筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

卒業研究論文

視線によるレイの方向制御およびコントローラによる動的伸縮を併用したAR空間内における仮想オブジェクト操作手法

石橋 遼

指導教員　川口 一画，志築 文太郎

2023年2月

概要

AR 空間内に配置された仮想オブジェクトを操作する時，ターゲットが他の仮想オブジェクトに一部遮蔽あるいは完全に遮蔽される事によりオクルージョン問題が生じる．また，AR 空間での仮想オブジェクト操作には一般的にハンドレイ操作が用いられるが，ユーザは操作を行うために HMD デバイスのハンドトラッキング範囲内に腕を上げ続ける必要があり，ゴリラアーム問題が生じる．本研究では，AR 空間内におけるオクルージョン問題，およびゴリラアーム問題の両方を軽減するために，視線および手持ちコントローラを併用する仮想オブジェクト操作手法を提案する．提案手法では，視線によりレイの方向を制御し，手持ちのコントローラでレイの長さの調整および仮想オブジェクトの選択を行う．本研究では，ターゲットが他の仮想オブジェクトによって遮蔽されている状況において，ターゲットを選択する実験を実施した．その結果，ターゲットが他の仮想オブジェクトによって遮蔽されている部分の割合が高い程，提案手法が有効であり，オクルージョン問題の軽減に貢献したことを示した．また，提案手法は身体的負荷，特に腕への負担が小さく，ゴリラアーム問題の軽減に貢献したことを示した．提案手法の有用性を確かめられた一方で，ユーザビリティにおいて提案手法は有意にスコアが高くなかったため，今後システムの改善を行う必要がある．

目 次

第 1 章　序論 **1**
1.1　背景 1
1.2　目的とアプローチ 2
1.3　貢献 3
1.4　本論文の構成 3

第 2 章　関連研究 **4**
2.1　オクルージョン問題の解決に貢献する研究 4
2.2　ゴリラアーム問題の解決に貢献する研究 5
2.2.1　動作拡大や検出範囲の拡張 5
2.2.2　他の入力モダリティを利用する手法 5
2.3　本研究における設計指針 6

第 3 章　システム概要 **7**
3.1　実装方針 7
3.2　実装環境 8
3.3　レイの動的伸縮による仮想オブジェクトの外観調整および選択 8
3.4　視線方向の検出 10
3.5　コントローラ入力の検出 10
3.6　仮想オブジェクト操作方法 10

第 4 章　評価実験 **12**
4.1　実験内容 12
4.2　実験条件 14
4.3　実験参加者および 1 人あたりの試行回数 15
4.4　実験手順 15
4.5　仮説 18
4.6　評価項目 19
4.6.1　操作時間 19
4.6.2　作業負荷の評価 20
4.6.3　ユーザビリティの評価 21

第 5 章　実験結果 **22**

5.1 操作時間 22
5.1.1 1 セッションの完了時間 22
5.1.2 1 試行ごとの完了時間およびその時にターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した回数 24
5.2 作業負荷の評価 27
5.3 ユーザビリティ 29
5.4 自由記述アンケート 31
5.4.1 提案手法 31
5.4.2 簡易提案手法 31
5.4.3 ハンドレイ手法 31

第 6 章 考察 **32**
6.1 H1. 操作時間 32
6.1.1 オクルージョン率 80%未満の時における 1 試行ごとの完了時間 32
6.1.2 オクルージョン率 80%以上の時における 1 試行ごとの完了時間 33
6.1.3 1 セッションの完了時間 33
6.1.4 操作時間に対する考察のまとめ 34
6.2 H2. 身体的負荷 35
6.3 H3. ユーザビリティ 35
6.4 本実験の結果に対する考察のまとめ 38

第 7 章 今後の課題 **40**
7.1 実験の追加 40
7.2 システムの改善 40
7.3 アプリケーション評価 41

第 8 章 結論 **42**

謝辞 **43**

参考文献 **44**

図目次

1.1 a：ユーザが腕を上げずに仮想オブジェクトを操作している様子．b：ユーザはレイを操作する時，水平方向および垂直方向を視線（i），奥行方向を手持ちコントローラ（ii）を用いて制御する． 2

3.1 レイの先端と仮想オブジェクトの奥行座標を比較し，レイの先端より手前にある仮想オブジェクトは半透明になる． 9
3.2 レイの先端と仮想オブジェクトが接触している時，仮想オブジェクトの色が赤色になり選択が可能になる． 9
3.3 a：半透明になっている仮想オブジェクトが無いため，全ての仮想オブジェクトはレイの先端より奥にある．b：ユーザはレイを伸ばすことにより，レイの先端より手前にある仮想オブジェクトが半透明になる．c：レイの先端と仮想オブジェクトが接触しており，仮想オブジェクトが赤色になる．この時，仮想オブジェクトの選択ができる．d：仮想オブジェクトを選択後，仮想オブジェクトの色が黄色になり，操作可能であることを示す．e：ユーザは仮想オブジェクトを任意の位置に移動することができる．f：仮想オブジェクトの選択解除を行う．この時，レイの先端と仮想オブジェクトは接触したままであるため，仮想オブジェクトの色が赤色になる．g：ターゲットを含む全ての仮想オブジェクトが半透明になっているため，レイの先端が全ての仮想オブジェクトよりも奥にあることがわかる．h：ユーザはレイを縮めることにより，レイの先端より奥にある仮想オブジェクトが半透明から元の色に戻る． 11

4.1 実験参加者から見える各オクルージョン率を満たすターゲット 13
4.2 a：ターゲットを選択する時の様子．この時ターゲットのオクルージョン率は0%である．b：ターゲットが選択されたことにより，全ての仮想オブジェクトはターゲットのオクルージョン率を満たすように再配置された．この時のターゲットのオクルージョン率は20%である． 13
4.3 実験環境．実験参加者は壁から8.5m離れた場所にある椅子に座り，HoloLens2が床から1.3mの位置になるように椅子の高さを調整した． 16
4.4 実験手順のフロー 17

5.1 各手法条件における1セッションの完了時間． 23

5.2 各手法条件におけるターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した平均回数. 25
5.3 左図：オクルージョン率 80 %未満の時における 1 試行の完了時間．右図：オクルージョン率 80%以上の時における 1 試行の完了時間. 26
5.4 左図：オクルージョン率 80 %未満の時の 1 試行におけるターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した回数．右図：オクルージョン率 80%以上の時の 1 試行におけるターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した回数. 26
5.5 手法条件ごとにおける NASA-TLX の結果．スコアが高い程，負荷が高いことを示す. 27
5.6 各項目の結果．スコアが高い程，その項目の負荷が高いことを示す. 28
5.7 a：提案手法または簡易提案手法の時，Joy-Con を右手に持ち，操作をしている実験参加者の姿勢．b：ハンドレイ手法の操作をしている実験参加者の姿勢. 28
5.8 手法条件ごとにおける SUS の結果．スコアが高い程，ユーザビリティが高いことを示す. 29
5.9 SUS における各質問項目の結果を示す．奇数項目は値が高い程，ユーザビリティが高い．偶数項目は値が高い程，ユーザビリティが低い. 30

6.1 a：実験参加者がターゲットを選択する時．b：レイの長さは，仮想オブジェクトが再配置される前にターゲットを選択した時の長さを維持しているため，レイの先端より手前にあるターゲットを含む仮想オブジェクトが半透明になっている．c：実験参加者がレイの先端を手前に縮めることによって，半透明になっていた仮想オブジェクトが元の色に戻る. 37
6.2 オクルージョン率 100%の時における a：レイの先端がターゲットを遮蔽する他の仮想オブジェクトと接触している時の実験参加者からの見え方．b：レイの先端がターゲットを遮蔽する他の仮想オブジェクトより奥にあり，ターゲットより手前にある時の実験参加者からの見え方．c：レイの先端がターゲットと接触している時の実験参加者からの見え方. 38

表 目 次

4.1 本実験にて利用した NASA-TLX の質問項目. 20
4.2 本実験にて利用した SUS の質問項目. 21

第1章　序論

本研究では，視線によるレイの方向制御およびコントローラによる動的伸縮を併用し，AR 空間内における仮想オブジェクト操作を支援するシステムを提案する．本章ではまず，本研究の背景として，VR および AR 空間内の仮想オブジェクトの操作における課題を説明する．その後，本研究における目的とアプローチを述べる．そして本研究の貢献および本論文の構成を示す．

1.1　背景

Augmented Reality（AR）および Virtual Reality（VR）空間内に配置された仮想オブジェクトの操作では，一般的にコントローラまたは手からレイを伸ばし，ポインティングを行う．基本的にレイは直線上に伸び，直線上に仮想オブジェクトがある時，ユーザから見て一番手前の仮想オブジェクトに焦点を当てる．しかし，AR および VR 空間内において，複数の仮想オブジェクトは異なる奥行にて表示されうるため，選択したい仮想オブジェクト（以下，ターゲットと呼ぶ）が他の仮想オブジェクトによって一部遮蔽，あるいは完全に遮蔽される事により選択が困難，あるいは不可能になるという**オクルージョン問題** [1] が生じる．

オクルージョン問題は，ユーザ自身がターゲットが見える所まで移動することによって解決することができる．しかし，この方法は狭い空間，または外出先の空間など移動に制約がある状況では行うことができない．他の方法として，ユーザがターゲットを遮蔽する他の仮想オブジェクトを選択し，ターゲットが見えるような位置まで移動させることが挙げられる．これはユーザが移動せずにオクルージョン問題を解決できる一方で，ユーザがターゲットを選択できるようになるまでに行う一連の操作が長く，時間がかかる．その他にオクルージョン問題を解決する方法として，ターゲットを遮蔽する他の仮想オブジェクトを透明あるいは半透明にする方法 [2, 3, 4, 5]，ターゲット周辺にある仮想オブジェクトを全て取り出した後に，その中からターゲットを選択する方法 [4, 6]，鏡を配置し鏡に反射するターゲットを選択する方法 [7, 8] などが先行研究にて行われてきた．

ユーザはレイを用いてポインティングを行う時，手またはコントローラを Head Mounted Display（HMD）デバイスが認識できるトラッキング範囲内で操作しなくてはならない．結果として，ユーザは操作に腕を上げる必要が生じるため，腕への疲労として知られる**ゴリラアーム問題** [9] に繋がる．ゴリラアーム問題を解決する方法として，手またはコントローラの動きを増幅し，小さい動きで操作する方法 [10, 11], 視線，頭部などハンズフリーでの操作を行う方法 [12, 13] などが先行研究にて行われてきた．

オクルージョン問題およびゴリラアーム問題を解決するための研究が行われているが，これらの研究は両方の問題を同時に解決したものではなかった．

1.2 目的とアプローチ

本研究の目的は，AR 空間内におけるオクルージョン問題およびゴリラアーム問題の軽減を両立することである．この目的を達成するためには，ターゲットが他の仮想オブジェクトに遮蔽されている状況において，ターゲットを遮蔽する他の仮想オブジェクトを選択することなしに，ターゲットを選択できる操作手法が必要だと考えた．また，腕への疲労を軽減するために，腕を上げずに操作可能であることが必要だと考えた．

従って，本研究では視線および HMD デバイスのトラッキング範囲外から入力可能な手持ちコントローラを用いた仮想オブジェクト操作手法を提案する（図 1.1）．提案手法を使用するユーザは腕を下げたまま操作が可能である（図 1.1a）．提案手法では，視線によりレイの方向を制御し（図 1.1b（i）），手持ちコントローラの操作によりレイの伸縮および仮想オブジェクトの選択を行う（図 1.1b（ii））．本研究の実装では手持ちコントローラを用いるが，将来的にはハンドジェスチャに代替する予定である．

本研究は，関連研究にて得られた知見に基づき，提案システムの実装を行った．その後，実装したシステムを評価するために，AR 空間内において一般的に用いられるハンドレイ手法，および提案手法の機能を制限した簡易提案手法と比較する実験を行った．

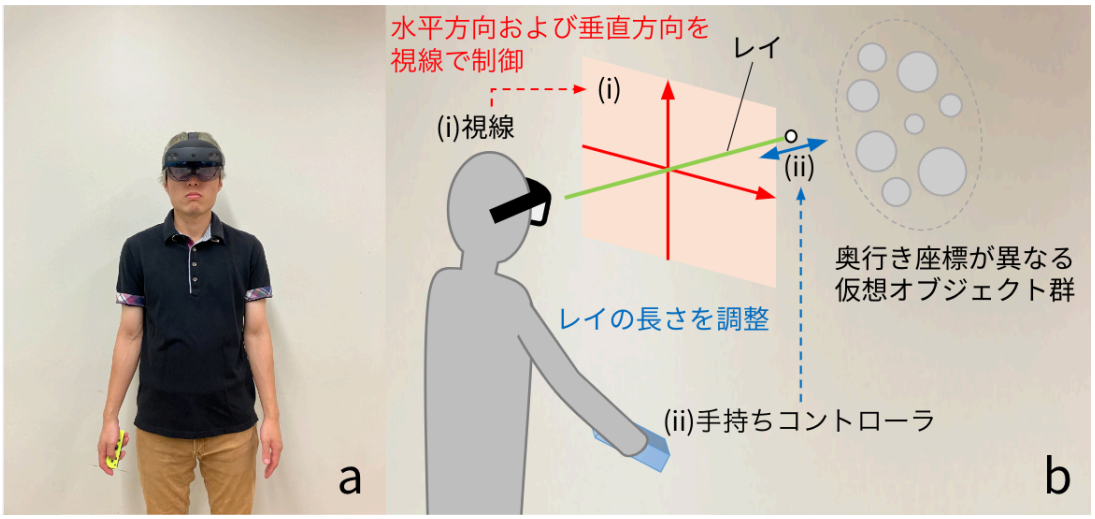


図 1.1: a：ユーザが腕を上げずに仮想オブジェクトを操作している様子．b：ユーザはレイを操作する時，水平方向および垂直方向を視線（i），奥行方向を手持ちコントローラ（ii）を用いて制御する．

1.3 貢献

本研究の貢献は以下の通りである．

- 関連研究にて得られた知見に基づき，AR 空間内におけるオクルージョン問題およびゴリラアーム問題の軽減を両立するために，視線および手持ちコントローラを併用した仮想オブジェクト操作手法を提案した．
- 視線によるレイの方向制御，および手持ちコントローラによるレイの動的伸縮を併用した提案手法のシステムを実装した．
- 評価実験を実施し，提案手法の効果として以下の結果を示した．
  - ターゲットが他の仮想オブジェクトに遮蔽されている部分の割合が大きい場合，提案手法はハンドレイ手法に対して操作時間が短くなった（オクルージョン問題の軽減）．
  - 提案手法はハンドレイ手法に対して身体的負荷，特に腕への負担が軽減された（ゴリラアーム問題の軽減）

1.4 本論文の構成

本論文の構成を述べる．第 1 章では，本論文の背景，研究の目的とアプローチ，および本研究の貢献を述べた．第 2 章では，関連研究について説明し，そこで得られた知見に基づき，提案システムの設計指針を示す．第 3 章では，提示した設計指針に基づき，実装したシステムについて述べる．第 4 章では，AR 空間内における視線および手持ちコントローラを用いた仮想オブジェクトの操作の特性を調査するために実施した評価実験について述べる．第 5 章では，実験結果に対する統計的な分析について述べる．第 6 章では，実験結果の分析に基づき，考察を述べる．第 7 章では，今後の課題として，システムおよび実験設計の改善点について述べる．第 8 章では，本研究の結論を述べる．

第2章　関連研究

本章では，オクルージョン問題の解決に貢献する研究，およびゴリラアーム問題の解決に貢献する研究について述べる．その後，得られた知見に基づき，提案手法の設計指針を述べる．

2.1　オクルージョン問題の解決に貢献する研究

オクルージョン問題の解決に貢献する研究は，レイの操作によって解決する手法 [2, 3, 4, 14, 15]，ユーザからの見え方を変える手法 [4, 5, 6, 7, 8, 16, 17, 18] などが挙げられる．

Baloup ら [2] は，仮想オブジェクトを選択可能にする接触点を限定し，その点をコントローラを用いて動的に伸縮させることにより，他の仮想オブジェクトを選択することなく仮想オブジェクトの裏にあるターゲットを選択できる手法を提案した．Baloup らの手法を基に作成した Zhang ら [3] は，両手にコントローラを持ち，利き手でレイを操作し，反対の手はユーザからは見えない地面に垂直な平面をターゲットに向けることにより，レイと平面の交点にある仮想オブジェクトを選択する手法を提案した．Alex ら [14] は直線に伸びるレイを曲げることによって，他の仮想オブジェクトの裏にあるターゲットを選択しやすくする手法を提案した．Plasson ら [15] は，利き手でレイを，反対の手でレンズを操作し，レンズの位置とユーザの位置の間にある仮想オブジェクト全てを半透明にすることにより，仮想オブジェクトの裏にあるターゲットを選択できる手法を提案した．Wang ら [16] はユーザが見ている場所に重なっている仮想オブジェクトがある時，自動で見やすくなるようにレンダリングし，選択しやすくする手法を提案した．

これらの手法はオクルージョン問題を解決できるが，ユーザはポインティングの時に HMD デバイスのトラッキング範囲内で手もしくはコントローラを操作する必要があるため，ゴリラアーム問題は解決されていない．

Sidenmark ら [17] は，ユーザーの視界内にある遮蔽された仮想オブジェクトを含む全仮想オブジェクトの輪郭に異なるパターンで移動する点を描画し，ユーザがいずれかの点を目で追跡することにより，対象となる仮想オブジェクトを選択する手法を提案した．また，Yi ら [18] は，目を細めたり見開いたりすることによって，奥行き方向を指定し，ターゲットを注視することで選択できる手法を提案した．これらの手法はコントローラを用いずに仮想オブジェクトを選択できるが，Sidenmark ら [17] は選択後に，HMD デバイスのトラッキング範囲内でコントローラを用いて仮想オブジェクトを操作する必要があり，ゴリラアーム問題は解決されてない．一方，Yi ら [18] は選択後の操作に関して言及していない．

2.2 ゴリラアーム問題の解決に貢献する研究

ゴリラアーム問題の解決のため，本節では操作にあたっての腕部負担の軽減に貢献する研究について述べる．腕部負担の軽減へのアプローチとして，動作の拡大や検出範囲の拡張，および他の入力モダリティを利用する手法がある．

2.2.1 動作拡大や検出範囲の拡張

動作拡大として，コントローラの動きを増幅することによって小さい動きで操作する手法 [10, 11]，検出範囲の拡張として，腕を下げた状態または腕の位置が低い状態で操作する手法 [19, 20, 21] などが挙げられる．

Liu ら [19] は，Leap Motion [22] をユーザの太腿の位置に取り付け，腕を下げたままの状態でジェスチャ入力を行うことによって，ディスプレイに対して操作を行う手法を提案した．Ens ら [20] は Leap Motion と Google Soli [23] をユーザの太腿の位置に取り付け，腕を下げたままの状態でジェスチャ入力を行うことによって，三次元空間内の仮想オブジェクトに対して選択，移動および回転を行う手法を提案した．Feuchtner ら [21] は，ユーザは腕を下げたまま操作をしているが，錯覚を用いることによって，VR 空間内で腕を上げて操作しているように感じさせる手法を提案した．

これらの研究はユーザへの身体的負荷を軽減するが，ターゲットが他の仮想オブジェクトによって遮蔽されている状態における操作，すなわちオクルージョン問題について言及されていない．

2.2.2 他の入力モダリティを利用する手法

腕を上げて操作を行う代わりに，他の入力モダリティを利用する手法として，頭 [12]，視線 [13] などを用いた操作手法が挙げられる．特に視線入力は視線の高速性，および既存の HMD デバイスに視線計測装置が搭載されているものが存在することから，有力な入力手法の一つである．

視線のみの入力は，滞留時間を設けた手法 [24, 25, 26, 27]，視線を用いてジェスチャを行う手法 [25, 28] などが挙げられる．

滞留時間を設けた手法は，視線を一定時間ターゲット上に滞留させることによってそのターゲットを選択することができる．この手法は滞留時間を短くする程，操作を速く行うことができるが，それと同時に誤選択 [29] を引き起こしやすくなる．そのため，滞留時間は 450ms から 1000ms の間の値に設定されることが一般的である [30]．

視線を用いてジェスチャを行う手法は，ターゲットを注視した後，予め決められている方向に視線を移動させることによって，注視していたターゲットの選択を確定する．これらの手法は滞留時間を設けた手法と比較して，ターゲットの堅牢な選択ができる．しかし，選択の確定を行うために急速な視線移動を頻繁に行うことが，ユーザに不快感を与える可能性がある．

視線のみの入力によって引き起こる問題を解決するために，視線と頭部方向 [31, 32]，視線と手 [33, 34]，視線とその他の入力モダリティを組み合わせる手法 [35, 36] が検討されてきた．これらのマルチモーダル入力手法を取り入れることによって，操作は複雑になるがモノモーダル入力手法の時には解決できなかった問題を解決することができる．

2.3 本研究における設計指針

本節では，関連研究にて得られた知見に基づき，本研究の設計指針について述べる．先行研究においてオクルージョン問題の解決に貢献する研究として，レイを用いてターゲットを遮蔽する仮想オブジェクトを透明あるいは半透明にする手法，レイの伸縮または視線を用いて奥行きを指定する手法などがある．ゴリラアーム問題の解決に貢献する研究として，動作拡大や検出範囲の拡張する手法，他の入力モダリティを用いる手法などがある．他の入力モダリティとして，特に視線を用いた入力が盛んに行われており，視線と他の入力モダリティを組み合わせたマルチモーダルな入力手法は視線のみの入力では解決できなかった問題を解決できる．しかし，これらの研究においてオクルージョン問題およびゴリラアーム問題を同時に解決する研究は行われていない．

従って本研究では，先行研究における各手法の強みを組み合わせ，AR 空間内におけるオクルージョン問題およびゴリラアーム問題の軽減の両立に貢献する仮想オブジェクト操作手法を提案する．そのための設計指針は以下の通りである．

- 視線および手持ちコントローラを併用し，ユーザが腕を下げた状態で操作できるようにする．
- 手持ちコントローラを用いてレイの長さの動的伸縮および選択を行うことで，任意の奥行位置の仮想オブジェクトを操作できるようにする．
- 視線から伸びたレイの先端より手前にある仮想オブジェクトを半透明にし，選択可能な仮想オブジェクトおよび選択中の仮想オブジェクトの色を変化させることで，ユーザの操作を支援できるようにする．

第3章　システム概要

本研究は，アイトラッカにより認識された視線方向へ伸びるレイ（以下，レイと呼ぶ）を手持ちコントローラ（以下，コントローラと呼ぶ）を用いて動的に伸縮させる仮想オブジェクト操作手法を実装した．レイの方向制御に視線，レイの伸縮および仮想オブジェクトの選択にコントローラを用いる．本章では実装方針，実装環境，レイの動的伸縮および仮想オブジェクトの外観調整，入力の検出方法，および操作方法を示す．

3.1　実装方針

本研究では Liu ら [19] のアイデアを基にトラッキング範囲外でのオブジェクト操作を可能にするため，視線からポインティングをし，コントローラのボタンを押下することによりレイの伸縮および仮想オブジェクトの選択を行う．

視線によるポインティングの方が頭部方向によるポインティングより操作の速さ，負担の少なさ，ユーザの好みにおいて優れている研究 [37, 38] が存在する．しかし，頭部方向によるポインティングの方が優れていると主張する研究 [39, 40] も存在する．視線は目のジッタ [41] により小さいターゲットに対してポインティングを行うことが困難であるが，その時は視線を用いた後に頭部方向を動かし微調整を行うことによって解決できると考えた．従って，本研究では頭部方向のポインティングではなく，視線によるポインティングを採用した．

Baloup ら [2] のアイデアを基にレイの長さを動的に調整することによって，遮蔽されたターゲットを操作できるようにした．ターゲットを操作する時，他の仮想オブジェクトがどこにあるかを把握することによって，適切な位置にターゲットを移動できると考えた．また，他の仮想オブジェクトがターゲットを完全に遮蔽し，ユーザからターゲットを確認できない状態においても，仮想オブジェクトを半透明させることによって，ターゲットを探索することができると考えた．そのため，Plasson ら [15] のアイデアを基に，視線から伸びるレイの先端より手前にある仮想オブジェクトを半透明にした．

仮想オブジェクトの選択を行う過程において，視覚的フィードバックが触覚および聴覚フィードバックより有効である [42] ことから，選択可能な仮想オブジェクトおよび選択中の仮想オブジェクトの色を変化させた．

3.2 実装環境

ハードウェアはコントローラとして Nintendo Switch Joy-Con [43] を，HMD デバイスとして HoloLens2 [44] を利用した．ソフトウェアは HoloLens2 搭載のアイトラッカ，Mixed Reality Toolkit（MRTK バージョン 2.82） [45] および Unity（バージョン 2020.3.16f1） [46] を利用した．

3.3 レイの動的伸縮による仮想オブジェクトの外観調整および選択

本節では，提案手法の操作における，オクルージョン問題の軽減に貢献するために実装したレイの伸縮による仮想オブジェクトの外観調整，および仮想オブジェクトの選択について説明する．

提案手法は，レイの先端と仮想オブジェクトの奥行方向の座標を逐一比較している．それにより，レイの先端が仮想オブジェクトよりも奥にある時，レイの先端より手前にある仮想オブジェクトは全て半透明になる．これにより，ユーザは半透明になった仮想オブジェクトの裏に他の仮想オブジェクトが存在するかどうかを確認することができる．半透明になった仮想オブジェクトは，コントローラによるレイの縮小を用いて，レイの先端を半透明になっている仮想オブジェクトより手前に移動させることによって，半透明になっていた仮想オブジェクトは元の色に戻る．

レイの先端と仮想オブジェクトが接触している時，その仮想オブジェクトの色が赤色に変化する．この時，ユーザはコントローラの選択ボタンを押すことによって，その仮想オブジェクトを選択し，操作することができる．逆に，レイの先端と仮想オブジェクトが接触していない時，ユーザは仮想オブジェクトの選択をすることができない．

以上の操作を利用することによって，仮想オブジェクトの裏にターゲットがある時，ユーザはレイを伸ばしてターゲットを遮蔽する仮想オブジェクトを半透明にし（図 3.1），レイの先端とターゲットを接触させることによって，ターゲットを選択できる（図 3.2）．

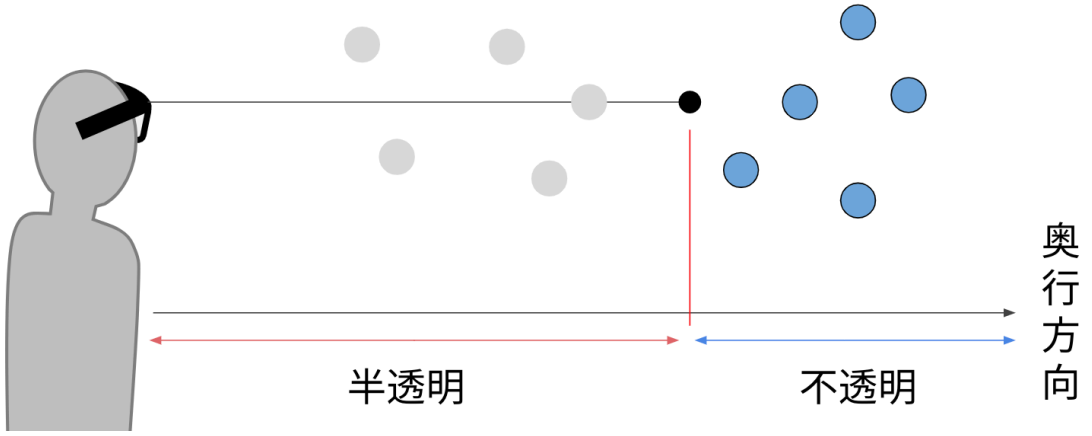


図 3.1: レイの先端と仮想オブジェクトの奥行座標を比較し，レイの先端より手前にある仮想オブジェクトは半透明になる．

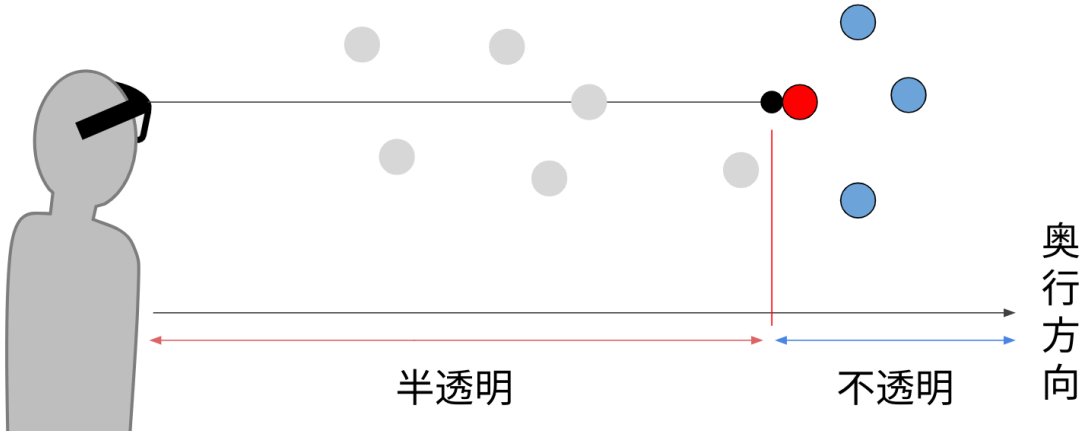


図 3.2: レイの先端と仮想オブジェクトが接触している時，仮想オブジェクトの色が赤色になり選択が可能になる．

3.4　視線方向の検出

本研究は, 視線方向の検出に HoloLens2 を用いた．HoloLens2 では正確な視線深度を認識することができないため，水平方向および垂直方向の視線情報のみを使用した．そのため，奥行方向の調整にコントローラを用いる．本研究はこれらの検出した情報をもとに，レイを操作している．

3.5　コントローラ入力の検出

本研究は Joy-Con を用いてレイの伸縮および仮想オブジェクトの選択を行う．Joy-Con は Bluetooth によって HoloLens2 と接続しているため，ユーザは腕を上げずにコマンド入力が可能である．ユーザは Joy-Con を縦に持ち，入力には A，B，X，Y ボタンを用いる．

- **A ボタン**
  ユーザはレイの先端と仮想オブジェクトが接触している時（すなわち仮想オブジェクトの色が赤色の時）A ボタンを押すことにより，その仮想オブジェクトを選択できる．選択後は仮想オブジェクトの色が黄色になり，ユーザは仮想オブジェクトを操作できる．仮想オブジェクトの操作中にユーザは再び A ボタンを押すことによって，操作していた仮想オブジェクトの選択を解除できる．

- **X，B ボタン**
  レイは X ボタンまたは B ボタンを押し続けることによって伸縮する．ユーザが X ボタンを押している間はレイが伸び続け，レイの色が緑色になる．一方，ユーザが B ボタンを押している間はレイが縮み続け，レイの色が赤色になる．X または B ボタンのどちらも押していない場合，レイは伸縮せずレイの色は白色のままである．

- **Y ボタン**
  レイの伸縮速度を変更できる．現在は速い遅いの二段階調節することができる．

3.6　仮想オブジェクト操作方法

本節では，ユーザが実際にターゲット（図 3.3 における青色の球）を選択するまでの過程を説明する．ここで，ターゲットの位置は全ての仮想オブジェクトの中で一番奥にあるものとする．

初めにユーザはターゲットに視線を向ける（図 3.3a）．この時点で仮想オブジェクトは半透明になっていないため，ユーザはレイの先端が全ての仮想オブジェクトより手前にあることが分かる．従って，ユーザはレイを伸ばすために Joy-Con の X ボタンを押し続ける．それにより，レイの先端の奥行座標より手前にある仮想オブジェクトが半透明化する（図 3.3b）．レイの先端にターゲットが接触し，ターゲットの色が赤色に変わった時，ユーザは Joy-Con の A ボタンを押すことによって選択できる（図 3.3c）．ユーザが選択した後，ターゲットの色が黄

色に変わるため（図 3.3d），その間ユーザはターゲットを任意の位置に移動できる（図 3.3e）．ターゲットの操作を終了する時，ユーザは Joy-Con の A ボタンを押すことによってターゲットを選択解除できる．ターゲットの選択解除後はレイの先端とターゲットが接触し続けているため，ターゲットの色が赤色に変わる（図 3.3f）．

もしターゲットが半透明になった場合（図 3.3g），レイの先端の奥行座標がターゲットより奥にあるため，ユーザはレイを縮めるために Joy-Con の B ボタンを押し続けなければならない．レイが縮むことによって，レイの先端の奥行座標より奥にある仮想オブジェクトは半透明から元の色に戻る（図 3.3h）．

このようにしてユーザは視覚的フィードバックを受けながら仮想オブジェクトの操作を行うことができる．

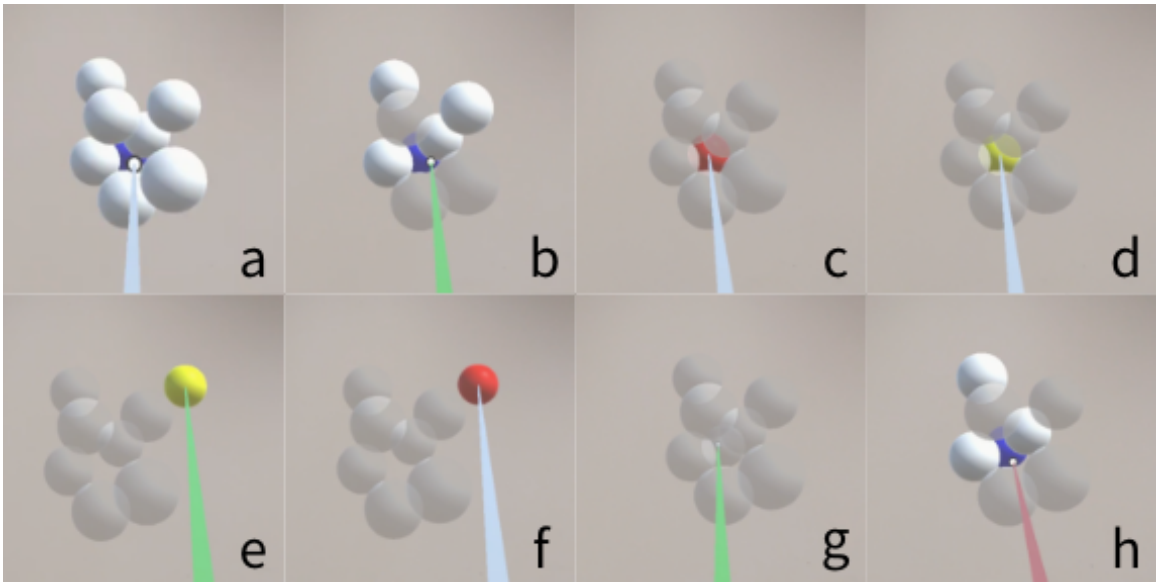


図 3.3: a：半透明になっている仮想オブジェクトが無いため，全ての仮想オブジェクトはレイの先端より奥にある．b：ユーザはレイを伸ばすことにより，レイの先端より手前にある仮想オブジェクトが半透明になる．c：レイの先端と仮想オブジェクトが接触しており，仮想オブジェクトが赤色になる．この時，仮想オブジェクトの選択ができる．d：仮想オブジェクトを選択後，仮想オブジェクトの色が黄色になり，操作可能であることを示す．e：ユーザは仮想オブジェクトを任意の位置に移動することができる．f：仮想オブジェクトの選択解除を行う．この時，レイの先端と仮想オブジェクトは接触したままであるため，仮想オブジェクトの色が赤色になる．g：ターゲットを含む全ての仮想オブジェクトが半透明になっているため，レイの先端が全ての仮想オブジェクトよりも奥にあることがわかる．h：ユーザはレイを縮めることにより，レイの先端より奥にある仮想オブジェクトが半透明から元の色に戻る．

第4章　評価実験

本章では，提案手法の効果を明らかにするために，実装したシステムを用いた実験を行った．本章では，実験内容，実験条件，実験手順，設定した仮説，およびその仮説を検証するための評価項目を述べる．

4.1　実験内容

本研究では Sidenmark ら [17] の実験設計を基に，実験タスクを設計した．実験参加者は仮想オブジェクトからターゲット（青色の球）を探索し，選択を行うタスクを実施した．仮想オブジェクトを表示する空間範囲は 2m × 2m × 2m であり，実験アプリケーションを起動した時，HoloLens2 の頭部位置が仮想オブジェクトを表示する空間の高さの中心となる．実験参加者は仮想オブジェクトを表示する空間の中心から 3m，5m，7m 離れた場所から実験を行う．これは，距離に応じて探索や選択の難易度が変化するため，特定の距離に限定せず検証を行うことを目的に設定した．

仮想オブジェクトを表示する空間内において，ターゲットを含む 16 個の仮想オブジェクトは，ターゲットが指定のオクルージョン率を満たすようにランダムに配置される．オクルージョン率とはターゲットが他の仮想オブジェクトによってどの程度遮蔽されているかの割合を表す．オクルージョン率が 50%の時, 実験参加者はターゲット全体の半分のみを視認することができる．一方オクルージョン率が 100%の時，他の仮想オブジェクトによってターゲットが完全に遮蔽されているため，実験参加者はターゲットを視認することができない．オクルージョン率は 0%から 100%まで 10%刻みの合計 11 段階存在する．実験参加者から見える各オクルージョン率を満たすターゲットを図 4.1 に表す．この 11 段階のオクルージョン率を 1 セットとし，オクルージョン率はランダムに選出される．また，11 段階のオクルージョン率全てが出現するまで，1 度出現したオクルージョン率は現れない．

ターゲットを選択することが困難な場合，実験参加者は他の仮想オブジェクトを選択し，任意の場所に移動させることができる．実験参加者がターゲットを選択した時，ターゲットを含む 16 個の仮想オブジェクトは，ターゲットのオクルージョン率を満たすように再配置される（図 4.2）．また，本実験ではターゲットを遮蔽する他の仮想オブジェクトは 1 つのみである．

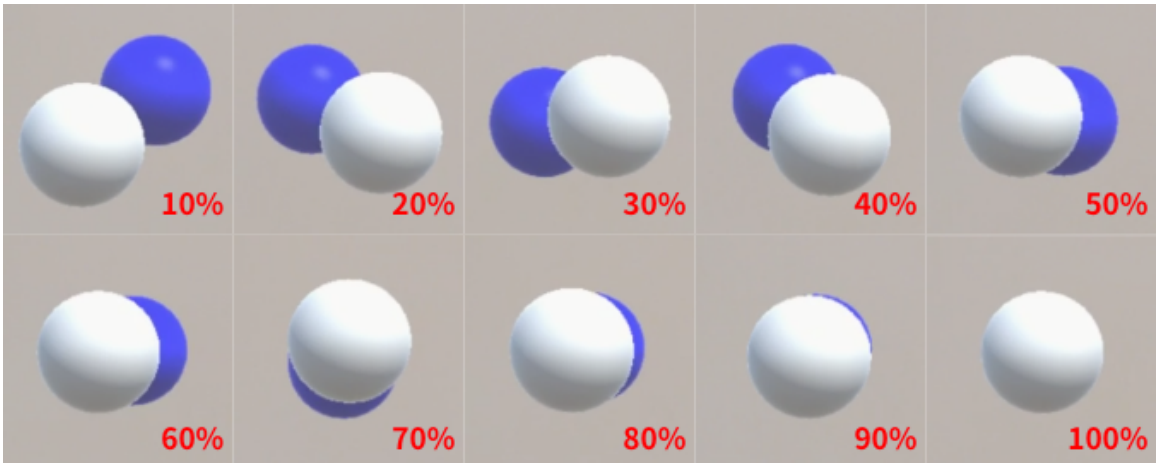


図 4.1: 実験参加者から見える各オクルージョン率を満たすターゲット

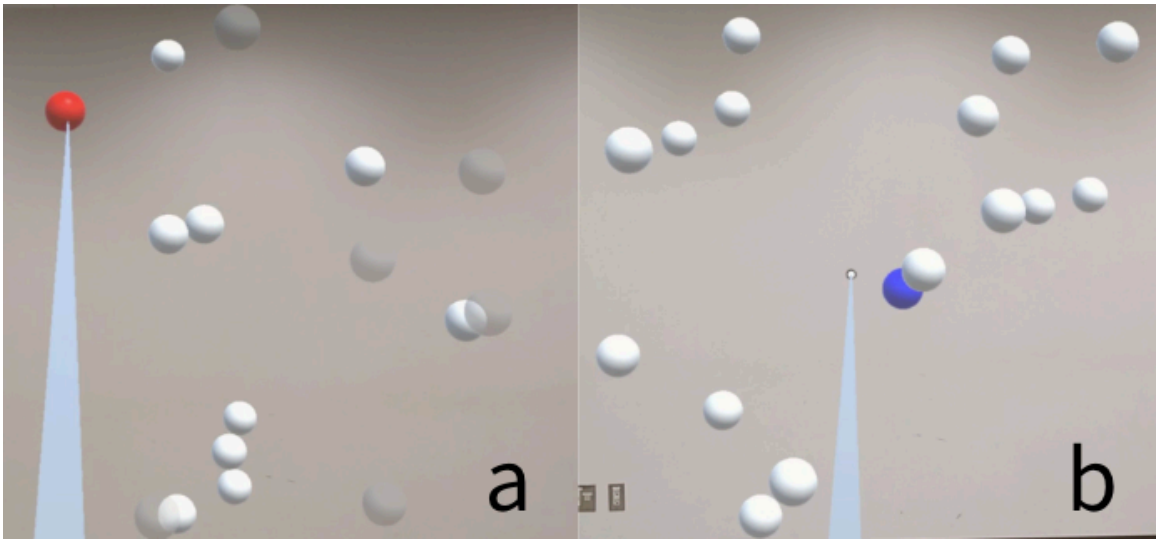


図 4.2: a：ターゲットを選択する時の様子．この時ターゲットのオクルージョン率は 0%である．b：ターゲットが選択されたことにより，全ての仮想オブジェクトはターゲットのオクルージョン率を満たすように再配置された．この時のターゲットのオクルージョン率は 20%である．

4.2 実験条件

実験条件は以下の 3 つを手法条件とした.

- **提案手法**
  本手法は，HoloLens2 から得られる視線の情報および Joy-Con からの入力コマンドをもとに操作を行う．視線を用いてレイの方向制御を行い，コントローラを用いてレイの動的伸縮および選択を行う.

  レイの先端と仮想オブジェクトの奥行き方向の座標を逐一比較しているため，レイの先端が仮想オブジェクトよりも奥にある時，レイの先端より手前にある仮想オブジェクトは全て半透明になる．半透明になっている仮想オブジェクトは，レイを縮めてレイの先端を仮想オブジェクトより手前に移動させることで，半透明から元の色に戻る.

  レイの先端と仮想オブジェクトが接触している時，その仮想オブジェクトの色が赤色に変化する．この時，ユーザは Joy-Con の A ボタンを押すことによって，仮想オブジェクトの色が赤色から黄色に変わり，再び Joy-Con の A ボタンを押して選択を解除するまで，任意の位置に仮想オブジェクトを操作することができる.

- **簡易提案手法**
  本手法は，ゴリラアーム問題の軽減に貢献するが，オクルージョン問題の軽減には貢献しないと予想される手法である．本手法は，HoloLens2 から得られる視線の情報および Joy-Con からの入力コマンドをもとに操作を行う．提案手法とは異なり，本手法では Joy-Con の A ボタンのみ利用することができる．従ってレイの奥行方向の調整を行うことができないため，視線から伸びるレイは無限遠に伸びている．レイの直線上に仮想オブジェクトがある時，レイの長さが自動で調節され，ユーザから見て一番手前の仮想オブジェクトに焦点を当てる．その時ユーザは，Joy-Con の A ボタンを押すことによってその仮想オブジェクトを選択し，その後操作することができる.

  本手法では提案手法にて使われている，レイと仮想オブジェクトが接触している時に赤色，操作中に黄色になること，およびレイの先端の奥行き座標より手前にあるオブジェクトが半透明になる視覚的フィードバックは与えなかった．これは提案手法との比較を行うことにより，レイの動的伸縮および視覚的フィードバックがオクルージョン問題の軽減に貢献する要因であるかを検証するためである.

- **ハンドレイ手法**
  本手法は，HoloLens2 の基本操作として使われている手法である [47]．ユーザは手から伸びるレイを仮想オブジェクトに向けることによって，レイの直線上にある仮想オブジェクトの中からユーザから見て一番手前の仮想オブジェクトに焦点を当てる．親指と人差し指を合わせるピンチ動作により仮想オブジェクトを選択し，指を合わせている間，選択した仮想オブジェクトを操作することができる．仮想オブジェクトの操作中にユーザは親指と人差し指を離すことによって，操作していた仮想オブジェクトに対する選択を解除することができる.

本手法はHoloLens2が認識できるハンドトラッキング範囲内での操作が必要なため，ユーザは腕を上げ続けながら操作を行う．

4.3 実験参加者および1人あたりの試行回数

実験参加者は，研究室内の21歳以上27歳以下（平均23.5歳，SD=1.88歳）の大学生および大学院生12名（男性12名）であり，全ての実験参加者は右利きであった．実験は参加者内配置の実験計画とし，参加者は3つの手法条件を3つの距離にてタスクを実施した．順序による効果を打ち消すため，手法条件の順序のカウンターバランスを取った．実験参加者は右手にJoy-Conを縦に持ち，実験を実施した．また，筑波大学の謝金規定に基づき，実験参加者には1時間あたり920円の謝金を支払った．

実験は11段階のオクルージョン率×3セットの33試行を1セッションとする．各手法条件にて1セッション×3（距離）を行った．従って，実験参加者は33（1セッション）×3（手法条件）×3（距離）の合計297試行行った．

4.4 実験手順

実験では，最初に書面により研究の目的・内容等について説明した後，実験参加者の同意を取得した．次に本実験のタスク内容について説明を行った．実験参加者は壁から8.5m離れた場所にある椅子に座わり，HoloLens2が床から1.3mの位置になるように椅子の高さを調整した（図4.3）．この距離設定は，実験タスクで仮想オブジェクトが壁および床の外側に配置され，視覚的混乱を招くことを防ぐことを目的としている．その後，視線を用いる提案手法および簡易提案手法は，HoloLens2に搭載されている視線のキャリブレーション[48]を行なった．実験では，仮想オブジェクト探索の時に頭を傾けることは許可したが，体全体を大きく傾けることは禁止した．この制約は，体を大きく傾けることによって高いオクルージョン率の時，ユーザがターゲットを容易に探索出来てしまうことを防ぐためである．

各手法条件を始める前に実験参加者が操作に慣れてもらうため，トレーニングセッションを行った．トレーニングセッションでは本実験と同様，仮想オブジェクトを表示する空間内からターゲットを探索し，選択する．実験参加者は，仮想オブジェクトを表示する空間の中心から2m離れた場所から11段階のオクルージョン率を各1回試行するトレーニングセッションを行なった．トレーニングセッション終了後，実験セッションを実施した．

実験セッションではタスクを行う実験参加者に対して，より速くより正確な操作を行うように指示した．また，視線を用いる提案手法および簡易提案手法において，キャリブレーションした視線の精度が著しく低下し，仮想オブジェクトに対して焦点が合わない時，実験参加者が途中で実験を中断し，再キャリブレーションをすることを許可した．その際，実験参加者が途中まで行なっていた実験条件の実験セッションを破棄し，その実験条件を再び最初から行なった．また，ハンドレイ手法を用いてタスクを行う時，実験参加者に対して両手は使わず，利き手のみ用いて操作するように指示した．

1 つの手法条件で 3 つの距離の実験セッション終了後，実験参加者に対し，ユーザビリティ調査のための System Usability Scale（SUS） [49]，作業負荷調査のための NASA Task Load Index（NASA-TLX） [50]，および自由記述アンケートを実施した．その後 5 分間の休憩を挟んだ上で，次の手法条件を実施した．

3 つの手法条件が終了後，今後実験参加者にとって本実験が不都合なものになった場合，同意を撤回することができる旨を伝え，実験を終了した．実験時間は約 90 分であった．以上の実験手順のフローを図 4.4 に示す．



図 4.3: 実験環境．実験参加者は壁から 8.5m 離れた場所にある椅子に座り，HoloLens2 が床から 1.3m の位置になるように椅子の高さを調整した．

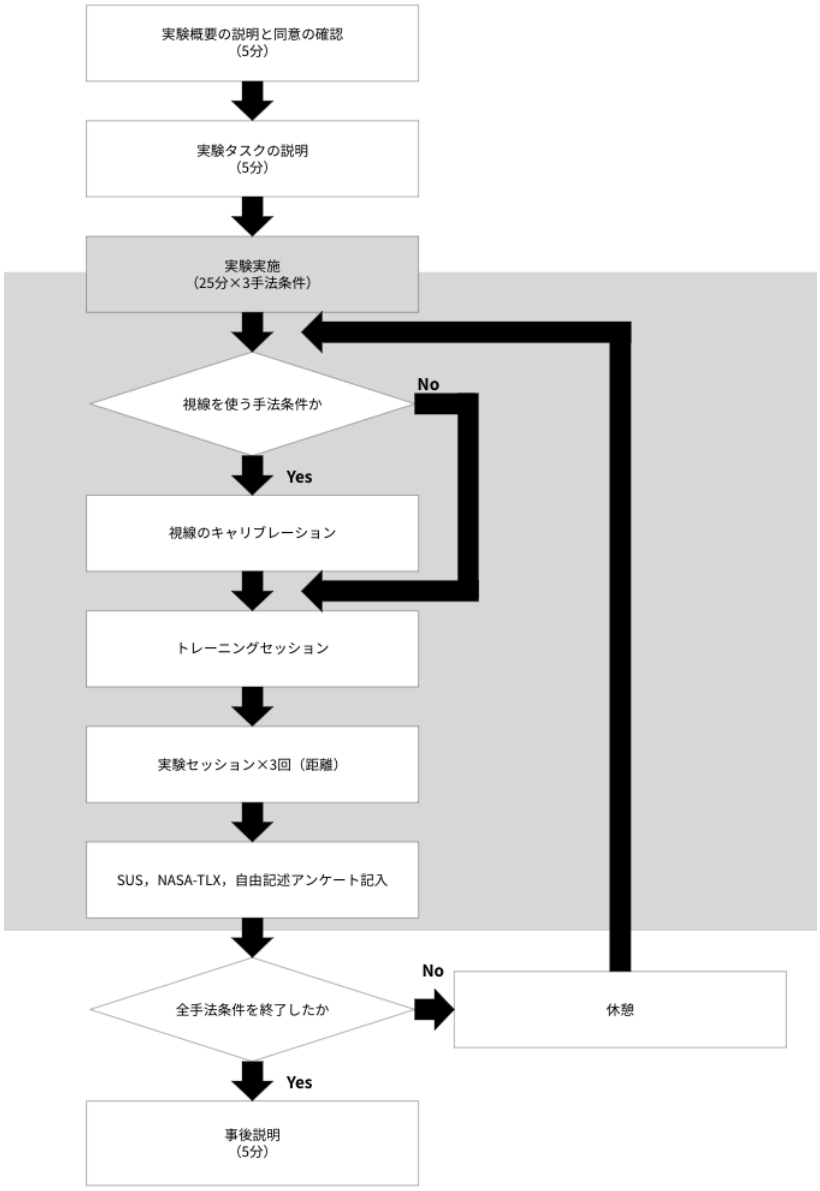


図 4.4: 実験手順のフロー

4.5 仮説

本実験では，AR 環境における操作において，提案手法の効果を調査する．評価にあたり，提案手法の効果として以下の 3 点の仮説を設定した．

- H1. ターゲットのオクルージョン率が高い時，提案手法は簡易提案手法およびハンドレイ手法に対して操作時間が短い．
- H2. 提案手法および簡易提案手法は腕を上げずに操作をすることができるため，ハンドレイ手法に対して身体的負荷が小さい．
- H3. オクルージョン問題およびゴリラアーム問題の軽減に貢献することにより，提案手法，簡易提案手法，ハンドレイ手法の順にユーザビリティが高い．

本研究は，オクルージョン問題およびゴリラアーム問題の軽減の両立を目指す．オクルージョン問題およびゴリラアーム問題の軽減の両立ができたかを検証するために，AR 空間内において一般的に用いられるハンドレイ手法と比較する．また，提案手法におけるレイの動的伸縮および視覚的フィードバックがオクルージョン問題の軽減に貢献する要因であるかを検証するために，簡易提案手法と比較する．以下に，これらの仮説を設定した背景を述べる．

ターゲットのオクルージョン率がどの程度かによって，ターゲットを選択するまでの操作時間が異なると考えた．ターゲットが他の仮想オブジェクトに遮蔽されている時，提案手法はレイの伸縮を用いて，ターゲットを遮蔽している他の仮想オブジェクトを半透明にすることにより，ターゲットの選択が可能である．従って，ターゲットのオクルージョン率が高い時，提案手法は簡易提案手法およびハンドレイ手法に対して操作時間が短くなり，オクルージョン問題の軽減に貢献すると考えた（H1）．また，オクルージョン率が高い時，提案手法が簡易提案手法に対して操作時間が短いならば，レイの動的伸縮および視覚的フィードバックがオクルージョン問題の軽減に貢献する要因であると考えた．

ハンドレイ手法では腕を上げた状態で操作を必要とする一方で，提案手法は腕を上げずに操作を行うことができる．従って，提案手法および簡易提案手法はハンドレイ手法に対して身体的負荷，特に腕への負担が小さくなり，ゴリラアーム問題の軽減に貢献できると考えた（H2）．

ターゲットのオクルージョン率が高い時，提案手法が簡易提案手法およびハンドレイ手法に対して操作時間が短い場合（H1 が支持された場合），または提案手法および提案手法がハンドレイ手法に対して身体的負荷が小さい場合（H2 が支持された場合），あるいはその両方が支持された場合，提案手法のユーザビリティは高くなり，提案手法，簡易提案手法，ハンドレイ手法の順にユーザビリティが高いと考えられる（H3）．

以上のことから，本研究においては仮説 H1-H3 を検証する．

4.6 評価項目

本研究において，仮説を検証するために以下の 3 つの評価項目の設定をした．各評価項目は順番に H1，H2，H3 を検証するための項目である．

- 操作時間
- 作業負荷の評価
- ユーザビリティの評価

H1 の仮説を検証するために，1 試行ごとの完了時間およびその時にターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した回数のログを取得した．H2 の仮説を検証するために，作業負荷に関する NASA-TLX の実施，および実験参加者が実験を行っている時の姿勢を取得するために動画の撮影を行った．H3 の仮説を検証するために，ユーザビリティに関する SUS を実施した．

また，手法ごとにおける操作時間を調査するために，1 セッション 33 試行の完了時間のログを取得した．さらに，手法ごとの詳細な情報を取得するため，自由記述アンケートを実施した．

4.6.1 操作時間

本実験では，オクルージョン率ごとによって各手法における操作時間が異なると考えた．そのため，実験タスクの開始から終了までの全体時間（1 セッションの完了時間）だけでなく，1 試行ごとの完了時間も取得した．また，オクルージョン率が高くなる程，簡易提案手法およびハンドレイ手法はターゲットを選択するために，ターゲットを遮蔽する他の仮想オブジェクトを選択し，ターゲットが選択できるような位置に仮想オブジェクトを移動させる必要があると考えられる．そのため，他の仮想オブジェクトを移動させる回数が多い程，1 試行の完了時間が長くなると考えた．従って，1 試行ごとの操作が完了した時にターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した回数を取得した．

4.6.2 作業負荷の評価

システムの作業負荷を評価するため，NASA-TLX を用いた．NASA-TLX では，知的・知覚的要求／身体的要求／タイムプレッシャー／作業成績／努力／フラストレーションの 6 項目についての評定点と，それらの項目に対し一対比較して得られた重みを用い，作業負荷を算出する．本実験において，作業負荷の 6 項目の評価には表 4.1 の質問を利用した．

また，ゴリラアーム問題の軽減に貢献したかを調べるために，手法条件ごとに腕をどの程度上げて操作しているか確認する必要があると考えた．そのため，ビデオ画像公開についての承諾書に承諾した実験参加者に対し，実験を実施している所を撮影した．実験の撮影は，実験参加者の視界に映らないようにするために，実験参加者の後方から撮影を行った．

表 4.1: 本実験にて利用した NASA-TLX の質問項目．

	質問項目
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ざっぱでよかったですか
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．作業はラクでし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か，休み休みできましたか働きづめでしたか
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，それとも速くて余裕のないものでしたか
作業成績	作業指示者 (またはあなた自身) 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
努力	作業成績のレベルを達成・維持するために，精神的・身体的にどの程度いっしょうけんめいに作業しなければなりませんでしたか
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

4.6.3 ユーザビリティの評価

システムのユーザビリティを評価するため，SUS を用いた．SUS は 10 項目の質問から成り，5 段階のリッカート尺度によって回答する．この結果をもとに満点が 100 点の得点が算出される．本実験にて利用した SUS のアンケート項目を表 4.2 に示す.

表 4.2: 本実験にて利用した SUS の質問項目.

	質問項目
Q1	このシステムをしばしば使いたいと思う
Q2	このシステムは不必要なほど複雑であると感じた
Q3	このシステムは容易に使えると思った
Q4	このシステムを使うのに技術専門家のサポートが必要とするかもしれない
Q5	このシステムにあるさまざまな機能がよくまとまっていると感じた
Q6	このシステムでは、一貫性のないところが多くあったとおもった
Q7	たいていのユーザは、このシステムの仕様方法について、素早く学べるだろう
Q8	このシステムはとても扱いにくいと思った
Q9	このシステムを使うのに自信があると感じた
Q10	このシステムを使い始める前に多くのことを学ぶ必要があった

第5章　実験結果

本章では，4 章にて述べた実験における各評価項目の結果を示し，考察を行う．なお，各データに対して正規性の検定に Shapiro-Wilk 検定を用いた．その結果，正規性があるデータに対しては ANOVA 検定，正規性がないデータに対してはフリードマン検定を用いた．また，本研究の各検定において，p 値が 0.05 未満であることを統計的に有意とみなした．

5.1　操作時間

本節では，1 セッションの完了時間，1 試行ごとの完了時間，および 1 試行ごとの操作が完了した時にターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した回数について分析を行った．

5.1.1　1 セッションの完了時間

各手法条件における 1 セッションの完了時間を図 5.1 に示す．1 セッションの完了時間の平均は，提案手法 254.0 秒（SD=81.3），簡易提案手法 200.8 秒（SD=48.4），ハンドレイ手法 317.2 秒（SD=88.8）であった．フリードマン検定を行った結果，有意差が見られた（p<0.001）．Bonferroni 補正した Wilcoxon の符号順位検定の結果，提案手法-簡易提案手法間（p=0.004, d=0.471），提案手法-ハンドレイ手法間（p=0.003，d=0.475），簡易提案手法-ハンドレイ手法間（p<0.001，d=0.776）に有意差が見られた．

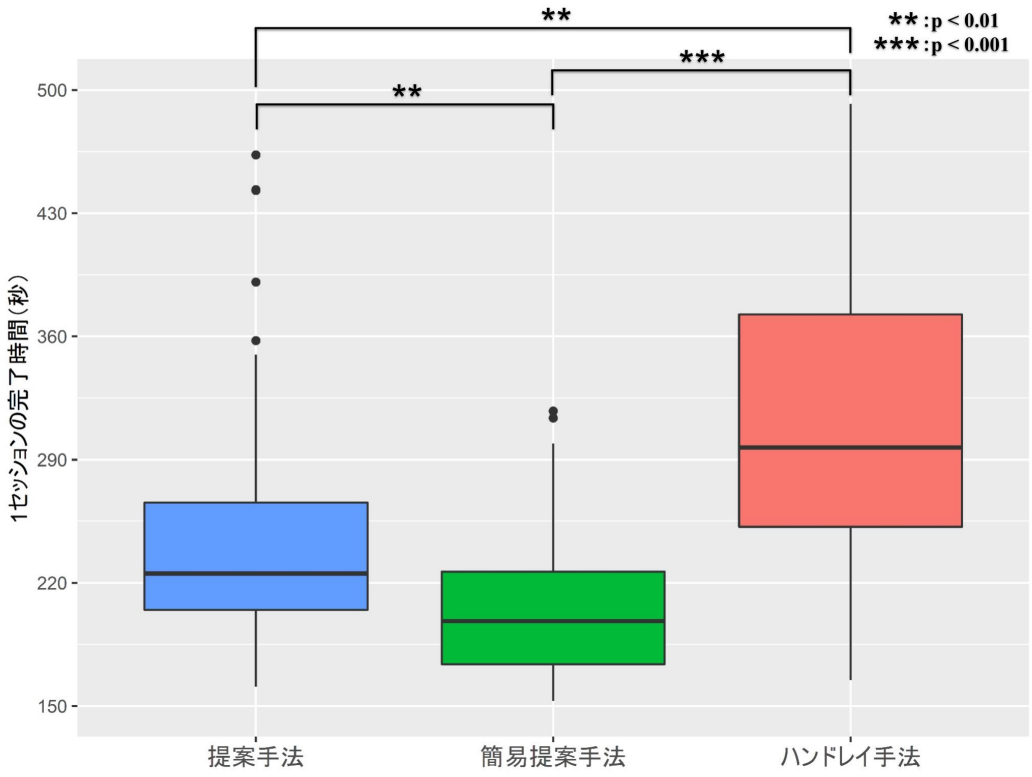


図 5.1: 各手法条件における 1 セッションの完了時間.

5.1.2 1 試行ごとの完了時間およびその時にターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した回数

本実験において，オクルージョン問題の影響を受けている時，1 試行の完了時間が長くなると考えた．そのため，初めにオクルージョン問題の影響を受けていると考えられるオクルージョン率を調査した．各オクルージョン率ごとの 1 試行におけるターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した平均回数のグラフを図 5.2 に示す．

オクルージョン率 80%未満の時，ターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した平均回数は，全ての手法条件において 1 回未満であった．一方，オクルージョン率 80%以上の時，ターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した平均回数は，簡易提案手法およびハンドレイ手法において 1 回以上であった．オクルージョン率 80%以上の時，ターゲットが他の仮想オブジェクトによって遮蔽され選択が困難であるため，実験参加者はターゲットを選択するためにターゲットを遮蔽する他の仮想オブジェクトを先に選択し，移動させる作業を行ったと考えられる．従って，ターゲットのオクルージョン率が 80%以上の時にオクルージョン問題の影響を受けると考えたため，1 試行ごとの完了時間およびターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した回数は，オクルージョン率 80%未満の時とオクルージョン率 80%以上の時についての結果を示す．

オクルージョン率が 80%未満の時，各手法条件における 1 試行ごとの完了時間を図 5.3 の左図に示す．1 試行の完了時間の平均は，提案手法 6.17 秒（SD=4.59），簡易提案手法 3.32 秒（SD=2.53），ハンドレイ手法 5.61 秒（SD=3.26）であった．フリードマン検定を行った結果，有意差が見られた（p<0.001）．Bonferroni 補正した Wilcoxon の符号順位検定の結果，提案手法-簡易提案手法間（p<0.001，d=0.668），提案手法-ハンドレイ手法間（p=0.015，d=0.065），簡易提案手法-ハンドレイ手法間（p<0.001，d=0.648）に有意差が見られた．

オクルージョン率が 80%以上の時，各手法条件における 1 試行ごとの完了時間を図 5.3 の右図に示す．1 試行の完了時間の平均は，提案手法 11.8 秒（SD=11.3），簡易提案手法 13.5 秒（SD=10.3），ハンドレイ手法 20.3 秒（SD=16.7）であった．フリードマン検定を行った結果，有意差が見られた（p<0.001）．Bonferroni 補正した Wilcoxon の符号順位検定の結果，提案手法-簡易提案手法間（p=0.032，d=0.086），提案手法-ハンドレイ手法間（p<0.001，d=0.356），簡易提案手法-ハンドレイ手法間（p<0.001，d=0.270）に有意差が見られた．

オクルージョン率が 80%未満の時，各手法条件の 1 試行におけるターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した回数を図 5.4 の左図に示す．ターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した回数の平均は，提案手法 0.02 回（SD=0.17），簡易提案手法 0.37 回（SD=1.03），ハンドレイ手法 0.33 回（SD=0.84）であった．フリードマン検定を行った結果，有意差が見られた（p<0.001）．Bonferroni 補正した Wilcoxon の符号順位検定の結果，提案手法-簡易提案手法間（p<0.001，d=0.257），提案手法-ハンドレイ手法間（p<0.001，d=0.247）に有意差が見られた．

オクルージョン率が 80%以上の時，各手法条件の 1 試行におけるターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した回数を図 5.4 の右図に示す．ターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した回数の平均は，提案手法 0.09 回（SD=0.37），簡易提案手法

5.37 回（SD=5.44），ハンドレイ手法 4.69 回（SD=4.59）であった．フリードマン検定を行った結果，有意差が見られた（p<0.001）．Bonferroni 補正した Wilcoxon の符号順位検定の結果，提案手法-簡易提案手法間（p<0.001，d=0.909），提案手法-ハンドレイ手法間（p<0.001，d=0.932）に有意差が見られた．

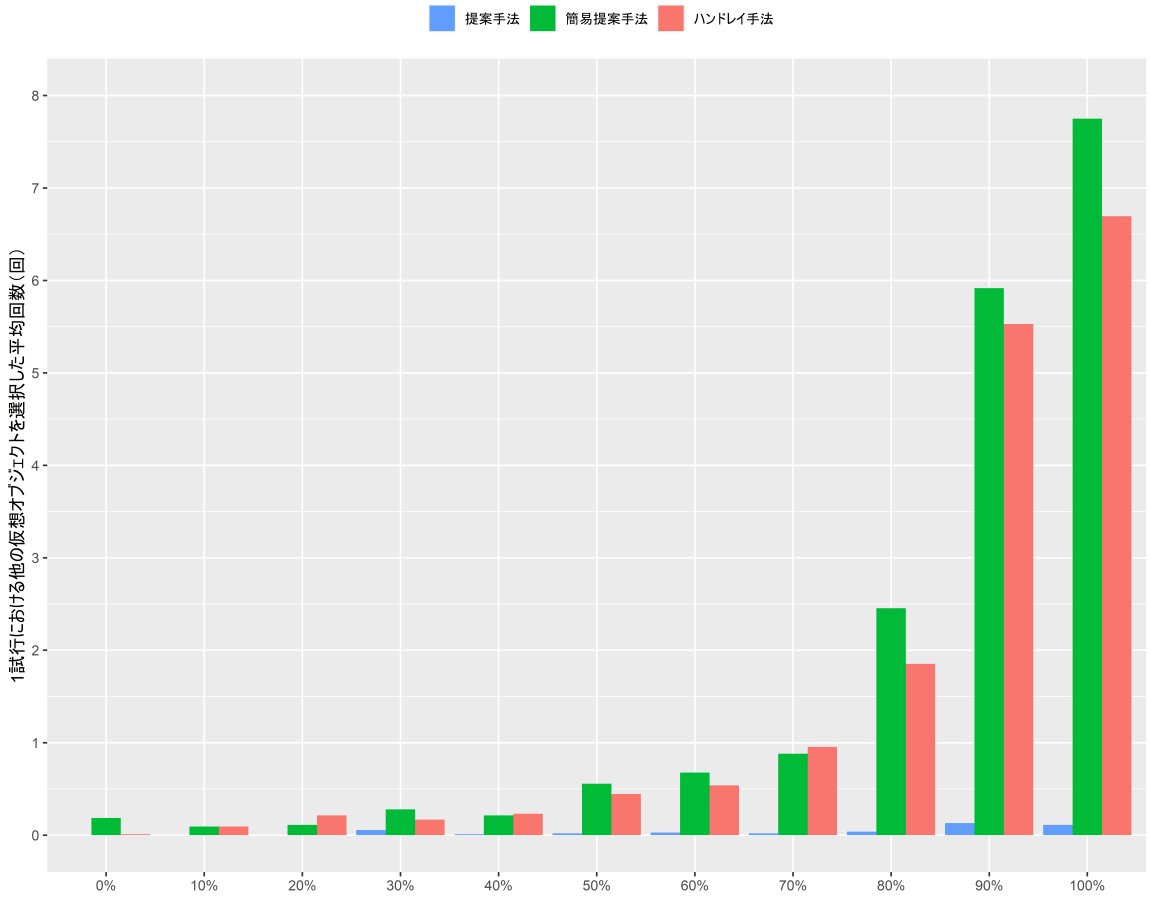


図 5.2: 各手法条件におけるターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した平均回数．

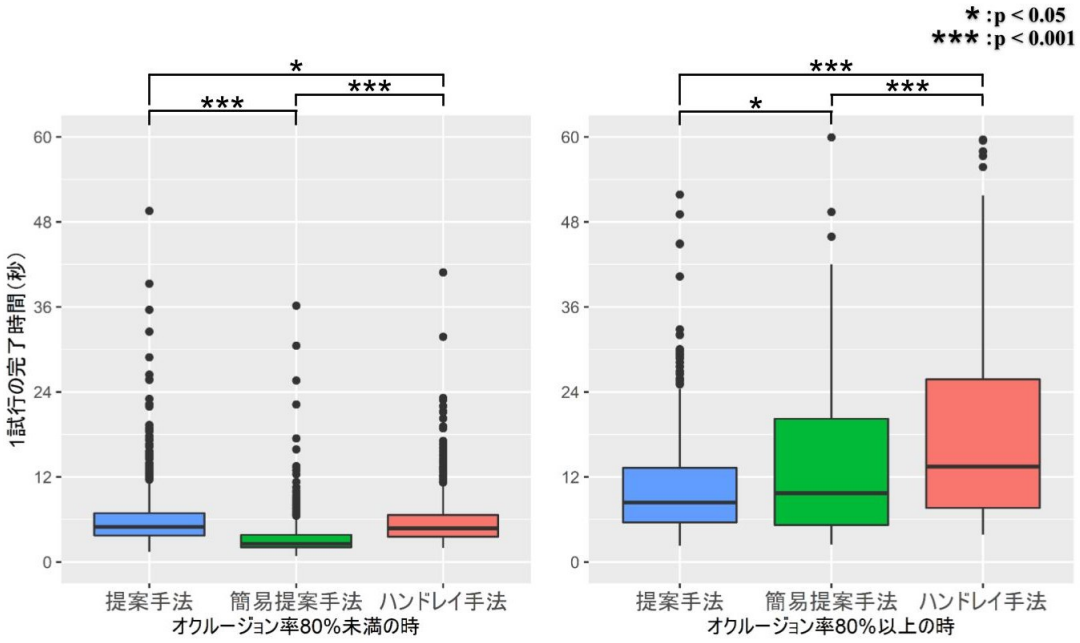


図 5.3: 左図：オクルージョン率 80 %未満の時における 1 試行の完了時間．右図：オクルージョン率 80%以上の時における 1 試行の完了時間.

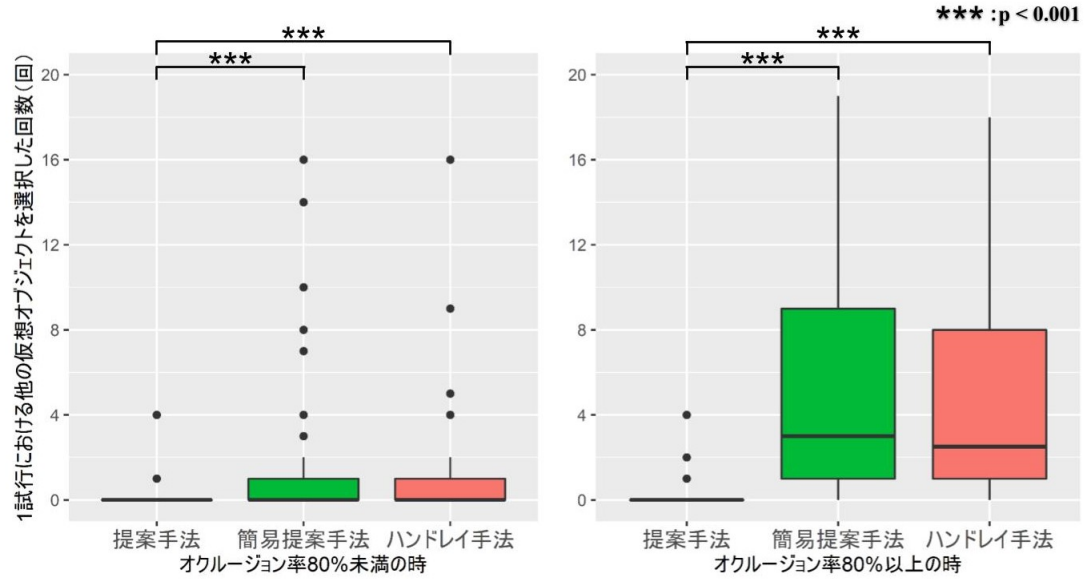


図 5.4: 左図：オクルージョン率 80 %未満の時の 1 試行におけるターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した回数．右図：オクルージョン率 80%以上の時の 1 試行におけるターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した回数.

5.2　作業負荷の評価

本節では，システムの作業負荷を評価するため，NASA-TLX を用いた．各項目の結果，およびそれらに基づき算出された NASA-TLX の総合的な作業負荷の結果を示す．各手法条件における NASA-TLX の総合スコアを図 5.5 に示す．総合的な作業負荷のスコア平均は，提案手法 60.5（SD=16.7），簡易提案手法 54.2（SD=15.5），ハンドレイ手法 71.3（SD=14.3）であった．ANOVA 検定を行った結果，有意差が見られた（p=0.035）．Tukey 検定の結果，簡易提案手法-ハンドレイ手法間（p=0.029，d=1.15）に有意差が見られた．

各手法条件における各項目の作業負荷スコアを図 5.6 に示す．身体的要求の項目に関して ANOVA 検定を行った結果，有意差が見られた（p<0.001）．Tukey 検定の結果，提案手法-ハンドレイ手法間（p<0.001，d=1.70），簡易提案手法-ハンドレイ手法間（p<0.001，d=2.00）に有意差が見られた．

また，実験参加者が実験を行っている時の操作姿勢を図 5.7 に示す．全ての実験参加者の操作姿勢において，提案手法および簡易提案手法の操作姿勢は同じであった．

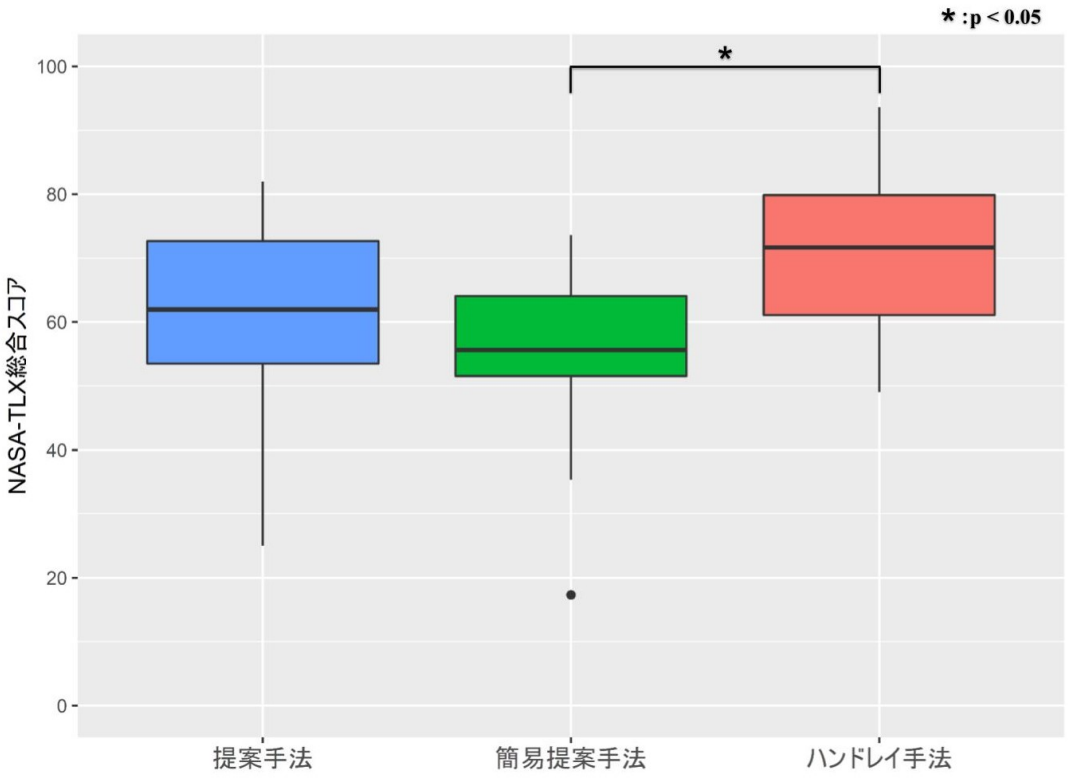


図 5.5: 手法条件ごとにおける NASA-TLX の結果．スコアが高い程，負荷が高いことを示す．

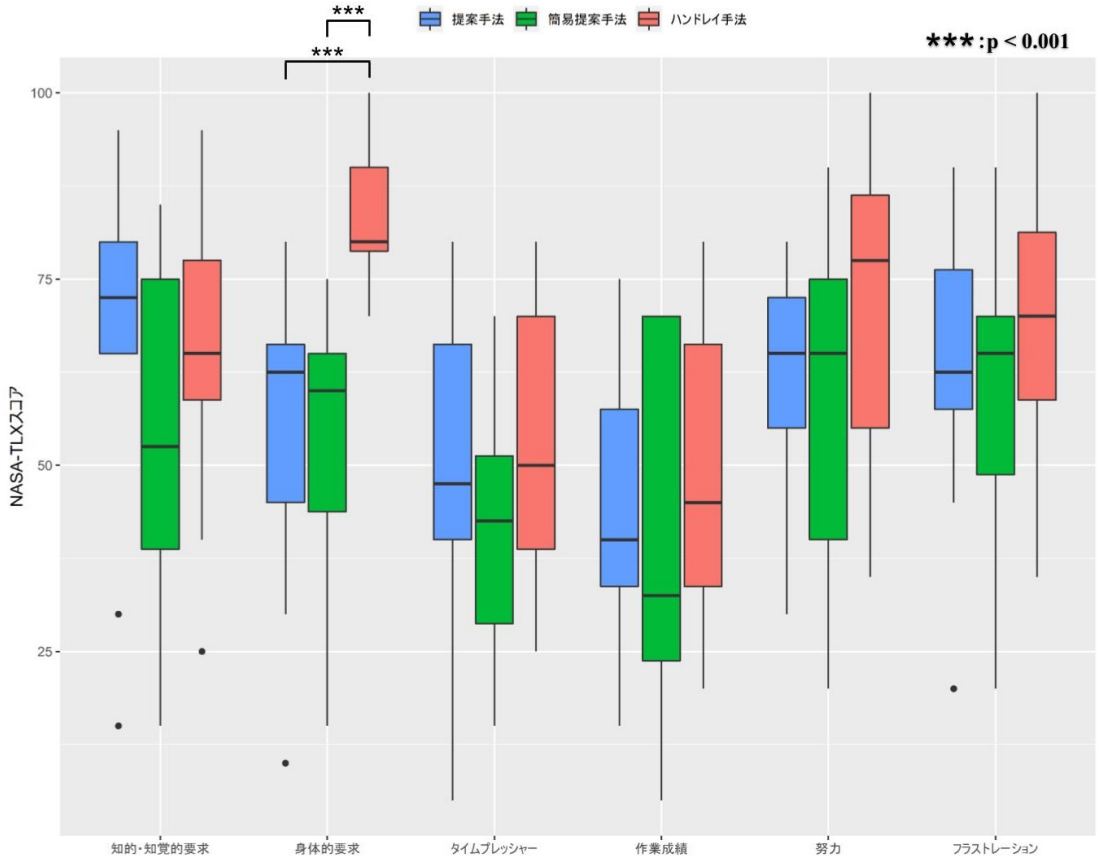


図 5.6: 各項目の結果．スコアが高い程，その項目の負荷が高いことを示す．

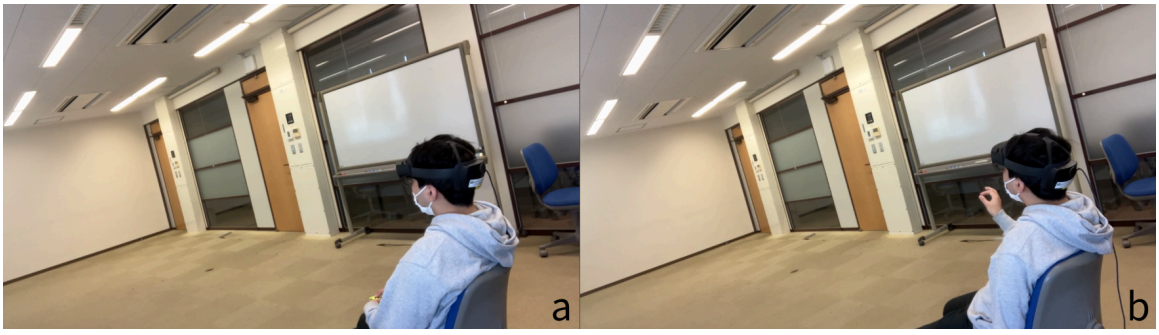


図 5.7: a：提案手法または簡易提案手法の時，Joy-Con を右手に持ち，操作をしている実験参加者の姿勢．b：ハンドレイ手法の操作をしている実験参加者の姿勢．

5.3 ユーザビリティ

各手法条件におけるユーザビリティを評価するため，SUS を用いた．各項目の結果，およびそれらに基づき算出された SUS の総合的なユーザビリティの結果を示す．SUS の総合スコアを図 5.8 に示す．SUS のスコア平均は，提案手法 61.7（SD=17.0），簡易提案手法 79.0（SD=11.9），ハンドレイ手法 61.9（SD=18.6）であった．フリードマン検定を行った結果，有意差が見られた（p=0.017）．Bonferroni 補正した Wilcoxon の符号順位検定の結果，提案手法-簡易提案手法間（p=0.029，d=0.611），簡易提案手法-ハンドレイ手法間（p=0.020，d=0.507）に有意差が見られた．

各手法条件における各項目の SUS スコアを図 5.9 に示す．「Q1：このシステムをしばしば使いたいと思う」の項目に関してフリードマン検定を行った結果，有意差が見られた（p=0.002）．Bonferroni 補正した Wilcoxon の符号順位検定の結果，簡易提案手法-ハンドレイ手法間（p=0.017, d=0.729）に有意差が見られた．「Q8：このシステムはとても扱いにくいと思った」の項目に関してフリードマン検定を行った結果，有意差が見られた（p<0.001）．Bonferroni 補正した Wilcoxon の符号順位検定の結果，提案手法-ハンドレイ手法間（p=0.025, d=0.604），簡易提案手法-ハンドレイ手法間（p=0.024, d=0.701）に有意差が見られた．「Q9：このシステムを使うのに自信があると感じた」の項目に関してフリードマン検定を行った結果，有意差が見られた（p=0.01）．Bonferroni 補正した Wilcoxon の符号順位検定の結果，簡易提案手法-ハンドレイ手法間（p=0.038, d=0.590）に有意差が見られた．

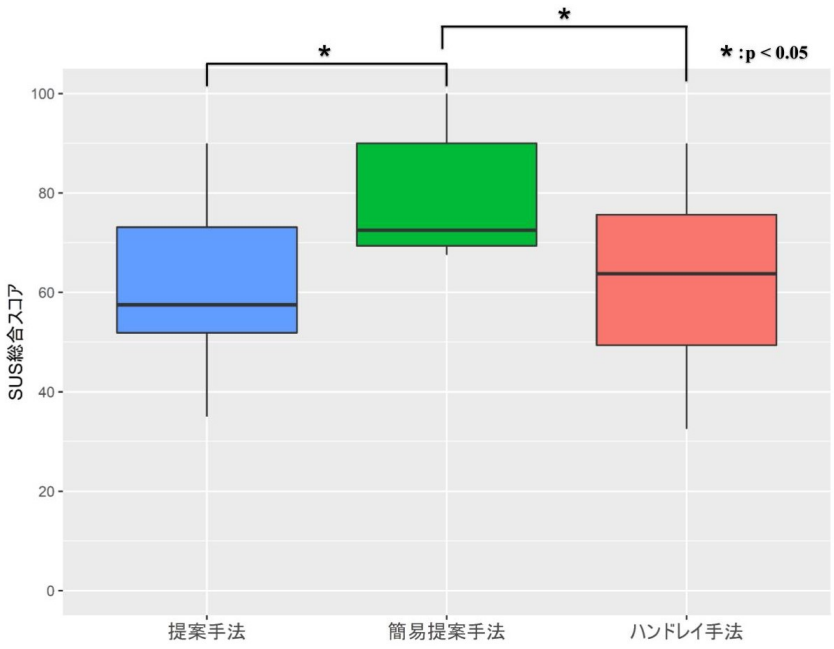


図 5.8: 手法条件ごとにおける SUS の結果．スコアが高い程，ユーザビリティが高いことを示す．

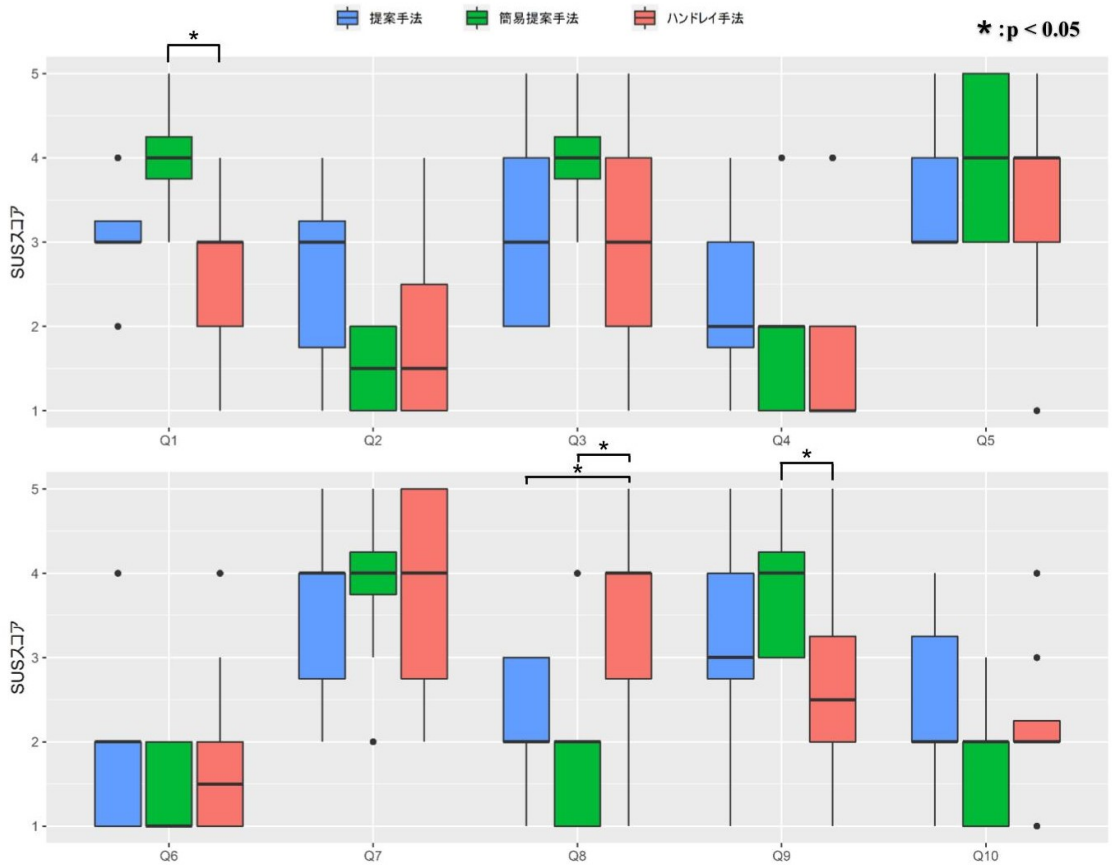


図 5.9: SUS における各質問項目の結果を示す．奇数項目は値が高い程，ユーザビリティが高い．偶数項目は値が低い程，ユーザビリティが低い．

5.4　自由記述アンケート

本節では，各手法条件に対する良い点，悪い点，およびその他感想についてを示す.

5.4.1　提案手法

提案手法の良い点として,「腕が疲れない.」,「オクルージョン率が高いときに不必要に仮想オブジェクトをどかす作業がいらない.」,「レイを伸ばして仮想オブジェクトを半透明にすることで，多くの仮想オブジェクトに対して一斉に確認できたこと.」が挙げられる．一方悪い点として,「ターゲットを探す際に一度レイを手前に戻してからじゃないと探しづらかった.」,「完全にオクルージョンしているものを選択する場合，赤色になったものが手前のものなのか，後ろのものなのか分かりづらかった．また，細かい位置の調整ができないときがあり，何度もボタンを押しなおした.」が挙げられた．その他感想として,「速度が 2 段階しかなかったので，押し込み加減などである程度速度をコントロール出来たらもう少し早く選択できた.」が挙げられた.

5.4.2　簡易提案手法

簡易提案手法の良い点として,「腕が疲れない.」,「視線とボタン 1 つだけだったため，操作を覚えるのが簡単だった.」,「自動で奥行方向の長さを調節してくれるのが良かった.」が挙げられた．一方悪い点として,「ターゲットの前の仮想オブジェクトをどかす必要があるとき，視線をいちいち動かす必要があり，大きな疲労であった.」,「重なっている仮想オブジェクトをどかさないと後ろにターゲットがあるかわからない.」が挙げられた．その他感想として,「ターゲットに重なる球が増えるに従って操作が大変になると思う.」が挙げられた.

5.4.3　ハンドレイ手法

ハンドレイ手法の良い点として,「手からレイが出るため分かりやすい.」,「操作が単純だった.」が挙げられた．一方悪い点として,「腕が疲れる.」,「オクルージョン率が高い時，一つずつ手前の仮想オブジェクトをどける作業が面倒に感じた.」が挙げられた．その他感想として,「ピンチ動作の認識が悪かった.」が挙げられた.

第6章　考察

本章では，5 章の実験結果から得られた結果から，操作時間，身体的負荷，ユーザビリティの考察を行い，最後に本実験の結果に対する考察のまとめについて述べる．

6.1　H1. 操作時間

本実験のタスクにおいてターゲットを選択するまでの過程は，探索フェーズと選択フェーズに分けられると考えられる．探索フェーズではターゲットがどこにあるかを目で認識するまでの過程のことを表し，選択フェーズでは探索フェーズ終了後にターゲットを選択するまでの過程のことを表す．

本節では，オクルージョン率が 80%未満の時における 1 試行ごとの完了時間，およびオクルージョン率が 80%以上の時における 1 試行ごとの完了時間に対する考察，1 セッションの完了時間，および操作時間に対する考察のまとめを行う．

6.1.1　オクルージョン率 80％未満の時における 1 試行ごとの完了時間

オクルージョン率が 80%未満の時の 1 試行ごとの完了時間は，簡易提案手法が提案手法およびハンドレイ手法に対して有意に短く，ハンドレイ手法が提案手法に対して有意に短かった．従って，オクルージョン率 80%未満の時において，操作時間が短い順に簡易提案手法，ハンドレイ手法，提案手法であることが示された．また，オクルージョン率が 80%未満の時の 1 試行におけるターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した回数は提案手法が簡易提案手法およびハンドレイ手法に対して有意に少なく，全ての手法におけるターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した回数の平均は 1 回未満だった．

これらの結果から，オクルージョン率 80%未満の時，ターゲットを選択する前に他の仮想オブジェクトを選択することがほとんどないため，実験参加者はターゲットがどこに存在しているかを理解していたと考えられる．従って，手法条件間における探索フェーズの時間の差が小さいため，オクルージョン率が 80%未満の時における簡易提案手法の 1 試行ごとの完了時間が他の手法に対して有意に短かった要因は，簡易提案手法の選択フェーズの時間が最も短いことであると考えられる．

提案手法は，レイの伸縮を用いて仮想オブジェクトを半透明にする探索フェーズの時間を短縮できる機能が有効でなかった．そのため，オクルージョン率が 80%未満の時の 1 試行ごとの完了時間において，ハンドレイ手法の方が提案手法より有意に短かった要因は，選択フェー

ズにおける時間の差であると考えられる．従って，提案手法が選択フェーズ時に行うターゲットを選択するためのレイの調整をする操作より，ハンドレイ手法が行う仮想オブジェクトに向けてレイを伸ばしてピンチ動作を行う操作の方が選択が速いと考えられる．

6.1.2　オクルージョン率 80%以上の時における 1 試行ごとの完了時間

オクルージョン率 80%以上の時の 1 試行ごとの完了時間は提案手法が簡易提案手法およびハンドレイ手法に対して有意に短く，簡易提案手法がハンドレイ手法に対して有意に短かった．従って，オクルージョン率 80%以上の時において，操作時間が短い順に提案手法，簡易提案手法，ハンドレイ手法であることが示された．また，オクルージョン率が 80%以上の時の 1 試行におけるターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した回数は，提案手法が簡易提案手法およびハンドレイ手法に対して有意に少なかった．

オクルージョン率 80%以上の時，簡易提案手法およびハンドレイ手法は，ターゲットを探すために，ターゲットがあると思われる場所の手前にある仮想オブジェクトを移動させる必要がある．一方，提案手法はレイを伸ばして仮想オブジェクトを半透明にする機能があるため，他の仮想オブジェクトを移動させる必要がない．従って，提案手法は探索フェーズの時間を短縮できるため，オクルージョン率 80%以上の時における提案手法の 1 試行ごとの完了時間が他の手法に対して有意に短くなったと考えられる．

1 試行ごとの完了時間において，簡易提案手法とハンドレイ手法間に有意差が見られた要因は，簡易提案手法の方がハンドレイ手法より選択フェーズの時間が短いことが考えられる．簡易提案手法とハンドレイ手法間において，ターゲットを選択するまでに他の仮想オブジェクトを選択した回数に有意差は見られなかったが，回数の平均は簡易提案手法 5.37 回，ハンドレイ手法 4.69 回であった．従って，オクルージョン率 80%以上の時における簡易提案手法の 1 試行ごとの完了時間がハンドレイ手法よりも有意に短かった要因は，簡易提案手法の方がハンドレイ手法より，他の仮想オブジェクトを選択し，ターゲットが見えるように移動させる作業が速いことであると考えられる．しかし，ターゲット以外の仮想オブジェクトを選択後，移動させる速さに関して，手法条件ごとにどのような差があるかについて実験データからは明確でないため，今後更なる調査が必要である．

6.1.3　1 セッションの完了時間

各手法条件における 1 セッションの完了時間は，提案手法がハンドレイ手法に対して有意に短く，簡易提案手法が提案手法およびハンドレイ手法に対して有意に短かった．従って，操作時間が短い順に簡易提案手法，提案手法，ハンドレイ手法であることが示された．

オクルージョン率が低い時，ターゲットが見えるため，全ての手法条件において探索フェーズの時間の差が現れないと考えられる．実験参加者がターゲットを見つけ，探索フェーズから選択フェーズに移る時，提案手法ではレイの先端をターゲットの奥行座標に合わせ，選択する必要があり，ハンドレイ手法では腕を上げてターゲットに向けてレイを伸ばし，選択す

る必要がある．一方，簡易提案手法では視線方向にレイが無限遠に伸び，レイの直線上に仮想オブジェクトがある時，自動でレイの長さを実験参加者から見て一番手前の仮想オブジェクトに調節するため，実験参加者はターゲットを見ながら選択ボタンを押すことのみで選択が完了する．従って，簡易提案手法の 1 セッションの完了時間が他の手法に対して有意に短かった要因は，簡易提案手法の選択フェーズの時間が最も短いことであると考えられる．

オクルージョン率が高い時，探索フェーズの時間が多くなる．簡易提案手法およびハンドレイ手法ではターゲットを見つけるために，他の仮想オブジェクトを一つずつ移動させる作業が必要である．一方，提案手法ではレイを伸縮させ，仮想オブジェクトを半透明にすることが可能なため，他の仮想オブジェクトを移動させる作業なしにターゲットを見つけることができる．従って，提案手法の 1 セッションの完了時間がハンドレイ手法に対して有意に短かった要因は，提案手法の探索フェーズの時間が最も短いことであると考えられる．

1 セッションの内，多くの割合を占めるオクルージョン率 80%未満の時において，1 試行ごとの完了時間はハンドレイ手法が提案手法に対して有意に短かった一方で，1 セッション全体での完了時間は提案手法がハンドレイ手法に対して有意に短かった．この結果は，提案手法におけるレイの動的伸縮および視覚的フィードバックの機能がオクルージョン率 80%以上の時における完了時間を大幅に短縮したことによって，全体の操作時間が逆転したことを示すと考えられる．

6.1.4 操作時間に対する考察のまとめ

実験結果から，オクルージョン率が 80%以上の時の 1 試行ごとの完了時間において，提案手法は簡易提案手法およびハンドレイ手法に対して有意に操作時間が短かった．従って，ターゲットのオクルージョン率が高い時，提案手法は簡易提案手法およびハンドレイ手法に対して操作時間が短いという仮説 H1 が支持され，オクルージョン問題の軽減に貢献したといえる．また，オクルージョン率が 80%以上の時における 1 試行ごとの完了時間において提案手法が簡易提案手法に対して有意に短いことから，提案手法におけるレイの動的伸縮および視覚的フィードバックがオクルージョン問題の軽減に貢献する要因であることが示されたと考えられる．

H1 の仮説が支持された一方で，オクルージョン率 80%未満の時の 1 試行ごとの完了時間において，提案手法は他の手法よりも有意に長かった．この要因として，多くの実験参加者はターゲットがどこに存在しているかを理解していたことにより，簡易提案手法およびハンドレイ手法においてターゲットを遮蔽する他の仮想オブジェクトを移動させる必要がないため，手法間による探索フェーズの時間の差が小さいことがあげられる．また，選択フェーズにおいて提案手法の操作よりハンドレイ手法の操作の方が速いことが考えられる．従って，オクルージョン率が低い時，レイを無限遠に伸ばし，レイの直線上にある仮想オブジェクトの中からユーザから見て一番手前の仮想オブジェクトに焦点を当てる手法が望ましいと考えられる．

6.2 H2. 身体的負荷

NASA-TLX のスコアに関して，総合的な作業負荷スコアは簡易提案手法がハンドレイ手法に対して有意差に低く，各項目における作業負荷は身体的要求の項目において，提案手法および簡易提案手法がハンドレイ手法に対して有意に低かった．また，有意差としては見られなかったものの，知的・知覚的要求の項目において簡易提案手法のスコアが低いと考えられる．簡易提案手法は，ターゲットに視線を向けてボタンを押すことのみで選択ができる．この操作が容易な点が簡易提案手法の知的・知覚的要求の項目のスコアが低かったことにつながると考える．従って，簡易提案手法の知的・知覚的要求の項目のスコアが低いことおよび，身体的要求の項目のスコアにおいて簡易提案手法がハンドレイ手法に対して有意に低いことが，NASA-TLX の総合スコアにおいて，簡易提案手法がハンドレイ手法に対して有意に低くなった要因であると考えられる．

提案手法および簡易提案手法の自由記述アンケートの結果から,「視線を用いる手法は腕を上げずに済んだため疲れなかった」という回答が得られた．これらの結果と図 5.7 において実験参加者が視線を用いた手法条件の時の操作とハンドレイ手法の時の操作姿勢から，視線を用いた提案手法および簡易提案手法は腕を上げて操作する必要がないため身体的負荷が小さいと考えられる．よって，腕を上げずに操作をすることができるため，ハンドレイ手法に対して身体的負荷が小さいという仮説 H2 は支持され，ゴリラアーム問題の軽減に貢献したといえる．

6.3 H3. ユーザビリティ

SUS のスコアに関して，総合的なユーザビリティは簡易提案手法が提案手法およびハンドレイ手法に対して有意に高かった．一方，提案手法はハンドレイ手法に対して有意差が見られなかった．従って，提案手法はオクルージョン問題およびゴリラアーム問題の軽減の両立に貢献したものの，ユーザビリティにおいてハンドレイ手法に対して有意差が見られず，H3 が支持されなかった．

簡易提案手法の総合スコアがハンドレイ手法に対して有意差にが高いのは，システムの扱いやすさが要因であると考えられる．SUS の各項目の「Q1：このシステムをしばしば使いたいと思う」,「Q8：このシステムはとても扱いにくいと思った」,「Q9：このシステムを使うのに自信があると感じた」において，簡易提案手法がハンドレイ手法に対して有意にスコアが良かった．

簡易提案手法に対する自由記述アンケートでは,「腕が疲れない.」「視線とボタン 1 つだけだったため，操作をおぼえるのが簡単だった.」という回答が得られた一方で，ハンドレイ手法に対する自由記述アンケートでは,「腕が疲れる.」「ピンチ動作の認識が悪かった.」という回答が得られた．これらの結果から，簡易提案手法は，腕を上げずに操作ができ，視線とボタン 1 つという単純な操作であるため,「Q1：このシステムをしばしば使いたいと思う」,「Q9：このシステムを使うのに自信があると感じた」の項目においてハンドレイ手法に対して有意にスコアが良かったと考えられる．

また，ハンドレイ手法は，親指と人差し指を合わせるピンチ動作を行い，仮想オブジェクトを選択する．しかし，このピンチ動作の認識が悪く，仮想オブジェクトを選択することが困難な時があった．一方で簡易提案手法は，ボタンを押すことで仮想オブジェクトの選択ができ，選択が堅牢であった．従って,「Q8：このシステムは扱いにくいと思った」の項目において，簡易提案手法はハンドレイ手法に対して有意にスコアが良かったと考えられる．以上より，簡易提案手法はハンドレイ手法に対してユーザビリティが有意に高いのは，システムが扱いやすかったことが要因であると考えられる．

提案手法と簡易提案手法間において SUS の各項目で有意差が示された項目はなかったが，総合的なユーザビリティは，簡易提案手法が提案手法に対して有意に高かった．簡易提案手法が同じ視線およびコントローラを併用する提案手法に対してユーザビリティが有意に高いのは，ターゲットを選択するまでの過程における操作のしやすさが要因として挙げられる．提案手法は，レイの長さを調整した後にターゲットを選択ができる．一方，簡易提案手法ではターゲットに対して視線を用いて焦点を当てながら選択ボタンを押すことのみで選択ができる．

提案手法に対する自由記述アンケートでは,「ターゲットを探す際に一度レイを手前に戻してからじゃないと探しづらかった.」という回答が得られた．実験ではターゲットを選択後（図 6.1a），ターゲットが前回とは異なるオクルージョン率を満たすようにターゲットを含む 16 個の仮想オブジェクトがランダムに再配置される．この時レイの長さは，仮想オブジェクトが再配置される前にターゲットを選択した時の長さを維持している．これにより，再配置された仮想オブジェクトがレイの先端より手前にある場合，半透明な状態として現れるため，実験参加者はターゲットを含む仮想オブジェクト 16 個全てが見えないことがほとんどであった（図 6.1b）．そのため実験参加者は，全ての仮想オブジェクトを半透明から元の色に戻すためにレイを手前に縮める必要があった（図 6.1c）．

また,「完全にオクルージョンしているものを選択する場合，赤色になったものが手前のものなのか，後ろのものなのか分かりづらかった．また，細かい位置の調整ができないときがあり，何度もボタンを押しなおした.」という回答が得られた．

このアンケート回答の前半部分に関しては，オクルージョン率 100%の時の操作であり，レイを伸ばしてターゲットの手前にある仮想オブジェクトを半透明にし，裏にあるターゲットを選択する時の場面である．この時，レイの先端と接触しているのがターゲットを遮蔽する他の仮想オブジェクトである時，実験参加者からは，赤色の仮想オブジェクトのみ確認できる（図 6.2a）．レイの先端の位置がターゲットを遮蔽する他の仮想オブジェクトより奥にあり，ターゲットより手前にある時，実験参加者からは，青色のターゲットとその手前にある半透明な仮想オブジェクトが確認できる（図 6.2b）．レイの先端と接触しているのがターゲットである時，実験参加者からは，赤色の仮想オブジェクト（ターゲットの色が赤色に変化したもの）とその手前にある半透明な仮想オブジェクトが確認できる（図 6.2c）．従って，提案手法の操作に慣れることによって，操作における混乱が解消されると考える．

アンケート回答の後半部分に関しては，ターゲットを選択できる範囲が小さいことが原因であると考える．実験空間内における全ての仮想オブジェクトは直径 15cm と小さく，その仮想オブジェクトを選択するためには，速い遅いの二段階のみ設定されているレイの伸縮速度

を用いてレイの先端とターゲットを接触させ，選択しなければならない．そのため，上記のようにアンケート回答した実験参加者はターゲットに対してレイを伸ばし，ターゲットが半透明になったらレイを縮ませ，選択可能状態を表す赤色ではなくターゲットの色である青色になった場合，またレイを伸ばすといった位置の調整を繰り返し行なっていたと考えられる．また提案手法に対する自由記述アンケートにおいて「速度が 2 段階しかなかったので，押し込み加減などである程度速度をコントロール出来たらもう少し早く選択できた.」という回答が得られた．従って，今後レイの伸縮速度を改善することで提案手法のユーザビリティが向上すると考えられる．

以上のことから，簡易提案手法が提案手法に対して有意にユーザビリティが高い要因は，奥行き方向のレイの調整が必要なく操作がしやすいところであり，提案手法はレイの奥行き操作を改善することによってユーザビリティを向上することができると考えている．

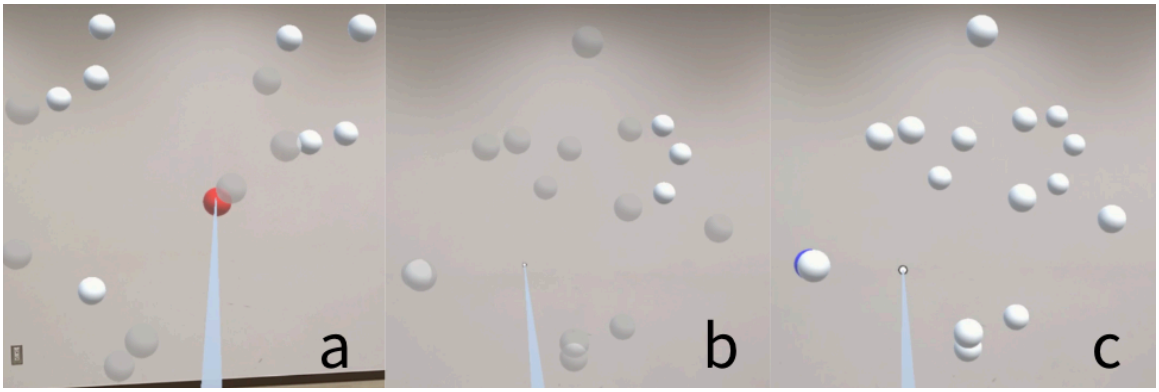


図 6.1: a：実験参加者がターゲットを選択する時．b：レイの長さは，仮想オブジェクトが再配置される前にターゲットを選択した時の長さを維持しているため，レイの先端より手前にあるターゲットを含む仮想オブジェクトが半透明になっている．c：実験参加者がレイの先端を手前に縮めることによって，半透明になっていた仮想オブジェクトが元の色に戻る．

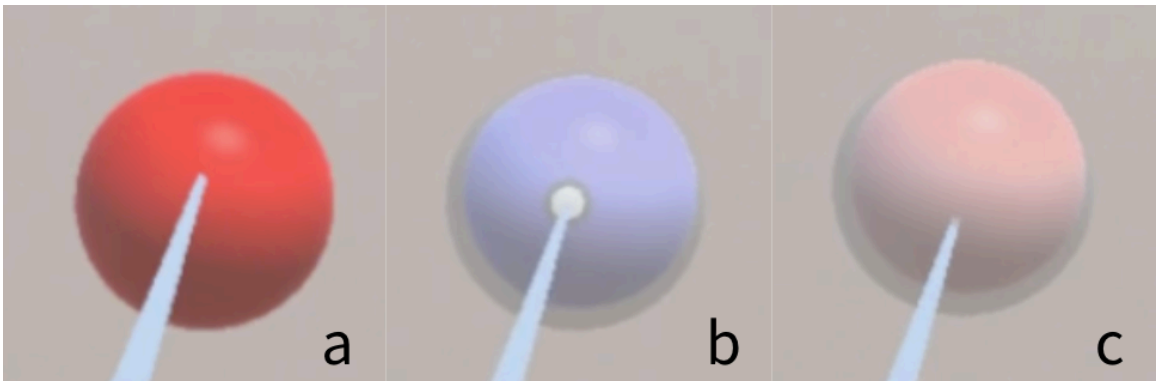


図 6.2: オクルージョン率 100%の時における a：レイの先端がターゲットを遮蔽する他の仮想オブジェクトと接触している時の実験参加者からの見え方．b：レイの先端がターゲットを遮蔽する他の仮想オブジェクトより奥にあり，ターゲットより手前にある時の実験参加者からの見え方．c：レイの先端がターゲットと接触している時の実験参加者からの見え方．

6.4 本実験の結果に対する考察のまとめ

本研究では，以下の 3 点の仮説を設定し，検証を行った（再掲）．

- H1. ターゲットのオクルージョン率が高い時，提案手法は簡易提案手法およびハンドレイ手法に対して操作時間が短い．
- H2. 提案手法および簡易提案手法は腕を上げずに操作をすることができるため，ハンドレイ手法に対して身体的負荷が小さい．
- H3. オクルージョン問題およびゴリラアーム問題の軽減に貢献することにより，提案手法，簡易提案手法，ハンドレイ手法の順にユーザビリティが高い．

H1 について，オクルージョン率 80%以上の時における 1 試行ごとの完了時間の結果から，提案手法は簡易提案手法およびハンドレイ手法に対して操作時間が有意に短かった．よって，H1 は支持され，提案手法はオクルージョン問題の軽減に貢献したと考えられる．またこの結果により，提案手法におけるレイの動的伸縮および視覚的フィードバックがオクルージョン問題の軽減に貢献する要因であることが示されたと考えられる．

H2 について，NASA-TLX の身体的要求の項目において，提案手法および簡易提案手法はハンドレイ手法に対して有意に小さかった．これは図 5.7 において実験参加者が視線を用いた手法条件時の操作とハンドレイ手法の時の操作姿勢から，提案手法は HMD デバイスのトラッキング範囲内で腕を上げて操作するハンドレイ手法とは異なり，腕を下げたままの状態で操作ができる点が，身体的要求の項目において有意に小さかった要因であると考えれられる．よって，H2 は支持され，ゴリラアーム問題の軽減に貢献したと考えられる．

H1 および H2 が支持されたものの，H3 について提案手法のユーザビリティはハンドレイ手法に対して有意差が見られなかった．一方，簡易提案手法は提案手法およびハンドレイ手法

に対してユーザビリティが有意に高かった．簡易提案手のユーザビリティが高かった要因は，操作が単純でありシステムが扱いやすいことであると考えられる．従って，提案手法の操作が複雑であることがユーザビリティの低下につながり，ハンドレイ手法に対して有意差が見られなかったと考えられる．よって H3 は支持されなかった．

以上の結果より，提案手法は，オクルージョン問題およびゴリラアーム問題の軽減の両立に貢献した．また，1 セッションの完了時間の結果より，AR 空間内において一般的に用いられるハンドレイ手法より有意に短いことから，AR 空間内での仮想オブジェクトの選択に視線およびコントローラを併用する本研究のアプローチは妥当性を有すると考えられる．しかし，ユーザビリティにおいて H3 が支持されなかったため，ユーザビリティを高くするためのシステム改善を行うべきであると考える．

第7章　今後の課題

本実験によって提案手法の有用性を確かめることができた．しかし，提案手法の更なる有用性を主張するためには実験の追加，システムの改善，およびアプリケーションの評価が必要であると考えられる．

7.1　実験の追加

今回の実験タスクは選択タスクであった．ターゲットを探索し，その後選択する過程おいて提案手法は，ハンドレイ手法に対して操作時間が短く提案手法の有用性を示した．しかし，仮想オブジェクトの選択後の操作における提案手法とハンドレイ手法の比較評価を本実験では実施していない．従って，今後はターゲットを探索し選択した後，指定された位置に移動し，指定された角度およびスケールに変更するドッキングタスクを行い，AR 空間にて一般的に用いられるハンドレイ手法との比較評価をするべきであると考えている．

また，本実験では操作を行う仮想オブジェクトは球だけであったが，実際に提案手法を利用する時は様々な形状の仮想オブジェクトを操作することが想定される．そのため，複数の異なる形状の仮想オブジェクトを用いて実験を行う必要があると考える．

7.2　システムの改善

本実験の結果から，オクルージョン率が低い時の提案手法の操作時間は他の手法より有意に長く，提案手法の選択フェーズの時間が長いことに原因があることが分かった．オクルージョン率が低い時において，提案手法のレイを伸ばして仮想オブジェクトを半透明にする機能は有効でないと考えられる．

従って，オクルージョン率が低い時における提案手法の選択フェーズの時間を短縮するために，提案手法と簡易提案手法を切り替える機能を組み込む必要があると考える．これにより，低いオクルージョン率の時は簡易提案手法の機能であるレイを無限遠に伸ばし，レイの長さを自動で調節してターゲットの選択を行う．一方，高いオクルージョン率の時は提案手法の機能であるレイを伸ばして仮想オブジェクトを半透明にし，ターゲットの選択を行う．このように，オクルージョン率ごとによって提案手法と簡易提案手法を切り替えることで操作時間を短縮することができる．また，提案手法の自由記述アンケートから,「ターゲットを探す際に一度レイを手前に戻してからじゃないと探しづらかった.」という問題は，半透明になっている仮想オブジェクトの中からユーザから見て一番手前にある仮想オブジェクトに焦点を

当て，提案手法から簡易提案手法に切り替えることにより，レイの先端がその仮想オブジェクトの位置に自動で移動するため，半透明になっていた仮想オブジェクト全てが元の色に戻り，解決できると考えている．その後，低いオクルージョン率である場合は，そのまま簡易提案手法を用いて選択し，高いオクルージョン率である場合は，提案手法に切り替えレイを伸ばし，ターゲットを選択することによって操作時間を短縮することができる．

また，提案手法はレイの先端とターゲットを接触させることが難しい点が，提案手法の選択フェーズの時間が長くなる一因であると考える．この問題を解決するために，本研究はバブルカーソル [51] を三次元に拡張した機能を組み込むことが良いと考える．バブルカーソルとは，カーソルの位置をもとにして，常に仮想オブジェクトを 1 つだけ含むようにカーソルの大きさを動的に変更し続ける円のエリアカーソルである．これを先行研究 [2, 3] が取り入れているように，バブルカーソルを三次元に拡張し，レイの先端から最も近い仮想オブジェクトを 1 つ選択可能な状態にすることにより，レイの先端を仮想オブジェクトに接触することなく選択することができるため，提案手法の選択フェーズの時間の短縮をすることができる．

その他に提案手法は，レイの伸縮速度を改善する必要がある．提案手法に対する自由記述アンケートでは「速度が 2 段階しかなかったので，押し込み加減などである程度速度をコントロール出来たらもう少し早く選択できた.」と回答があったように，現在の実装では速度は二段階であり，それぞれのレイの速度は一定であった．従って，今後レイの伸縮速度は Baloup ら [2] が実装したように，伝達関数を用いることが望ましいと考える．

今後ドッキングタスクを行うことを想定し，仮想オブジェクトの回転およびスケールの機能を追加する必要がある．さらに，現在コントローラで行われているところをハンドジェスチャに代替する必要がある．その際，ハンドレイ手法に対する自由記述アンケートに書かれた「ピンチ動作の認識が悪かった.」とあるように，ハンドジェスチャが堅牢に検知できるシステムを探る必要があると考える．

7.3 アプリケーション評価

システムの改善をし，ドッキングタスクの実験を実施した後，その結果に基づいて特定の用途に特化したアプリケーションの実装を行い，その効果の検証を行なっていく．例えば，複数の仮想ウィンドウを一つの箇所に重ならないよう奥行方向を利用して配置し，その状況下で意図したウィンドウを利用することができるかの検証，または両手に実物体のオブジェクトを把持している状態において，視線およびハンドジェスチャを用いた入力を行い，AR 空間内の仮想オブジェクトの操作することによって，両手に持つ実物体オブジェクトと仮想オブジェクトとのインタラクションを行うことができるアプリケーションを実装し，それらを用いた場合の効果を検証などが挙げられる．

第8章　結論

本研究は，視線によるレイの方向制御およびコントローラによる動的伸縮を併用したAR空間内における仮想オブジェクト操作手法を提案した．この手法は，ユーザは腕を下げた状態で操作が可能であり，レイを伸ばし，レイの先端より手前にある仮想オブジェクトを半透明にすることによって，遮蔽されたターゲットを選択し操作することが可能である．この操作方法を用いることによって，オクルージョン問題およびゴリラアーム問題の軽減の両立に貢献できると考えた．本研究では，オクルージョン問題の解決に貢献する先行研究およびゴリラアーム問題の解決に貢献する先行研究を述べ，先行研究より得られた知見に基づき，提案手法の設計指針を述べた．次に，設計指針に基づき提案手法のシステムを作成した．その後，提案手法がオクルージョン問題およびゴリラアーム問題の軽減の両立に貢献するかを調査するために，評価実験を実施した．その結果，提案手法はオクルージョン率が高い時において操作時間が有意に短かった．また，提案手法は，身体的負荷，特に腕への負担が小さいことが明らかになった．従って，提案手法はオクルージョン問題およびゴリラアーム問題の軽減の両立に貢献したことを示した．しかし，オクルージョン率が低い時において操作時間が有意に長いことが示された．今後は実験によって得られた指針に基づき，示された欠点を補完するための機能を追加し，システム設計を完成させる．また，そのシステムを用いたアプリケーションの開発および評価実験を実施する．

謝辞

本研究を進めるにあたり，川口一画先生，志築文太郎先生，高橋伸先生には多くのご指導を頂きました．心より感謝申し上げます．特に川口先生には，日頃より研究の相談において多くのご助言を頂きました．これらの頂いた助言を基に，研究発表および本論文の執筆ができました．先生の熱心なご指導なくしては，これまでの研究成果はありません．多くの成長の機会を頂けたこと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，先輩方には研究生活においてお世話になりました．特に，COMMUNICATION チームの皆様には，チームゼミにおける個人研究に対するご意見，および論文の添削といった研究に関する多くのご支援を頂きました．研究室の皆様のおかげで，充実した研究生活を送ることができました．心から感謝いたします．

また，実験に参加していただいた皆様には，長時間の実験にご協力いただきましたことを大変感謝しております．最後に，研究生活においてお世話になった全ての方々に心より感謝いたします．

参考文献

[1] Tovi Grossman and Ravin Balakrishnan. The design and evaluation of selection techniques for 3d volumetric displays. In *Proceedings of the 19th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '06, pp. 3–12, New York, NY, USA, 2006. Association for Computing Machinery.

[2] Marc Baloup, Thomas Pietrzak, and Géry Casiez. Raycursor: A 3d pointing facilitation technique based on raycasting. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, pp. 1–12, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.

[3] Futian Zhang, Keiko Katsuragawa, and Edward Lank. Conductor: Intersection-based bimanual pointing in augmented and virtual reality. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, Vol. 6, No. ISS, nov 2022.

[4] Difeng Yu, Qiushi Zhou, Joshua Newn, Tilman Dingler, Eduardo Velloso, and Jorge Goncalves. Fully-occluded target selection in virtual reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 26, No. 12, pp. 3402–3413, 2020.

[5] Yuan Chen, Junwei Sun, Qiang Xu, Edward Lank, Pourang Irani, and Wei Li. Global scene filtering, exploration, and pointing in occluded virtual space. In Carmelo Ardito, Rosa Lanzilotti, Alessio Malizia, Helen Petrie, Antonio Piccinno, Giuseppe Desolda, and Kori Inkpen, editors, *Human-Computer Interaction – INTERACT 2021*, pp. 156–176, Cham, 2021. Springer International Publishing.

[6] Regis Kopper, Felipe Bacim, and Doug A. Bowman. Rapid and accurate 3d selection by progressive refinement. In *2011 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 67–74, 2011.

[7] Joong-Jae Lee and Jung-Min Park. 3d mirrored object selection for occluded objects in virtual environments. *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 200259–200274, 2020.

[8] Nianlong Li, Zhengquan Zhang, Can Liu, Zengyao Yang, Yinan Fu, Feng Tian, Teng Han, and Mingming Fan. Vmirror: Enhancing the interaction with occluded or distant objects in vr with virtual mirrors. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.

[9] Juan David Hincapié-Ramos, Xiang Guo, Paymahn Moghadasian, and Pourang Irani. Consumed endurance: A metric to quantify arm fatigue of mid-air interactions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 1063–1072, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.

[10] Johann Wentzel, Greg d'Eon, and Daniel Vogel. Improving virtual reality ergonomics through reach-bounded non-linear input amplification. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, pp. 1–12, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.

[11] Ivan Poupyrev, Mark Billinghurst, Suzanne Weghorst, and Tadao Ichikawa. The go-go interaction technique: Non-linear mapping for direct manipulation in vr. In *Proceedings of the 9th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '96, pp. 79–80, New York, NY, USA, 1996. Association for Computing Machinery.

[12] Kasım Özacar, Juan David Hincapié-Ramos, Kazuki Takashima, and Yoshifumi Kitamura. 3D Selection Techniques for Mobile Augmented Reality Head-Mounted Displays. *Interacting with Computers*, Vol. 29, No. 4, pp. 579–591, 12 2016.

[13] Vildan Tanriverdi and Robert J. K. Jacob. Interacting with eye movements in virtual environments. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '00, pp. 265–272, New York, NY, USA, 2000. Association for Computing Machinery.

[14] Alex Olwal and Steven K. Feiner. The flexible pointer: An interaction technique for selection in augmented and virtual reality. 2003.

[15] Carole Plasson, Dominique Cunin, Yann Laurillau, and Laurence Nigay. A lens-based extension of raycasting for accurate selection in dense 3d environments. In Carmelo Ardito, Rosa Lanzilotti, Alessio Malizia, Helen Petrie, Antonio Piccinno, Giuseppe Desolda, and Kori Inkpen, editors, *Human-Computer Interaction – INTERACT 2021*, pp. 501–524, Cham, 2021. Springer International Publishing.

[16] Lili Wang, Jianjun Chen, Qixiang Ma, and Voicu Popescu. Disocclusion headlight for selection assistance in vr. In *2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 216–225, 2021.

[17] Ludwig Sidenmark, Christopher Clarke, Xuesong Zhang, Jenny Phu, and Hans Gellersen. Outline pursuits: 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.

[18] Xin Yi, Leping Qiu, Wenjing Tang, Yehan Fan, Hewu Li, and Yuanchun Shi. Deep: 3d gaze pointing in virtual reality leveraging eyelid movement. In *Proceedings of the 35th Annual*

ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.

[19] Mingyu Liu, Mathieu Nancel, and Daniel Vogel. Gunslinger: Subtle arms-down mid-air interaction. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software Technology*, UIST '15, pp. 63–71, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.

[20] Barrett Ens, Aaron Quigley, Hui-Shyong Yeo, Pourang Irani, Thammathip Piumsomboon, and Mark Billinghurst. Counterpoint: Exploring mixed-scale gesture interaction for ar applications. In *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '18, pp. 1–6, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.

[21] Tiare Feuchtner and Jörg Müller. Ownershift: Facilitating overhead interaction in virtual reality with an ownership-preserving hand space shift. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18, pp. 31–43, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.

[22] Digital worlds that feel human — ultraleap. `https://www.ultraleap.com/`. (Accessed on 02/01/2023).

[23] Home: Soli. `https://atap.google.com/soli/`. (Accessed on 02/01/2023).

[24] 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.

[25] 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.

[26] 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.

[27] Myungguen 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, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.

[28] Pallavi Mohan, Wooi Boon Goh, Chi-Wing Fu, and Sai-Kit Yeung. Dualgaze: Addressing the midas touch problem in gaze mediated vr interaction. In *2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, pp. 79–84, 2018.

[29] Robert J. K. Jacob. What you look at is what you get: Eye movement-based interaction techniques. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '90, pp. 11–18, New York, NY, USA, 1990. Association for Computing Machinery.

[30] Päivi Majaranta and Kari-Jouko Räihä. 9. text entry by gaze: Utilizing eye-tracking. *Text Entry Systems: Mobility, Accessibility, Universality*, 01 2007.

[31] Ludwig Sidenmark and Hans Gellersen. Eyehead: 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.

[32] 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.

[33] Difeng Yu, Xueshi Lu, Rongkai Shi, Hai-Ning Liang, Tilman Dingler, Eduardo Velloso, and Jorge Goncalves. Gaze-supported 3d object manipulation in virtual reality. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.

[34] Mathias N. Lystbæk, Peter Rosenberg, Ken Pfeuffer, Jens Emil Grønbæk, and Hans Gellersen. Gaze-hand alignment: Combining eye gaze and mid-air pointing for interacting with menus in augmented reality. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, Vol. 6, No. ETRA, may 2022.

[35] 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.

[36] 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 *Augmented Humans 2022*, AHs 2022, pp. 1–9, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.

[37] Jonas Blattgerste, Patrick Renner, and Thies Pfeiffer. Advantages of eye-gaze over head-gaze-based selection in virtual and augmented reality under varying field of views. In *Proceedings*

of the Workshop on Communication by Gaze Interaction, COGAIN '18, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.

[38] Mikko Kytö, Barrett Ens, Thammathip Piumsomboon, Gun A. Lee, and Mark Billinghurst. Pinpointing: Precise head- and eye-based target selection for augmented reality. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 1–14, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.

[39] Yuan Yuan Qian and Robert J. Teather. The eyes don't have it: An empirical comparison of head-based and eye-based selection in virtual reality. In *Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction*, SUI '17, pp. 91–98, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.

[40] Nelusa Pathmanathan, Michael Becher, Nils Rodrigues, Guido Reina, Thomas Ertl, Daniel Weiskopf, and Michael Sedlmair. Eye vs.nbsp;head: Comparing gaze methods for interaction in augmented reality. In *ACM Symposium on Eye Tracking Research and Applications*, ETRA '20 Short Papers, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.

[41] RM Steinman, WB Cushman, and AJ Martins. The precision of gaze. a review. *Human neurobiology*, Vol. 1, No. 2, p. 97—109, 1982.

[42] Lode Vanacken, Tovi Grossman, and Karin Coninx. Multimodal selection techniques for dense and occluded 3d virtual environments. *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 67, No. 3, pp. 237–255, 2009. Current trends in 3D user interface research.

[43] Nintendo Co., Ltd. Joy-Con & controllers. `https://www.nintendo.com/store/hardware/joy-con-and-controllers/`, 2022. (Accessed on 02/01/2023).

[44] Microsoft Corporation. Microsoft HoloLens — Mixed Reality Technology for Business. `https://www.microsoft.com/en-us/hololens`, 2022. (Accessed on 02/01/2023).

[45] Microsoft Corporation. MRTK2 Unity Developer Documentation - MRTK 2 — Microsoft Docs. `https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/mrtk-unity/mrtk2/?view=mrtkunity-2022-05`, 2022. (Accessed on 02/01/2023).

[46] Unity Technologies. Unity Real-Time Development Platform — 3D, 2D VR & AR Engine. `https://unity.com/`, 2022. (Accessed on 02/01/2023).

[47] Hololens 2 の基本操作 — microsoft learn. `https://learn.microsoft.com/ja-jp/hololens/hololens2-basic-usage`. (Accessed on 02/01/2023).

[48] 視覚効果と快適性の向上 — microsoft learn. https://learn.microsoft.com/ja-jp/hololens/hololens-calibration. (Accessed on 02/01/2023).

[49] John Brooke. Sus: A quick and dirty usability scale. *Usability Eval. Ind.*, Vol. 189, , November 1995.

[50] 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.

[51] 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.

著者論文リスト

本論文に関する論文および発表

- 査読あり国際会議論文

    1. Ryo Ishibashi, Ikkaku Kawaguchi. Object Manipulation Method Using Eye Gaze and Hand-Held Controller in AR Space. Proceedings of the 28th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology（VRST'22）, Association for Computing Machinery, December 2022, 2pages, https://doi.org/10.1145/3562939.3565659

- 査読あり国内会議論文

    1. 石橋遼, 田之頭吾音, 井原圭一, 川口一画. AR 空間内における視線およびコントローラを用いたオブジェクト操作手法. 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, 2022 年 12 月, 3pages, https://www.wiss.org/WISS2022Proceedings/data/T04.pdf

その他論文

- 査読あり国際会議論文

    1. Ikkaku Kawaguchi, Ayumi Ichikawa, Keiichi Ihara, Ryo Ishibashi, Aoto Tanokashira. Hybrid Robot with Physical and AR Body Presentation. The 32nd International Conference on Artificial Reality and Telexistence the 27th Eurographics Symposium on Virtual Environments (ICAT-EGVE2022), Association for Computing Machinery, December 2022, 2 pages.

- 査読なし国内会議

    1. 飯塚陸斗, 大山智弘, 杉山将利, 下田康太, 田之頭吾音, 井原圭一, 石橋遼, 川口一画, 動的音高変化による方向提示手法設計のための基礎的調査. 第 27 回一般社団法人情報処理学会シンポジウム（INTERACTION2023）, 情報処理学会, 2023 年 3 月, 5pages（To Appear）.