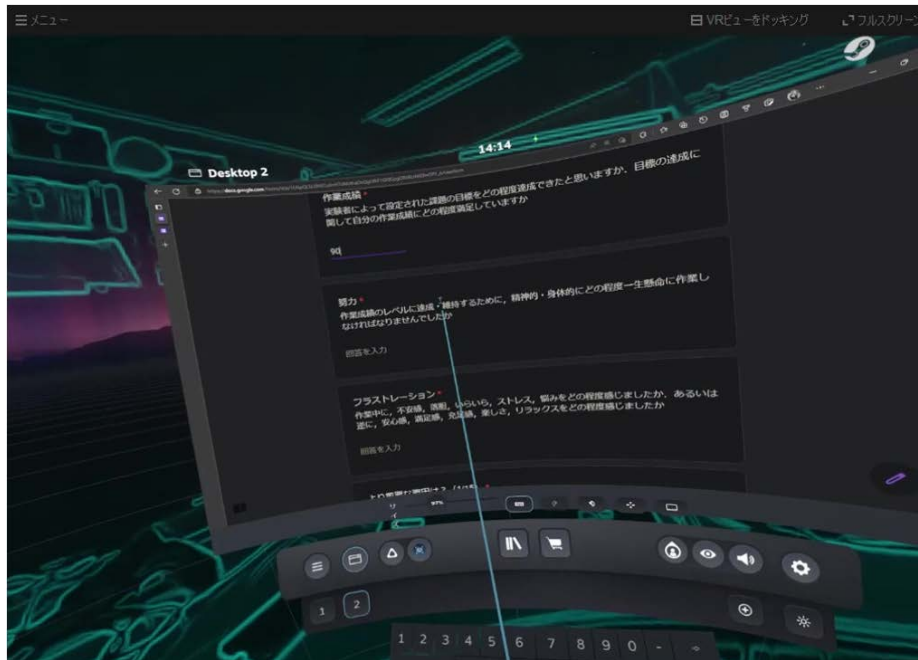


図 6.4: HMD を装着したままアンケートに回答している様子.

6.5.4 SUS

ターゲットの大きさ毎の各手法の SUS の平均スコアを図 6.14, 図 6.15 および図 6.16 に示す.

ターゲットの大きさが 0.25 m における各手法の平均 SUS スコアは, BGC において 83.44 ($SD = 16.20$), RG において 78.75 ($SD = 14.84$), RC において 85.63 ($SD = 10.21$) であり, 分析の結果, 条件間には有意な主効果は存在しなかった ($p = 0.6490 > 0.05$).

ターゲットの大きさが 0.156 m における各手法の平均 SUS スコアは, BGC において 84.38 ($SD = 10.51$), RG において 70.31 ($SD = 12.28$), RC において 85 ($SD = 10.53$) であり, 分析の結果, 条件間には有意な主効果が存在した ($p = 0.000129 > 0.05$).

ターゲットの大きさが 0.061 m における各手法の平均 SUS スコアは, BGC において 80.31 ($SD = 14.39$), RG において 42.5 ($SD = 15.96$), RC において 82.5 ($SD = 14.09$) であり, 分析の結果, 条件間には有意な主効果が存在した ($p = 0.0365 < 0.05$). 事後多重比較においては, BGC と RG の間 ($p = 0.0688 > 0.05$), BGC と RC の間 ($p = 0.9 > 0.05$), および RG と RC の間 ($p = 0.0557 > 0.05$) に有意差は存在しなかった.

6.6 考察

平均タスク完了時間については, ターゲットの大きさに関係なく RC が最も短い結果となったが, RC と BGC の差はターゲットの大きさが 0.25 m における 5.3 秒が最長であり, 大きな差は見られなかった. 視線インタフェースを用いたポインティング手法である BGC と RG

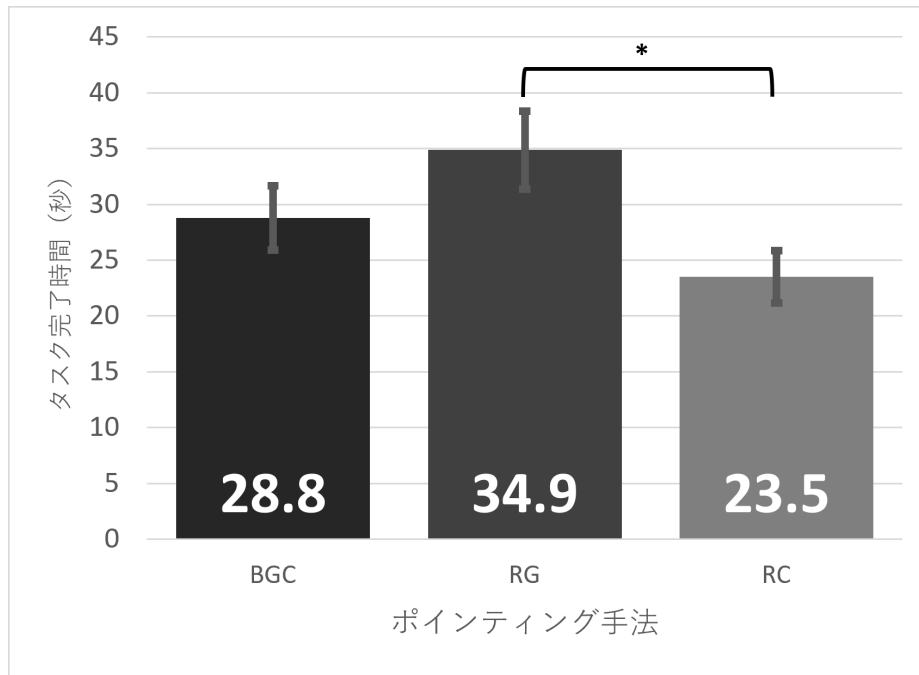


図 6.5: ターゲットの大きさが 0.25 m における各手法のタスク完了時間.

を比較すると、全てのターゲットの大きさにおいて BGCの方が短く、ターゲットが小さくなるほど完了時間の差は広がっていき、0.156 m および 0.061 m においては有意差が見られた。そのため、ポインティング速度において、従来手法にあたる RG よりも BGCの方が優れていると考えられる。

平均正答率については、ターゲットの大きさに関係なく BGC および RC が最も高い結果となり、RG はターゲットが小さくなるほど正答率が低下した。この要因としては、レイがターゲットと接触しなくともレイの周囲にターゲットがあれば注視状態となる BGC の動的エリアカーソル法としての特性が顕著に表れたためと考えられる。そのため、ポインティング精度において、従来手法にあたる RG よりも BGCの方が優れていると考えられる。

平均 NASA-TLX スコアについては、僅差ではあるがターゲットの大きさが 0.25 m および 0.156 m において BGC が最も低くなり、0.061 m では RC が最も小さいが BGC のスコアとは 3.2 しか差が無かった。この要因としては、BGC がターゲットの大きさの影響を受けずにポインティングが行えるため、平均タスク完了時間および平均正答率と同様に RC と同等のポインティング性能を発揮していることに加え、それを視線のみにより行えることから、ポインティングタスクを行っている間はコントローラを持ち上げ続ける必要のある RC よりも身体への負担が少なかったためと考えられる。

平均 SUS スコアについては、ターゲットの大きさに関係なく RC が最も短い結果となったが、RC と BGC の差はターゲットの大きさが 0.25 m および 0.061 m における 2.19 が最大であり、大きさな差は見られなかった。この要因としては、BGC がポインティング速度およびポ

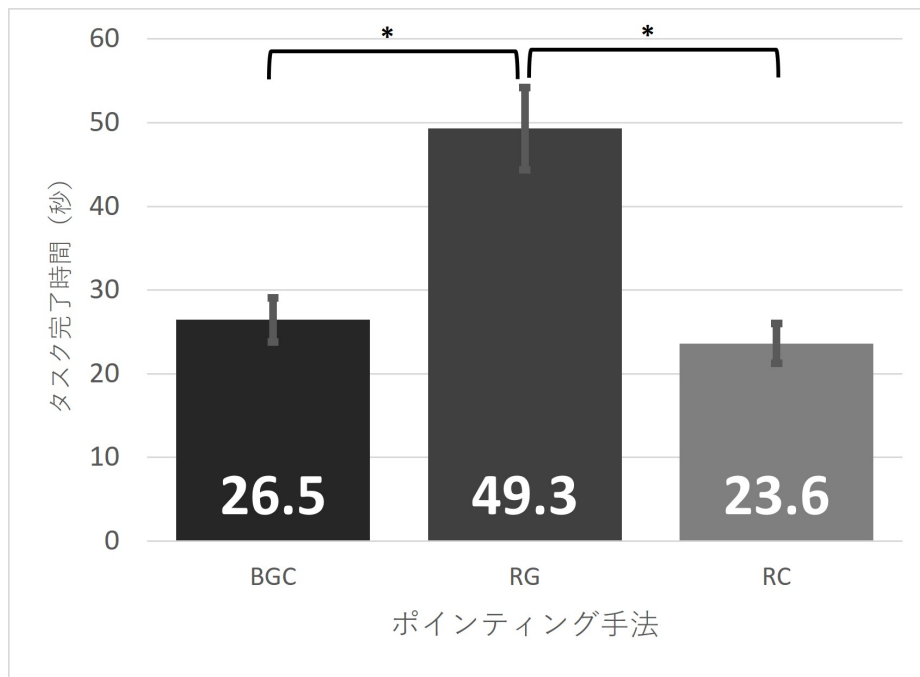


図 6.6: ターゲットの大きさが 0.156 m における各手法のタスク完了時間.

インテイング精度において RC と同等のポインティング性能を有しているためと考えられる。また、視線インタフェースを用いたポインティング手法である BGC と RG を比較すると、全てのターゲットの大きさにおいて BGC の方が短く、ターゲットが小さくなるほど完了時間の差は広がっていった。この要因としては、BGC によるポインティングがターゲットの大きさの影響を受けづらいためと考えられる。

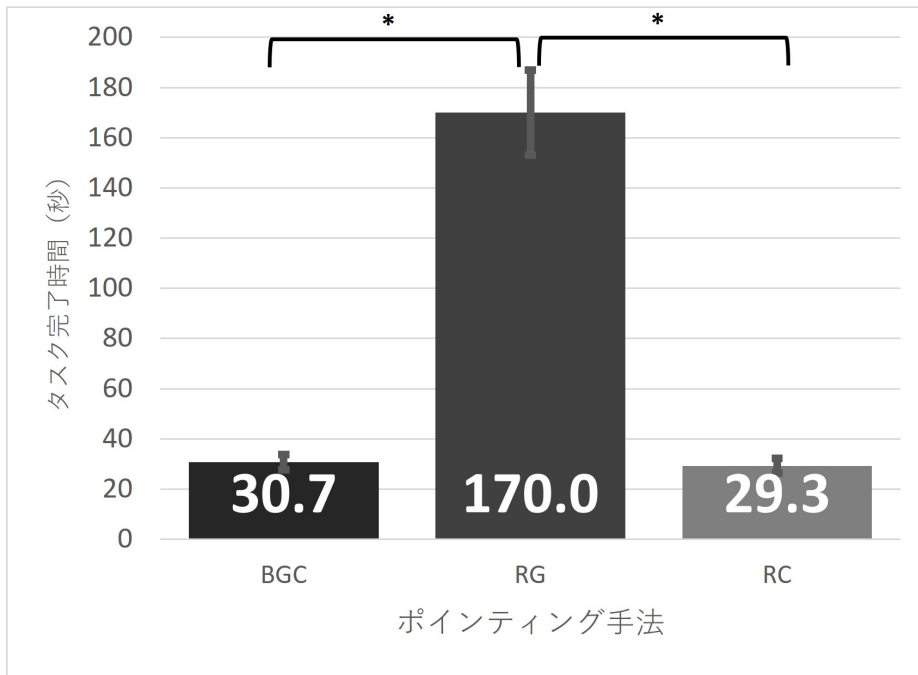


図 6.7: ターゲットの大きさが 0.061 m における各手法のタスク完了時間.

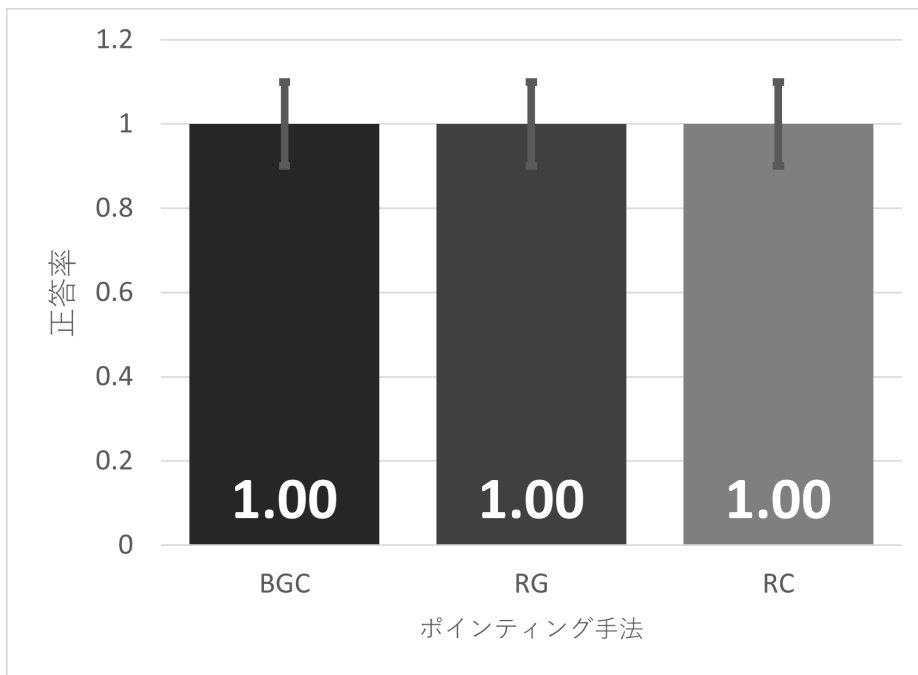


図 6.8: ターゲットの大きさが 0.25 m における各手法の正答率.

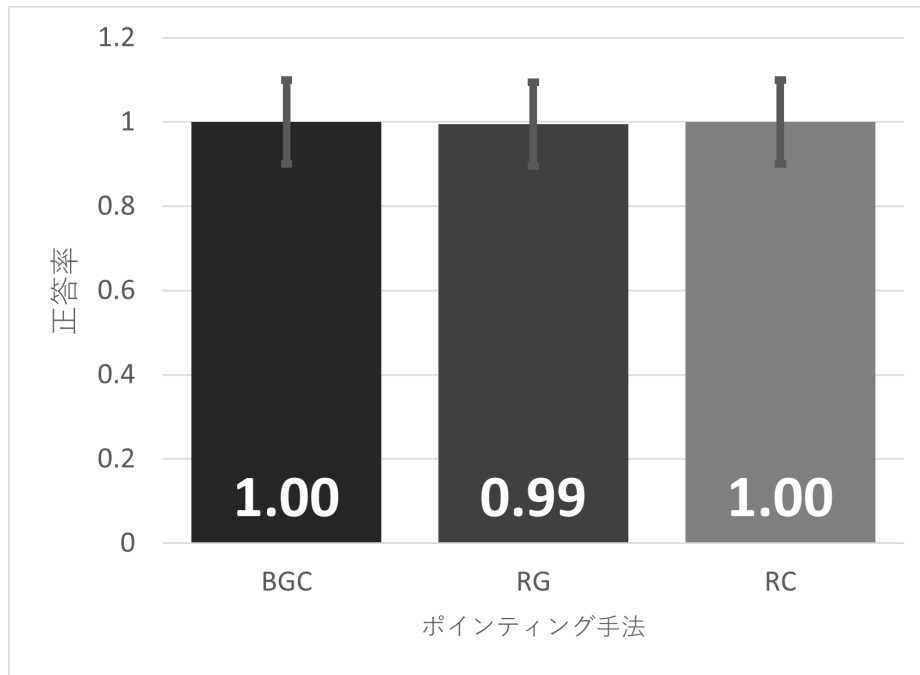


図 6.9: ターゲットの大きさが 0.156 m における各手法の正答率.

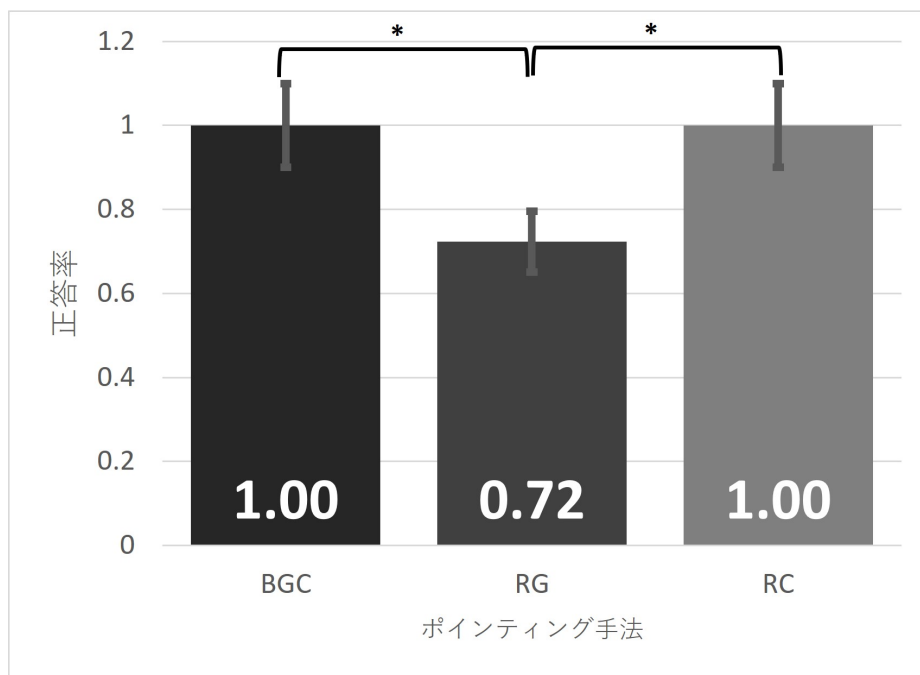


図 6.10: ターゲットの大きさが 0.061 m における各手法の正答率.

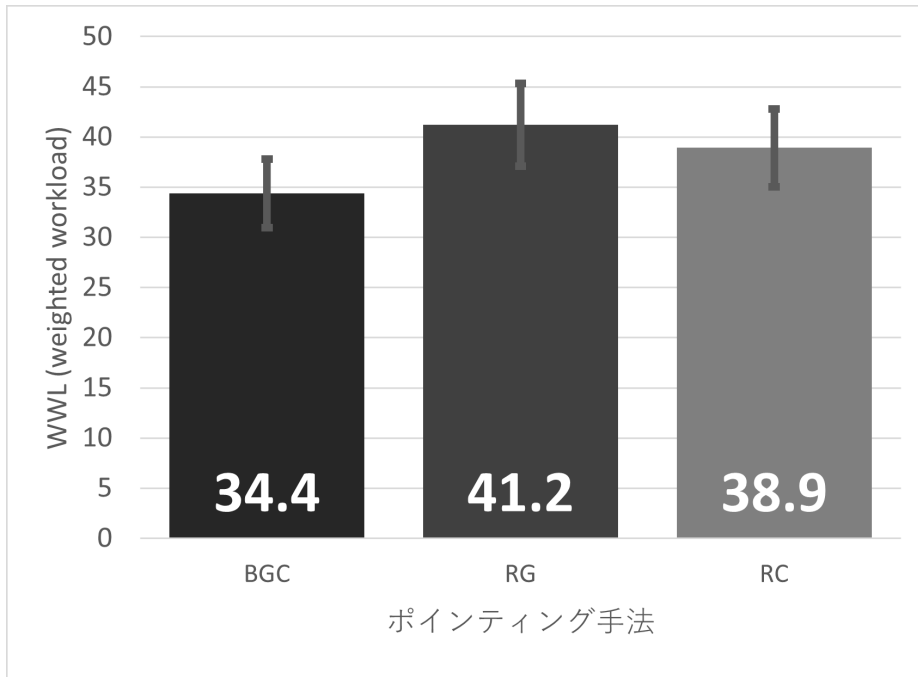


図 6.11: ターゲットの大きさが 0.25 m における各手法の平均 NASA-TLX スコア.

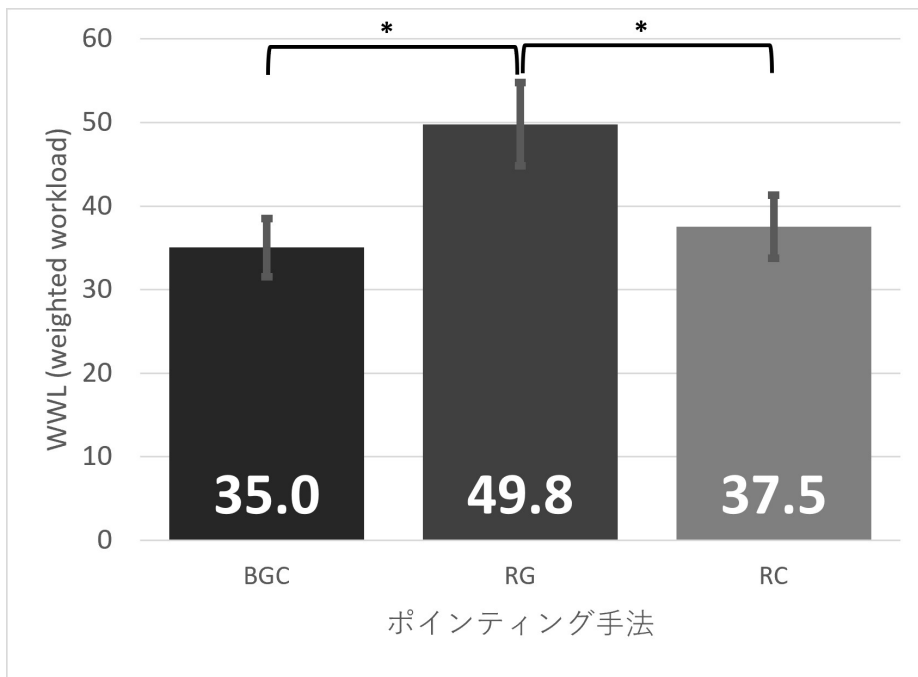


図 6.12: ターゲットの大きさが 0.156 m における各手法の平均 NASA-TLX スコア.

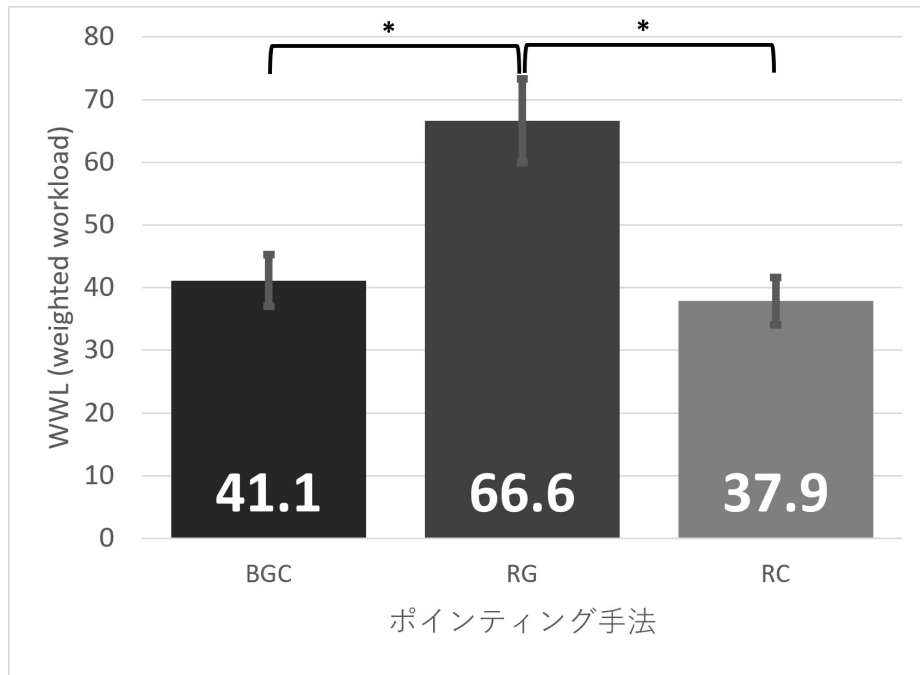


図 6.13: ターゲットの大きさが 0.061 m における各手法の平均 NASA-TLX スコア.

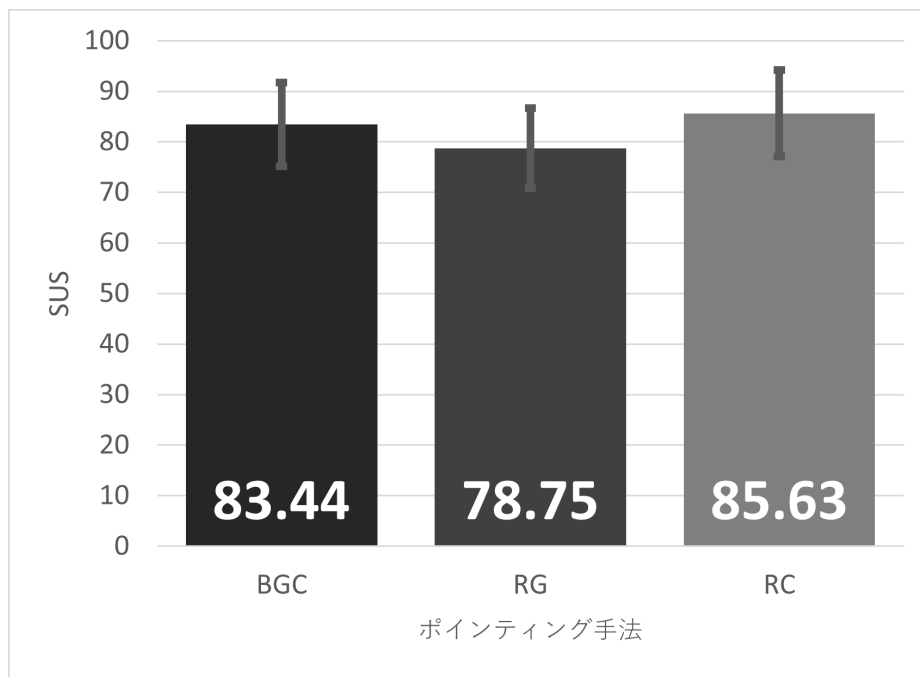


図 6.14: ターゲットの大きさが 0.25 m における各手法の平均 SUS スコア.

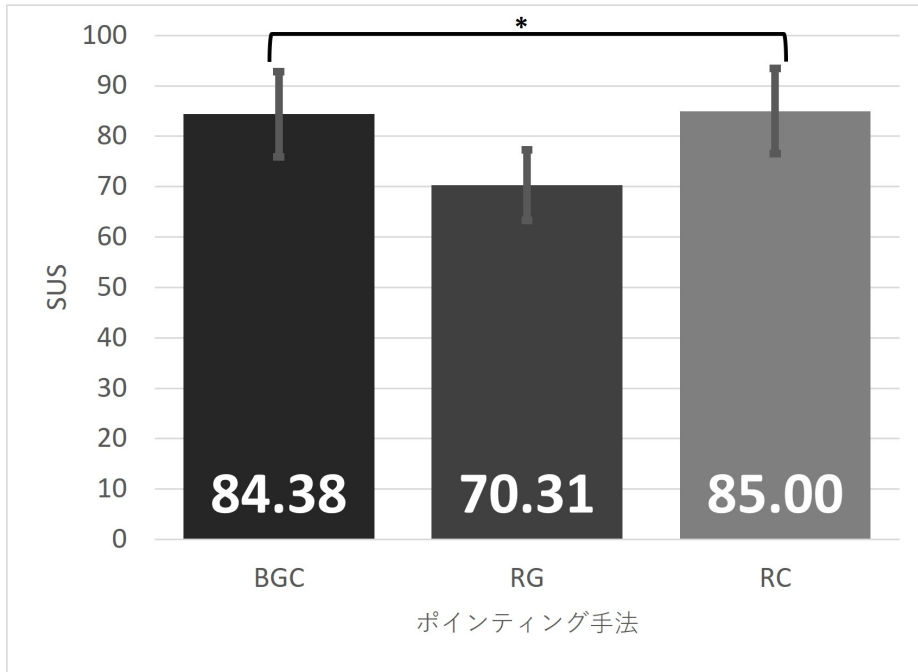


図 6.15: ターゲットの大きさが 0.156 m における各手法の平均 SUS スコア.

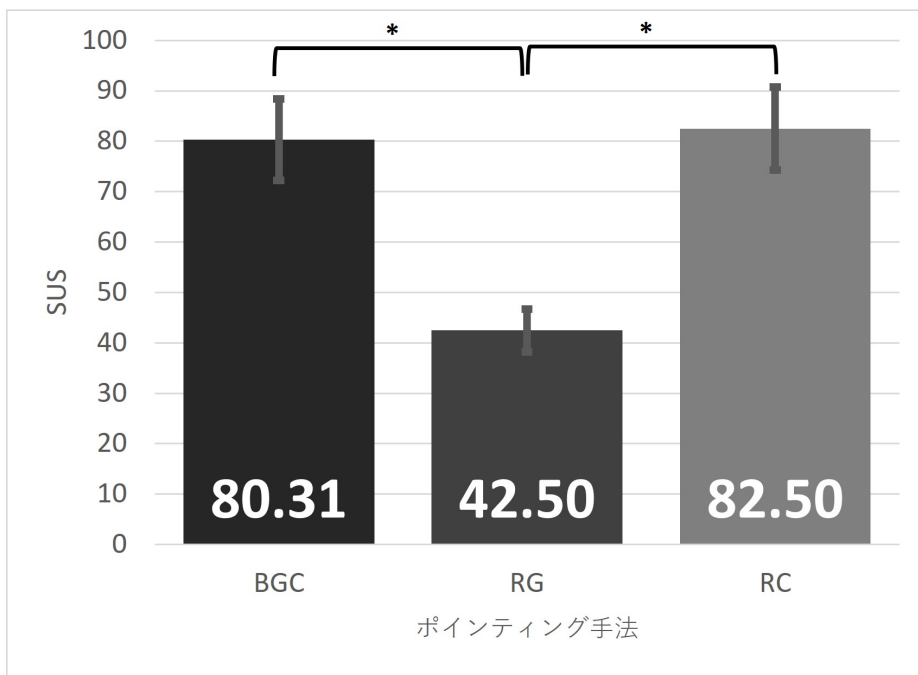


図 6.16: ターゲットの大きさが 0.061 m における各手法の平均 SUS スコア.

第7章 注視時間の動的化

予備実験1により、選択に必要な連続注視時間が短いほどタスク完了時間が短くなることが分かった。しかし、注視時間が短いほどエラー率（ミダスタッチの頻度）が大きくなっており、タスク完了時間（ポインティング速度）およびエラー率はトレードオフの関係にあることが分かった。そのため、ミダスタッチが発生しにくい状況等をシステムが判断して注視時間を動的化することにより、ポインティング速度を高速化する手法を3種類提案し、以下に述べる。

7.1 注視時間の累積

現在の実装では連続にて一定時間注視することによって選択が行われるため、僅かな時間であっても注視が途切れた場合は再度一定時間連続にて注視を行う必要がある。そのため、ある一点の注視を難しくするサッケード運動の影響を受けやすい。そこで、注視時間が累計において一定時間を超えた場合に選択扱いになるように実装を行った。また、注視が途切れた場合は途切れた時間だけ注視の累計時間が減少するようにした。

7.2 ターゲットの密集度合いに応じた動的化

前述した Bubble Gaze Cursor に Gaze Raycast を組み合わせた注視時間の短縮と同じ理由により、ターゲットの密集度合いに応じて選択に必要な注視時間が変化する機能を実装した（図7.1）。Bubble Gaze Cursor のカーソルに設定している最大半径内に存在するターゲットの数が少ないほど必要となる注視時間が少なくなる。そのため、ターゲットが密集していない状況では短い注視時間にて選択行うことができ、反対にターゲットが密集している状況では長い注視時間が設けられるためミダスタッチを抑制することができる。注視しているターゲット以外に周囲にターゲットが存在しない場合は設定している注視時間の半分にて選択が行われるようにしている。

7.3 Bubble Gaze Cursor と視線のレイを組み合わせた動的化

注視時間を短縮しつつもミダスタッチの頻度を抑えることを目的として、Bubble Gaze Cursor により注視状態となっているターゲットに対して視線のレイが接触した場合、その接触した

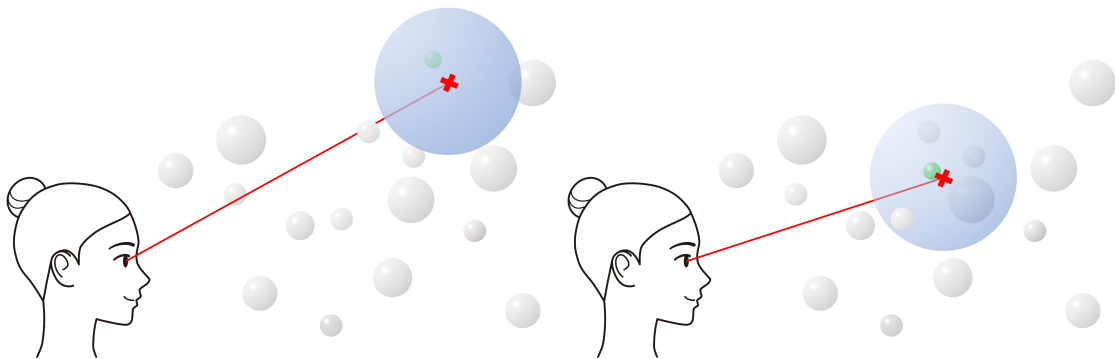


図 7.1: ターゲットの密集度合いに応じた動的化のイメージ図. 左のようにカーソルの中心位置から一定半径内に存在するターゲットが少ないほど必要な注視時間が短縮される. 右のように一定半径内に複数のターゲットが存在するほど短縮の度合いが小さくなる.

時間に応じて注視時間を更に加算する機能を実装した (図 7.2). 本手法における設定では, 視線のレイが触れた場合, 触れた時間だけ注視時間を加算するようになっており, 例えば, ターゲット選択に要する注視時間を 1.0 秒と設定した条件にて, Bubble Gaze Cursor によってあるターゲットが注視状態となったと同時に, そのターゲットと視線のレイが接触した場合は, 0.5 秒間の連続注視によってターゲットが選択される. これにより, 注視しやすいターゲットに対しては短時間の連続注視にて選択を行うことができ, 注視しづらいターゲットに対しては必要な注視時間の長さによってミダスタッチが生じづらくなることを想定している.

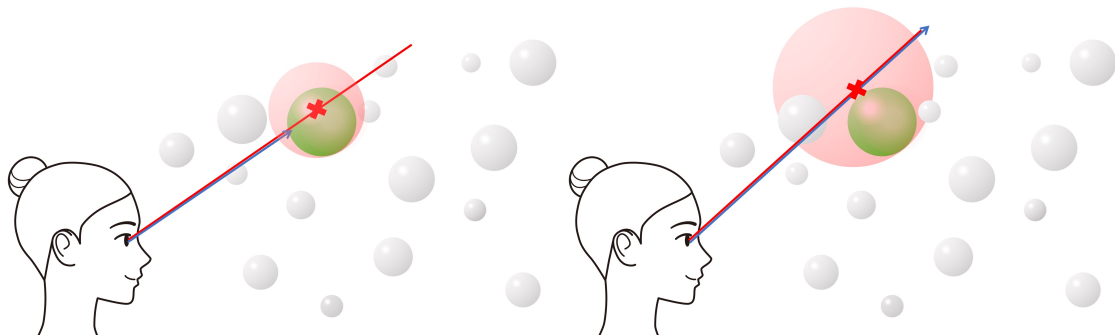


図 7.2: Bubble Gaze Cursor と視線のレイを組み合わせた動的化のイメージ図. 左のようにカーソル内に含んだ (注視状態となった) ターゲット視線に視線 (青矢印) を接触させている間, 必要な注視時間が短縮される. 右のようにターゲットへ視線が接触していない場合は通常の Bubble Gaze Cursor となる.

第8章 実験2

選択に必要な注視時間が動的に変化する3次元 Bubble Gaze Cursor のポインティング性能を調査および評価するために実験を行った。本章では、実験設計および手順を述べた後に、実験の結果を述べる。

8.1 実験設計

以下に実験に使用した機器、実験参加者および実験環境、ポインティング手法およびポインティングタスクの条件を述べる。

8.1.1 機器

実験に用いたHMDはVive Pro Eyeであり、コンピュータはOMEN by HP 16-c0161AX [日本21] (CPU: AMD Ryzen 7 5800H, メモリ: 16GBRAM, GPU: NVIDIA(R) GeForce(R) RTX3070, OS: Windows 11 Pro) を用いた。また、視線トラッキングにはVive Pro Eyeに内蔵された専用のセンサを用いた。実験に用いたソフトウェアは、Unity およびC#にて作成した。

8.1.2 実験参加者および実験環境

研究室内の8名(22–25歳, 平均年齢23.38歳, 女性1名)がボランティアとして実験に参加した。実験前に7段階のリッカート尺度 [Lik32] ((高いほど「ある」, 低いほど「ない」)にて質問したところ, マウスあるいはタッチパッドの使用経験は平均6.5 ($SD = 0.71$), VRの使用経験は平均4.13 ($SD = 1.54$), 視線インタフェースの使用経験は平均2.5 ($SD = 1.32$)であった。太陽光による外乱の影響を除くために直射日光が当たらない環境にて実験を行った。

8.1.3 ポインティング手法

BGCに対して, 注視時間の累積処理を施したもの(以下, 累積BGC), ターゲットの密集度合いに応じた動的化を施したもの(以下, 密集BGC), および視線のレイと組み合わせた動的化を施したもの(以下, BGC+RC)を設定し, BGCを加えた合計4つの手法を用いる。

8.1.4 ポインティングタスク

Lu らの研究 [LYS20] に倣い，実験参加者から 3.5 m の距離に，0.061 ($3.5 \times \tan 1$) m の大きさのターゲットを 5×5 の正方形に配置する（図 8.1）．また，隣接するターゲットの中心間の距離は 0.02 m としている．

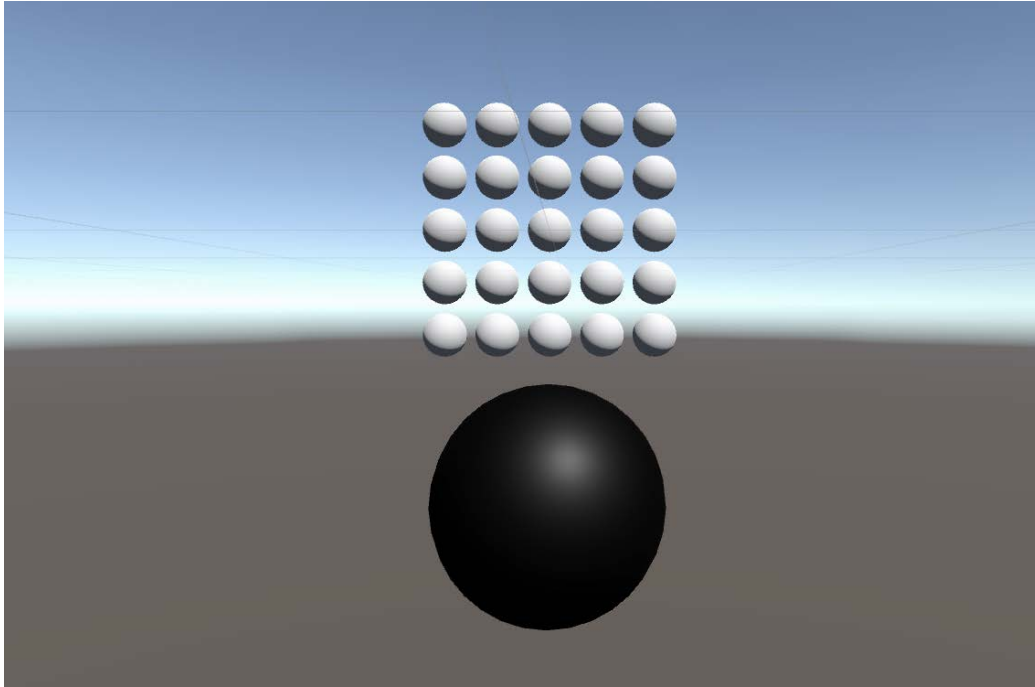


図 8.1: ポインティングタスクを行うターゲットの様子.

8.2 評価指標

評価に用いる指標には，ポインティング速度を計測するためのタスク完了時間，ポインティング精度を測定するためのエラー率，ワークロード評価のために NASA-TLX，ユーザビリティ評価のための SUS の 4 つを使用した．NASA-TLX および SUS をアンケートを用いて評価する．NASA-TLX のスコアは大きいほど作業負荷が高いことを示し，SUS のスコアは大きいほどユーザビリティが高いことを示す．実験に用いたアンケートおよびその説明は付録に掲載する（付録 A.1，付録 A.4，および付録 A.5）．

8.3 実験手順

実験参加者は，HMD を装着した後，SteamVR にて正面姿勢および視線のキャリブレーションを行う．その後，実験アプリケーション（Unity のデバックモード）へ移行し，黒色のオ

オブジェクトを選択することによってタスクを開始する。タスクが開始されると、表示されているターゲット群の中からランダムに1個が青色となり、青色となったターゲットを可能な限り高速かつ正確に選択する。ターゲットを選択した時、実験アプリケーションはそのターゲットを緑色にすることにより視覚的にユーザへ選択の成功を通知し、かつ正しいターゲットを選択した場合、および間違ったターゲットを選択した場合にはそれぞれの効果音によって聴覚的にユーザに通知する。正しいターゲットを選択した後、青色のオブジェクトが緑色を経由して白色に戻るため、再度黒色のオブジェクトを選択することにより、次のターゲット選択に移行する。黒色のオブジェクトを選択してから青色のターゲットを選択するまでを1タスクとして、計25回繰り返す。なお、同じターゲットを複数回ポインティングの対象となることはなく、ターゲット群の全てのターゲットを1回ずつ選択することになる。規定回数のタスクが完了した時、実験アプリケーションはオブジェクトを全て緑色に変化させ、かつ効果音により、実験参加者へタスクの終了を知らせる。規定回数のタスクが完了する度に、NASA-TLX、SUS および自由記述式アンケートを行う。この時、HMDを外すと再度キャリブレーションを行う必要があるため、デスクトップのミラーリング機能を用いてVR上にて回答する。自由記述式アンケートに関しても、インタビュー形式にて回答する。

8.4 結果

独立変数はポインティング手法であり、従属変数はWPM、エラー率、NASA-TLXの平均スコア、およびSUSの平均スコアである。分析には、データが正規分布に従っているかどうかを確認するためにShapiro-Wilk検定 [SW65] を行った後に一元配置分散分析 [How02] を用いており、事後多重比較にはTukeyのHSD検定 [Tuk49] を用いた。なお検定に用いた有意水準は5%である。なお、図8.2、図8.3、図8.4、および図8.5中に示すエラーバーは標準偏差を表す。

8.4.1 タスク完了時間

各手法における平均タスク完了時間を図8.2に示す。

各手法のタスク完了時間の平均は、BGCにおいて116.98秒 (SD=76.19)、密集BGCにおいて77.62秒 (SD=43.35)、累積BGCにおいて90.57秒 (SD=28.78)、およびBGC+RCにおいて84.89秒 (SD=45.59) である。Shapiro-Wilk検定の結果、全ての手法においてデータが正規分布に従っていなかったため、一元配置分散分析を分析に用いることができない。そのため、分析には一元配置分散分析ではなくクラスカル・ウォリス検定 [KW52] を用いた。その結果、条件間には有意な主効果は存在しなかった ($p = 0.0623 > 0.05$)。

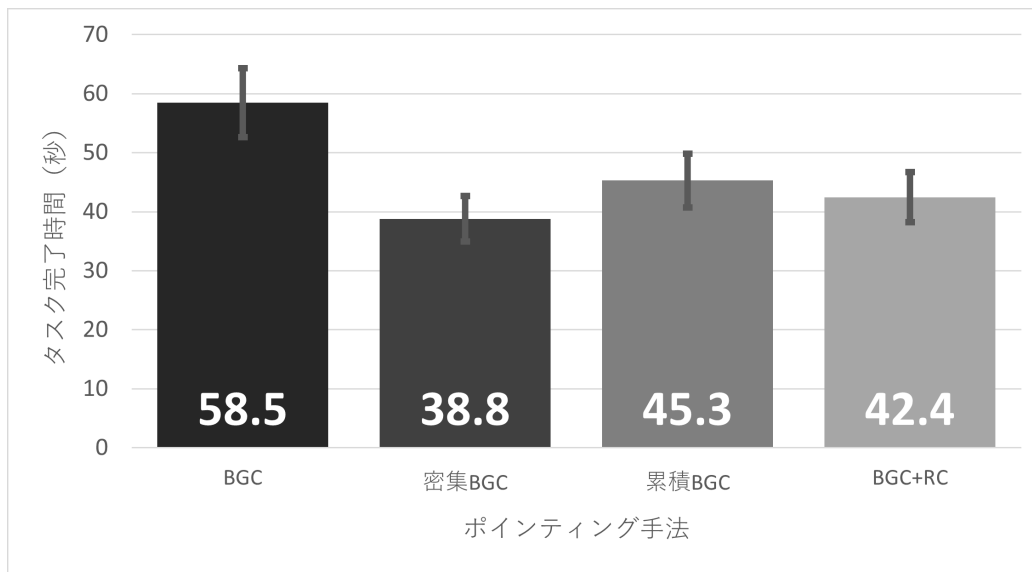


図 8.2: 各手法におけるタスク完了時間.

8.4.2 エラー率

各手法におけるエラー率を図 8.3 に示す.

各手法のタスク完了時間の平均は、BGC において 116.98 (SD=76.19), 密集 BGC において 77.62 (SD=43.35), 累積 BGC において 90.57 (SD=28.78), および BGC+RC において 84.89 (SD=45.59) である. 分析の結果, 条件間には有意な主効果は存在しなかった ($p = 0.1476 > 0.05$).

8.4.3 NASA-TLX

各手法における NASA-TLX の平均スコアを図 8.4 に示す.

各手法の NASA-TLX の平均スコアは、BGC において 58.25 (SD=19.50), 密集 BGC において 53.33 (SD=24.38), 累積 BGC において 50.25 (SD=21.46), および BGC+RC において 50.33 (SD=22.30) である. 分析の結果, 条件間には有意な主効果は存在しなかった ($p = 0.8924 > 0.05$).

8.4.4 SUS

各手法における SUS の平均スコアを図 8.5 に示す.

各手法の SUS の平均スコアは、BGC において 69.69 (SD=14.76), 密集 BGC において 64.38 (SD=21.61), 累積 BGC において 77.5 (SD=14.84), および BGC+RC において 80.94 (SD=13.86) である. 分析の結果, 条件間には有意な主効果は存在しなかった ($p = 0.2539 > 0.05$).

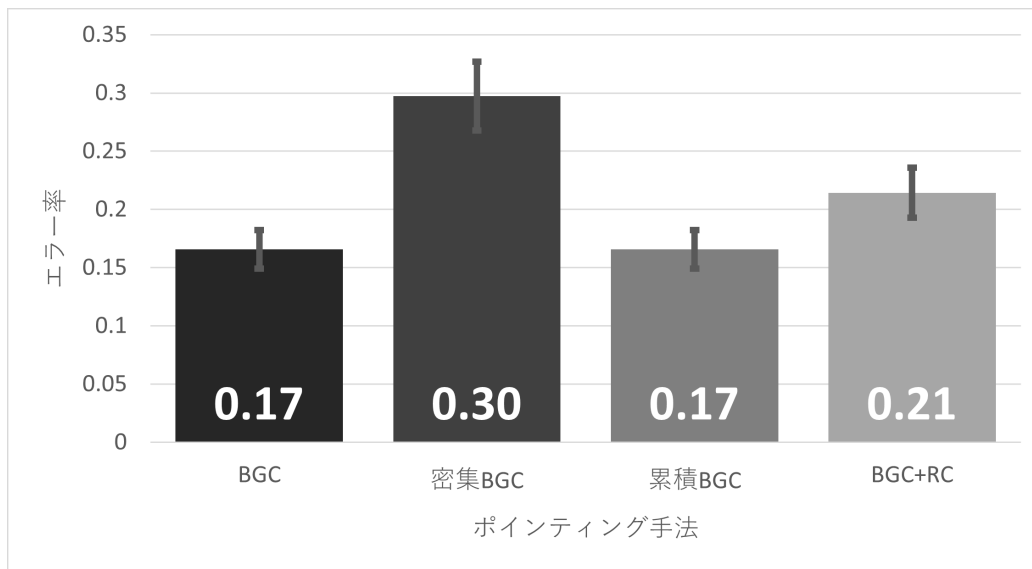


図 8.3: 各手法におけるエラー率.

8.5 考察

タスク完了時間については、注視時間の動的化を行った手法全てが行っていない手法よりも短くなり、密集 BGC が最も短い結果となった。この要因としては、注視時間の動的化が総じて注視時間を短くする方向に作用したためと考えられる。

エラー率については、BGC および累積 BGC が最も低くなった。この要因としては、前述したように注視時間の動的化が注視時間を短縮する方向に作用したことにより、意図しないターゲットに視線を向けた際、その視線を別のターゲットに逸らす前に選択状態になったためと考えられる。特に密集 BGC は、最もポインティング速度が速い一方、その速度に寄与している注視時間の短縮が過剰に行われたために最もエラー率が高くなったと考えられる。

NASA-TLX の平均スコアについては、有意差が無いほど僅差ではあるが累積 BGC および BGC+RC が最も低くなった。この要因としては、密集 BGC がその注視時間の短さからユーザの主観として扱いづらく、累積 BGC および BGC+RC は注視時間の短縮度合いが適当であり扱いやすかったためと考えられる。

SUS の平均スコアについては、BGC+RC が最も高くなった。この要因としては、NASA-TLX の平均スコアと同じく、BGC+RC は注視時間の短縮度合いが適当であり扱いやすかったためと考えられる。そのため、BGC+RC の次には累積 BGC が高くなっている。また、NASA-TLX の平均スコアと同じく、注視時間の短さからユーザの主観として扱いづらいために、密集 BGC の平均スコアは BGC より低くなったと考えられる。SUS はユーザビリティを評価する指標であるため、ユーザが密集 BGC に対して抱いた扱いづらさが NASA-TLX より顕著に表れたものと考えられる。

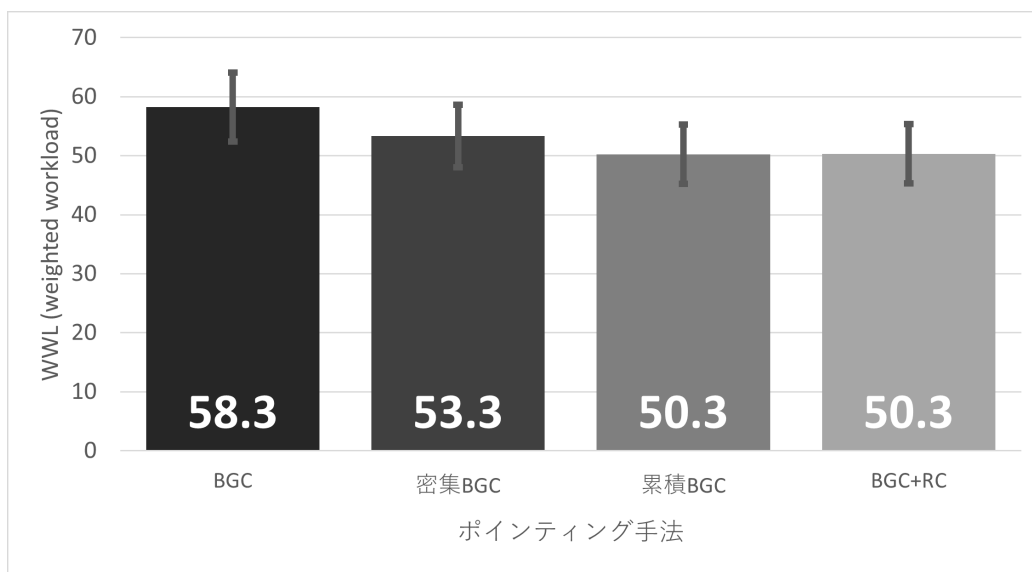


図 8.4: 各手法における平均 NASA-TLX スコア.

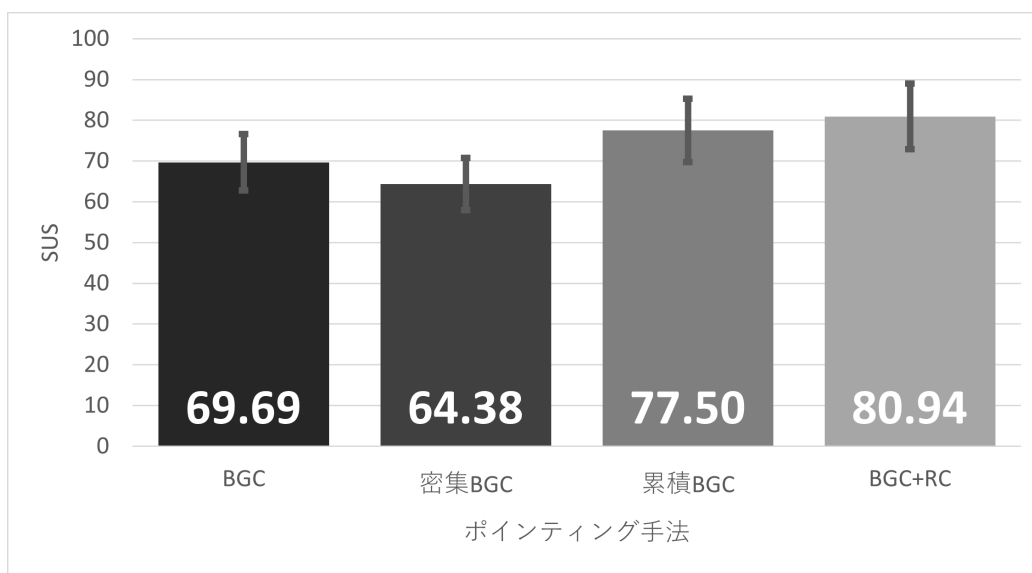


図 8.5: 各手法における平均 SUS スコア.

第9章 議論

本章では実験の結果に基づいて、注視時間の動的化の基準時間、および Bubble Gaze Cursor の仕組みについて議論する。その後、今後の展望を述べる。

9.1 注視時間の動的化の基準時間

実験2において、基準とした注視時間は600msであり、その時間を各手法により動的化していた。しかし、それによってさらに注視時間が短縮されたことにより、全体的なポインティング性能は向上した一方、ミダスタッチによりエラーも増加した。そのため、動的化に適した基準時間を新たに調査する必要がある。また、動的化による注視時間の下限を設定するために、ユーザがターゲットから別のターゲットへ視線を移動させる際に必要とする時間を調査する必要もある。

9.2 Bubble Gaze Cursor の仕組み

本研究にて提案した手法における Bubble Gaze Cursor は、各ターゲットの中心と視線までの距離を算出するという仕組みである。しかし、他のアプローチとして、各ターゲットの中心とユーザの頭部を結ぶ直線と視線が成す角度を算出するという仕組みも考えられる(図9.1)。このアプローチにおいては、ターゲットの奥行き情報が活かされるため、オクルージョン条件下におけるポインティング性能の向上に繋がる可能性がある。そのため、提案手法と比較する形にて、実験1および実験2のように各ターゲットがユーザから同じ距離に存在する場合のポインティング性能および各ターゲットがユーザから異なる距離に存在する場合のポインティング性能を調査する必要がある。

9.3 今後の展望

実験1により提案手法が各ターゲットが散逸している環境においてVR環境において最も一般的なポインティング手法であるRCと同等のポインティング性能があることは明らかになったが、実際のVR環境において常にあのようにターゲットが配置されることはなく、実験2のように密集していたり手前のターゲットに奥のターゲットが隠れてしまったりといった、ポインティングがより困難となる状況が想定される。そのような状況においてもRCと同等のポインティング性能があるかについて調査を行う。

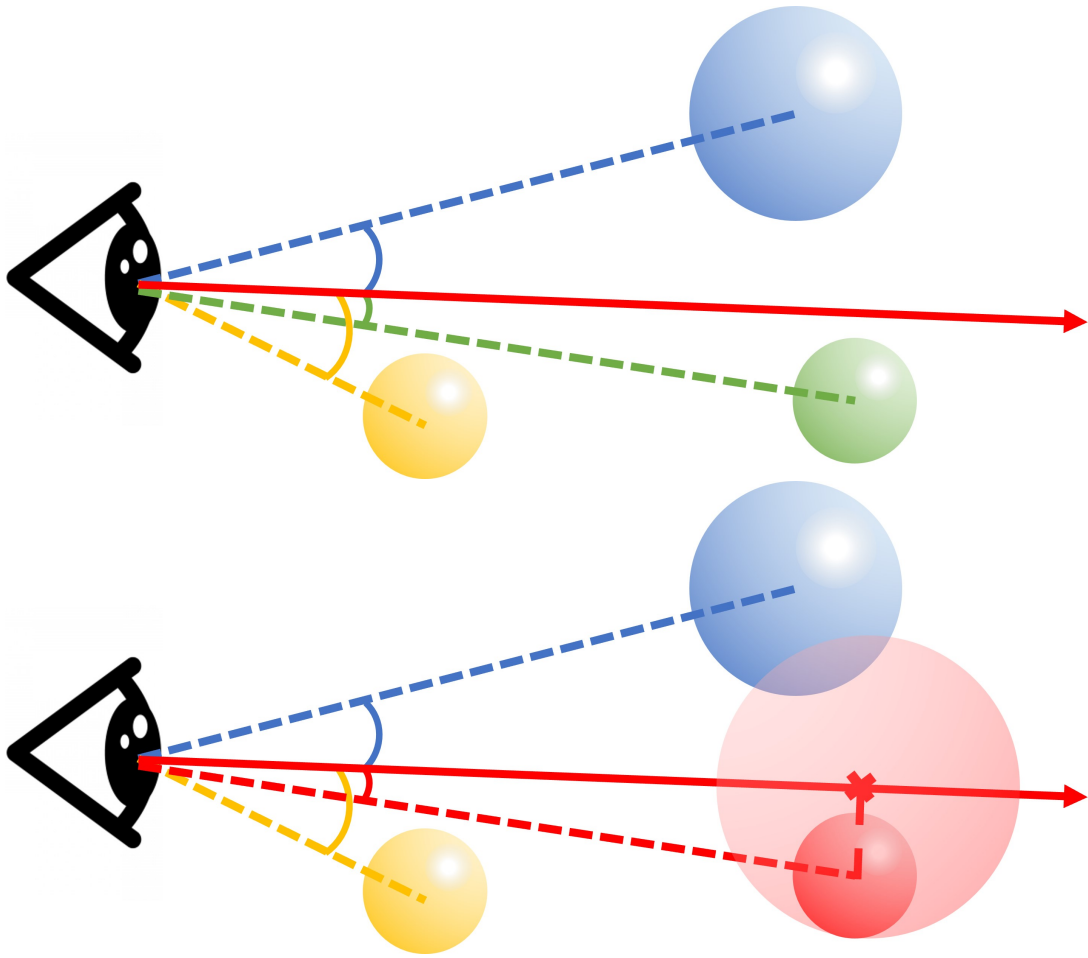


図 9.1: 各ターゲットの中心とユーザの頭部を結ぶ直線と視線が成す角度を用いた Bubble Gaze Cursor の例. 算出した角度 (上) 中で最も小さな角度を成したターゲットを視線に最も近いターゲットとする (下).

さらに、前述した注視時間の動的化の基準時間の設定および新たなアプローチにより提案手法のポインティング性能をさらに向上させ、それについて新たに比較実験を行う。

第10章 おわりに

我々は、VR環境向けの視線インタフェースを用いた視線ポインティングを高速化する手法を実装した。本手法は、各ターゲットの中心と視線までの距離が最も近いターゲットを注視状態とする Bubble Gaze Cursor およびサッケード運動の影響を軽減するための移動平均フィルタにより構成されている。この移動平均フィルタの有無および最適な注視時間を予備実験により調査した後に、実験Iを行い、本手法がコントローラを用いたレイキャスト手法と同等の性能を発揮すること、およびその性能がターゲットの大きさに左右されないことを明らかにした。また、注視時間の動的化によるさらなるポインティング速度の高速化を行い、実験IIを通してさらに高速化できることを明らかにした。しかし、動的化の手法によってはエラー率が高くなってしまったため、基準となる注視時間の調査、および注視時間の動的化の下限の調査を行う必要があると考える。

謝辞

本研究を進めるにあたり、志築文太郎先生、高橋伸先生、川口一画先生には多大なご意見とご指導を頂きました。心から感謝いたします。特に、主指導教員である志築文太郎先生には、研究の進め方、論文執筆、発表の方法といった研究に関することのみならず、日常生活における研究者の心構えなど多岐に渡るご指導を頂きました。先生の熱心なご指導のおかげで、これまでの研究成果の発表および本論文の執筆ができました。ここに深く感謝の意を表します。

インタラクティブプログラミング研究室の後輩、同輩、先輩方には研究生生活においてお世話になりました。特に WAVE チームの皆様には、チームゼミにおけるご意見や論文の添削といった研究に関する多くのご支援に加えて、研究室においても研究の進め方や研究生生活について多くのご助言を頂きました。研究室の皆様のおかげで、4年間充実した研究生生活を送ることができました。深く感謝いたします。

また、本研究は科学研究費助成事業 21H03472 [KAK21] の助成を受けたものです。

最後に、学生生活においてお世話になった皆様、そして、私の学生生活を支えて頂いた家族に深く感謝を申し上げます。

参考文献

- [ADS05] Michael Ashmore, Andrew T. Duchowski, and Garth Shoemaker. Efficient Eye Pointing with a Fisheye Lens. In *Proceedings of Graphics Interface 2005*, GI '05, pp. 203–210, Waterloo, CAN, 2005. Canadian Human-Computer Communications Society.
- [Bro96] John Brooke. SUS‘A quick and dirty’ usability scale. *Usability Evaluation in Industry*, 1996.
- [Bro04] John Brooke. The role of fixational eye movements in visual perception. *Usability Evaluation in Industry*, Vol. 5, No. 3, pp. 229–240, 2004.
- [Cor19] HTC Corporation. VIVE Pro Eye 概要 — VIVE 日本. <https://www.vive.com/jp/product/vive-pro-eye/specs/>, 2019. (2023 年 1 月 10 日閲覧) .
- [CSD03] Nathan Cournia, John D. Smith, and Andrew T. Duchowski. Gaze- vs. Hand-Based Pointing in Virtual Environments. In *CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '03, pp. 772–773, New York, NY, USA, 2003. Association for Computing Machinery.
- [CSO22] Myunguen Choi, Daisuke Sakamoto, and Tetsuo Ono. Kuiper Belt: Utilizing the “Out-of-Natural Angle” Region in the Eye-Gaze Interaction for Virtual Reality. In *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '22, pp. 1–17, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [dSeSS09] Adriana de Souza e Silva and Daniel. M. Sutko. *Digital Cityscapes: Merging Digital and Urban Playspaces*. Peter Lang, 2009.
- [GB05] Tovi Grossman and Ravin Balakrishnan. The Bubble Cursor: Enhancing Target Acquisition by Dynamic Resizing of the Cursor’s Activation Area. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '05, pp. 281–290, New York, NY, USA, 2005. Association for Computing Machinery.
- [Goo17] Google. Google Earth VR. <https://arvr.google.com/earth/>, 2017. (2021 年 2 月 19 日閲覧) .

- [How02] David Howell. *Statistical Methods for Psychology*. Duxbury, 2002.
- [HS88] Sandra G. Hart and Lowell E. Staveland. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In Peter A. Hancock and Najmedin Meshkati, editors, *Human Mental Workload*, Vol. 52 of *Advances in Psychology*, pp. 139–183. North-Holland, 1988.
- [HY18] Julia Hayes and Kyungjin Yoo. Virtual Reality Interactivity in a Museum Environment. In *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '18*, pp. 1–2, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [Jac91] Robert J. K. Jacob. The Use of Eye Movements in Human-Computer Interaction Techniques: What You Look at is What You Get. *ACM Trans. Inf. Syst.*, Vol. 9, No. 2, pp. 152–169, apr 1991.
- [JRF⁺20] Hans-Christian Jetter, Roman Rädle, Tiare Feuchtner, Christoph Anthes, Judith Friedl, and Clemens Nylandsted Klokmoose. “In VR, Everything is Possible!”: Sketching and Simulating Spatially-Aware Interactive Spaces in Virtual Reality. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '20*, pp. 1–16, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [KAK21] KAKEN. KAKEN — 研究課題をさがす — ハンズフリーインタラクションを実現する高速かつ低負荷な視線インタフェース. <https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-21H03472/>, 2021. (2023年1月10日閲覧) .
- [KB95] Paul Kabbash and William A. S. Buxton. The “Prince” Technique: Fitts’ Law and Selection Using Area Cursors. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '95*, p. 273–279, USA, 1995. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [KOAB18] Mohamed Khamis, Carl Oechsner, Florian Alt, and Andreas Bulling. VRpursuits: Interaction in Virtual Reality Using Smooth Pursuit Eye Movements. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Advanced Visual Interfaces, AVI '18*, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [KW52] William H. Kruskal and W. Allen Wallis. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 47, No. 260, pp. 583–621, 1952.
- [IC75] Ya lun Chou. *Statistical Analysis*. Holt International, 1975.

- [Lik32] Rensis Likert. *A Technique for the Measurement of Attitudes*. Archives of Psychology 140, 1932.
- [LYS20] Yiqin Lu, Chun Yu, and Yuanchun Shi. Investigating Bubble Mechanism for Ray-Casting to Improve 3D Target Acquisition in Virtual Reality. In *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 35–43, 2020.
- [Mac92] I. Scott MacKenzie. Fitts' Law as a Research and Design Tool in Human-Computer Interaction. *Human-Computer Interaction*, Vol. 7, No. 1, pp. 91–139, 1992.
- [MB02] Michael McGuffin and Ravin Balakrishnan. Acquisition of Expanding Targets. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '02*, pp. 57–64, New York, NY, USA, 2002. Association for Computing Machinery.
- [MSAH08] Julio C. Mateo, Javier San Agustin, and John Paulin Hansen. Gaze Beats Mouse: Hands-Free Selection by Combining Gaze and Emg. In *CHI '08 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '08*, pp. 3039–3044, New York, NY, USA, 2008. Association for Computing Machinery.
- [MvM04] Darius Miniotas, Oleg Špakov, and I. Scott MacKenzie. Eye Gaze Interaction with Expanding Targets. In *CHI '04 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '04*, pp. 1255–1258, New York, NY, USA, 2004. Association for Computing Machinery.
- [MYA⁺19] Nathan Moore, Soojeong Yoo, Naseem Ahmadpour, Russel Tommy, Martin Brown, and Philip Poronnik. ALS-SimVR: Advanced Life Support Virtual Reality Training Application. In *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '19*, pp. 1–2, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [Ocu19] Oculus. Thumbs Up: Hand Tracking On Oculus Quest This Week. <https://www.oculus.com/blog/thumbs-up-hand-tracking-now-available-on-oculus-quest/>, 2019. (2021 年 2 月 19 日閱覽) .
- [OMS⁺22] Ryoya Onishi, Tao Morisaki, Shun Suzuki, Saya Mizutani, Takaaki Kamigaki, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. GazeBreath: Input Method Using Gaze Pointing and Breath Selection. In *Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2022, AHs '22*, pp. 1–9, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.

- [PAC⁺15] Ken Pfeuffer, Jason Alexander, Ming Ki Chong, Yanxia Zhang, and Hans Gellersen. Gaze-Shifting: Direct-Indirect Input with Pen and Touch Modulated by Gaze. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, UIST '15, pp. 373–383, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [PACG14] Ken Pfeuffer, Jason Alexander, Ming Ki Chong, and Hans Gellersen. Gaze-Touch: Combining Gaze with Multi-Touch for Interaction on the Same Surface. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, pp. 509–518, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [Pau54] Paul Morris Fitts. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 47, pp. 381–391, 1954.
- [Pla22] Meta Platforms. Meta Quest Pro: 高品質の MR — Meta Store. <https://www.meta.com/jp/quest/quest-pro/>, 2022. (2023 年 1 月 10 日閲覧) .
- [PLLB17] Thammathip Piumsomboon, Gun Lee, Robert W. Lindeman, and Mark Billinghurst. Exploring natural eye-gaze-based interaction for immersive virtual reality. In *2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 36–39, 2017.
- [PMMG17] Ken Pfeuffer, Benedikt Mayer, Diako Mardanbegi, and Hans Gellersen. Gaze + Pinch Interaction in Virtual Reality. In *Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction*, SUI '17, pp. 99–108, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [RGCSG21] Argenis Ramirez Ramirez Gomez, Christopher Clarke, Ludwig Sidenmark, and Hans Gellersen. Gaze+Hold: Eyes-Only Direct Manipulation with Continuous Gaze Modulated by Closure of One Eye. In *ACM Symposium on Eye Tracking Research and Applications*, ETRA '21 Full Papers, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [RH17] Joan Sol Roo and Martin Hachet. One Reality: Augmenting How the Physical World is Experienced by Combining Multiple Mixed Reality Modalities. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, pp. 787–795, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [RR12] Hakon Raudsandmoen and Borge Rodsjo. Empirically Based Design Guidelines for Gaze Interaction in Windows 7. In *Proceedings of the 7th International Conference on Multimodal Interfaces*, p. 202. Retrieved from, 2012.

- [SCZ⁺20] Ludwig Sidenmark, Christopher Clarke, Xuesong Zhang, Jenny Phu, and Hans Gellersen. Gaze-Assisted Selection of Occluded Objects in Virtual Reality. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, pp. 1–13, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [SG19] Ludwig Sidenmark and Hans Gellersen. Eye&Head: Synergetic Eye and Head Movement for Gaze Pointing and Selection. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, pp. 1161–1174, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [SMFH10] Henrik Skovsgaard, Julio C. Mateo, John M. Flach, and John Paulin Hansen. Small-Target Selection with Gaze Alone. In *Proceedings of the 2010 Symposium on Eye-Tracking Research & Applications*, ETRA '10, pp. 145–148, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.
- [SPBG21] Ludwig Sidenmark, Dominic Potts, Bill Bapisch, and Hans Gellersen. Radi-Eye: Hands-Free Radial Interfaces for 3D Interaction Using Gaze-Activated Head-Crossing. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [SW65] Samuel S. Shapiro and M. B. Wilk. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, Vol. 52, pp. 591–611, 1965.
- [Tuk49] John W. Tukey. Comparing individual means in the analysis of variance. *Biometrics*, Vol. 5 2, pp. 99–114, 1949.
- [vM05] Oleg Špakov and Darius Miniotas. Gaze-Based Selection of Standard-Size Menu Items. In *Proceedings of the 7th International Conference on Multimodal Interfaces*, ICMI '05, pp. 124–128, New York, NY, USA, 2005. Association for Computing Machinery.
- [WWBH97] Aileen Worden, Nef Walker, Krishna Bharat, and Scott Hudson. Making Computers Easier for Older Adults to Use: Area Cursors and Sticky Icons. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '97, p. 266–271, New York, NY, USA, 1997. Association for Computing Machinery.
- [ZCBLG03] Shumin Zhai, Stéphane Conversy, Michel Beaudouin-Lafon, and Yves Guiard. Human On-Line Response to Target Expansion. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '03, pp. 177–184, New York, NY, USA, 2003. Association for Computing Machinery.

- [ZMI99] Shumin Zhai, Carlos Morimoto, and Steven Ihde. Manual and Gaze Input Cascaded (MAGIC) Pointing. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '99, pp. 246–253, New York, NY, USA, 1999. Association for Computing Machinery.
- [ZXZZ11] Xinyong Zhang, Pianpian Xu, Qing Zhang, and Hongbin Zha. Speed-Accuracy Trade-off in Dwell-Based Eye Pointing Tasks at Different Cognitive Levels. In *Proceedings of the 1st International Workshop on Pervasive Eye Tracking & Mobile Eye-Based Interaction*, PETMEI '11, pp. 37–42, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [夏目 23] 夏目達也, 内村裕也, クリスチャン アルサーテクルツ, 柴田史久, 木村朝子. Vr空間操作コマンドとしてのアイジェスチャ ui の特性分析. *情報処理学会論文誌*, Vol. 64, No. 2, pp. 312–325, 02 2023.
- [岩田 20] 岩田洋夫. 「元年」か 20 周年か? *日本バーチャルリアリティ学会誌*, Vol. 25, No. 1, pp. 6–7, 2020.
- [辻下 17] 辻下守弘. バーチャルリアリティ (VR) 技術を用いた高齢者のリハビリテーションに関する文献的研究. 第 7 巻, pp. 75–81. 奈良学園大学, 2017.
- [藤原 22] 藤原智宏, 金成慧, 佐藤美恵. AR におけるバブルカーソルを用いた視線入力に関する検討. *Technical Report 6*, 宇都宮大学大学院地域創生科学研究科, 宇都宮大学工学部, 宇都宮大学工学部, jun 2022.
- [日本 99] 日本規格協会. 統計 – 用語と記号 – 第 1 部: 確率及び一般統計用語 2.61 t 検定. <http://kikakurui.com/z8/Z8101-1-1999-01.html>, 1999. (2023 年 1 月 10 日閲覧) .
- [日本 11] 日本バーチャルリアリティ学会. バーチャルリアリティ学. 工業調査会, 2011.
- [日本 17] 日本 HP. OMEN by HP 17-an000 シリーズ (Directplus モデル) . https://jp.ext.hp.com/content/dam/jp-ext-hp-com/jp/ja/ec/lib/products/portables/personal/spec_pdf/omen17_an000_d.pdf/, 2017. (2023 年 1 月 10 日閲覧) .
- [日本 21] 日本 HP. OMEN 16-c0000jp シリーズ (2021 年 9 月発表) - ゲーミングパソコン – 日本 HP. https://jp.ext.hp.com/content/dam/jp-ext-hp-com/jp/ja/ec/lib/products/portables/personal/spec_pdf/omen_16_c.pdf/, 2021. (2023 年 1 月 10 日閲覧) .
- [芳賀 96] 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. *人間工学*, Vol. 32, No. 2, pp. 71–79, 1996.

- [蜂巢 14] 蜂巢健一. 次世代ナチュラルユーザインタフェース『視線入力』. 映像情報メディア学会誌, Vol. 68, No. 8, pp. 636–641, 2014.
- [立崎 21] 立崎雄大, 中村喜宏. 5つのキーを用いた視線による文字入力方法の検討. 第83回全国大会講演論文集, 第2021巻, pp. 261–262, mar 2021.
- [崔明 20] 崔明根, 坂本大介, 小野哲雄. Bubble Gaze Cursor : バブルカーソル法の視線操作への適用. 情報処理学会論文誌, Vol. 61, No. 2, pp. 221–232, feb 2020.
- [崔明 23] 崔明根, 坂本大介, 小野哲雄. Kuiper Belt : VRにおける自然ではない視線角度を用いた視線入力手法の提案. 情報処理学会論文誌, Vol. 64, No. 2, pp. 400–416, 02 2023.

著者論文リスト

本論文に関する論文および発表

- 査読なし国内会議論文

1. 平井李音, 富永浩暉, 横山海青, 志築文太郎. VR 環境向けの視線を用いた 3 次元バブルカーソルの提案. 第 29 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2021), 日本ソフトウェア科学会, 2 pages, December 2021.
2. 平井李音, 鈴木健介, 山口泰生, 志築文太郎. VR 環境向けの焦点座標を用いた 3 次元バブルカーソルの評価. 第 30 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2022), 日本ソフトウェア科学会, 2 pages, December 2022.

付録A 実験におけるアンケート

実験参加者情報

* 必須の質問です

1. 参加者ID *

2. 名前 *

3. 年齢 *

4. 性別 *

1つだけマークしてください。

男性

女性

回答しない

その他: _____

5. マウスの使用経験 *

1つだけマークしてください。

- 1 (全く使わない)
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7 (日常的に使う)

6. VRの使用経験 *

1つだけマークしてください。

- 1 (全く使わない)
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7 (日常的に使う)

7. 視線インタフェースの使用経験 *

1つだけマークしてください。

- 1 (全く使わない)
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7 (日常的に使う)

NASA-TLXアンケート

説明に従って0～100までの値を入力してください

* 必須の質問です

1. 名前 *

フルネームをお願いします

2. 使用手法 *

1つだけマークしてください。

- BGC
- レイキャスト（視線）
- レイキャスト（コントローラー）

3. タスク条件 *

1つだけマークしてください。

- 大
- 中
- 小

4. 知的・知覚的要求 *

どの程度の知的・知覚的活動（考える，決める，計算する，記憶する，見るなど）を必要としましたか。課題はやさしかったですか難しかったですか，単純でしたか複雑でしたか，正確さが求められましたか大雑把でよかったですか（必要としたほど大きな数字）

5. 身体的要求 *

どの程度の身体的活動（押す，引く，回す，制御する，動き回るなど）を必要としましたか。作業はラクだったかキツかったですか，ゆっくりできましたかキビキビやらなければなりませんでしたが，休み休みできましたか働きづめでしたか（必要としたほど大きな数字）

6. タイムプレッシャー *

仕事のペースや課題が発生する頻度のために感じる時間的切迫感はどの程度でしたか。ペースはゆっくりとして余裕があるものでしたか，それとも早くて余裕がないものでしたか（切迫感が強いほど大きな数字）

7. 作業成績 *

実験者によって設定された課題の目標をどの程度達成できたと思いますか。目標の達成に関して自分の作業成績にどの程度満足していますか（満足しているほど小さな数字）

8. 努力 *

作業成績のレベルに達成・維持するために，精神的・身体的にどの程度一生懸命に作業しなければなりませんでしたが（一生懸命なほど大きな数字）

9. フラストレーション *

作業中に，不安感，落胆，いらいら，ストレス，悩みをどの程度感じましたか。あるいは逆に，安心感，満足感，充足感，楽しさ，リラックスをどの程度感じましたか（強く感じたほど大きな数字）

タスクのワークロード(作業負荷)へのより重要な要因

10. より重要な要因は？ (1/15) *

1つだけマークしてください。

フラストレーション

努力

11. より重要な要因は？ (2/15) *

1つだけマークしてください。

努力

作業成績

12. より重要な要因は？ (3/15) *

1つだけマークしてください。

身体的要求

フラストレーション

13. より重要な要因は？ (4/15) *

1つだけマークしてください。

身体的要求

タイムプレッシャー

14. より重要な要因は？ (5/15) *

1つだけマークしてください。

タイムプレッシャー

努力

15. より重要な要因は？ (6/15) *

1つだけマークしてください。

- 努力
- 身体的要求

16. より重要な要因は？ (7/15) *

1つだけマークしてください。

- 作業成績
- 知的・知覚的要求

17. より重要な要因は？ (8/15) *

1つだけマークしてください。

- フラストレーション
- 知的・知覚的要求

18. より重要な要因は？ (9/15) *

1つだけマークしてください。

- 知的・知覚的要求
- 努力

19. より重要な要因は？ (10/15) *

1つだけマークしてください。

- タイムプレッシャー
- 知的・知覚的要求

20. より重要な要因は？ (11/15) *

1つだけマークしてください。

知的・知覚的要求

身体的要求

21. より重要な要因は？ (12/15) *

1つだけマークしてください。

タイムプレッシャー

フラストレーション

22. より重要な要因は？ (13/15) *

1つだけマークしてください。

身体的要求

作業成績

23. より重要な要因は？ (14/15) *

1つだけマークしてください。

作業成績

フラストレーション

24. より重要な要因は？ (15/15) *

1つだけマークしてください。

作業成績

タイムプレッシャー

System Usability Scaleアンケート

回答する数値は5に近づくほど「そう思う」、反対に1に近づくほど「全く思わない」を意味します

* 必須の質問です

1. 名前 *

フルネームをお願いします

2. 使用手法 *

1つだけマークしてください。

- BGC
- レイキャスト (視線)
- レイキャスト (コントローラ)

3. タスク条件

1つだけマークしてください。

- 大
- 中
- 小

4. このシステムをしばしば使いたいと思う *

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5

全く そう思う

5. このシステムは不必要なほど複雑であると感じた *

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5
全く そう思う

6. このシステムは容易に使えると思った *

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5
全く そう思う

7. このシステムを使うのに技術専門家のサポートを必要とするかもしれない *

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5
全く そう思う

8. このシステムにある様々な機能が良くまとまっていると感じた *

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5
全く そう思う

9. このシステムでは、一貫性のない所が多くあったと思った *

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5
全く そう思う

10. 大抵のユーザは、このシステムの使用方法について、素早く学べるだろう *

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5
全く そう思う

11. このシステムはとても使いにくいと思った *

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5
全く そう思う

12. このシステムを利用できる自信がある *

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5
全く そう思う

13. このシステム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 *

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5

全く そう思う

14. 自由記述欄

実験実施者が記入するので、口頭にて回答してください。

このコンテンツは Google が作成または承認したものではありません。

Google フォーム

NASA-TLXアンケート

説明に従って0~100までの値を入力してください

* 必須の質問です

1. 名前 *

フルネームをお願いします

2. 使用手法 *

1つだけマークしてください。

BGC

BGC (累計)

BGC (レイ)

BGC (密集)

3. 知的・知覚的要求 *

どの程度の知的・知覚的活動（考える，決める，計算する，記憶する，見るなど）を必要としましたか。課題はやさしかったですか難しかったですか，単純でしたか複雑でしたか，正確さが求められましたか大雑把でよかったですか（必要としたほど大きな数字）

4. 身体的要求 *

どの程度の身体的活動（押す，引く，回す，制御する，動き回るなど）を必要としましたか。作業はラクだったかキツかったですか，ゆっくりできましたかキビキビやらなければなりませんでしたが，休み休みできましたか働きづめでしたか（必要としたほど大きな数字）

5. タイムプレッシャー *

仕事のペースや課題が発生する頻度のために感じる時間的切迫感はどの程度でしたか。ペースはゆっくりとして余裕があるものでしたか、それとも早くて余裕がないものでしたか（切迫感が強いほど大きな数字）

6. 作業成績 *

実験者によって設定された課題の目標をどの程度達成できたと思いますか。目標の達成に関して自分の作業成績にどの程度満足していますか（満足しているほど小さな数字）

7. 努力 *

作業成績のレベルに達成・維持するために、精神的・身体的にどの程度一生懸命に作業しなければなりませんでしたか（一生懸命なほど大きな数字）

8. フラストレーション *

作業中に、不安感、落胆、いらいら、ストレス、悩みをどの程度感じましたか。あるいは逆に、安心感、満足感、充足感、楽しさ、リラックスをどの程度感じましたか（強く感じたほど大きな数字）

タスクのワークロード(作業負荷)へのより重要な要因

9. より重要な要因は？ (1/15) *

1つだけマークしてください。

フラストレーション

努力

10. より重要な要因は？ (2/15) *

1つだけマークしてください。

- 努力
- 作業成績

11. より重要な要因は？ (3/15) *

1つだけマークしてください。

- 身体的要求
- フラストレーション

12. より重要な要因は？ (4/15) *

1つだけマークしてください。

- 身体的要求
- タイムプレッシャー

13. より重要な要因は？ (5/15) *

1つだけマークしてください。

- タイムプレッシャー
- 努力

14. より重要な要因は？ (6/15) *

1つだけマークしてください。

- 努力
- 身体的要求

15. より重要な要因は？ (7/15) *

1つだけマークしてください。

- 作業成績
- 知的・知覚的要求

16. より重要な要因は？ (8/15) *

1つだけマークしてください。

- フラストレーション
- 知的・知覚的要求

17. より重要な要因は？ (9/15) *

1つだけマークしてください。

- 知的・知覚的要求
- 努力

18. より重要な要因は？ (10/15) *

1つだけマークしてください。

- タイムプレッシャー
- 知的・知覚的要求

19. より重要な要因は？ (11/15) *

1つだけマークしてください。

- 知的・知覚的要求
- 身体的要求

20. より重要な要因は？ (12/15) *

1つだけマークしてください。

- タイムプレッシャー
- フラストレーション

21. より重要な要因は？ (13/15) *

1つだけマークしてください。

- 身体的要求
- 作業成績

22. より重要な要因は？ (14/15) *

1つだけマークしてください。

- 作業成績
- フラストレーション

23. より重要な要因は？ (15/15) *

1つだけマークしてください。

- 作業成績
- タイムプレッシャー

このコンテンツは Google が作成または承認したものではありません。

Google フォーム

System Usability Scaleアンケート

回答する数値は5に近づくほど「そう思う」、反対に1に近づくほど「全く思わない」を意味します

* 必須の質問です

1. 名前 *

フルネームをお願いします

2. 使用手法 *

1つだけマークしてください。

BGC (フィルター)

BGC (累計)

BGC (レイ)

BGC (密集)

3. このシステムをしばしば使いたいと思う *

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5

全く そう思う

4. このシステムは不必要なほど複雑であると感じた *

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5

全く そう思う

5. このシステムは容易に使えると思った *

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5
全く そう思う

6. このシステムを使うのに技術専門家のサポートを必要とするかもしれない *

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5
全く そう思う

7. このシステムにある様々な機能が良くまとまっていると感じた *

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5
全く そう思う

8. このシステムでは、一貫性のない所が多くあったと思った *

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5
全く そう思う

9. 大抵のユーザは、このシステムの使用方法について、素早く学べるだろう *

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5
全く そう思う

10. このシステムはとても使いにくいと思った *

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5
全く そう思う

11. このシステムを利用できる自信がある *

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5
全く そう思う

12. このシステム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 *

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5
全く そう思う

13. 自由記述欄

実験実施者が記入するので、口頭にて回答してください。

このコンテンツは Google が作成または承認したものではありません。

Google フォーム