Vol.2022-HCI-197 No.49
2022/3/16

バーチャルジョイスティックを用いたハンドヘルドARでのレイ操作手法の提案

髙松　大悟[1]　崔　明根[1]　坂本　大介[1]　小野　哲雄[1]

概要：Virtual Reality（VR）においてレイは広く活用されており，拡張性に優れた手法である．一方で，ハンドヘルド Augmented Reality（AR）においては，VR と同様の操作性を有したレイを実装することは難しい．これは，眼前にハンドヘルドデバイスを掲げる必要があるために，ハンドヘルドデバイスを一定以上回転させることが出来ず，VR コントローラが持つ回転の 3 自由度を AR 操作時に表現することが難しいためである．ゆえに本研究では，バーチャルジョイスティックを用いてレイの回転に関する自由度を補完する手法を提案する．本研究では，提案手法のおけるパラメータである，Control Display 比（CD 比）の適切な値の調査を目的とした実験を行った．その結果，適切な CD 比が 3 であることが明らかになった．

キーワード：ハンドヘルドデバイス，Augmented Reality，レイキャスティング

1. 本研究の背景

ハンドヘルド AR における重要な操作の 1 つであるオブジェクト選択において，指を用いて画面に表示されたオブジェクトをタッチすることによる直接選択が広く用いられている．この直接選択は，ハンドヘルドデバイス以外の AR 操作にも広く用いられる直感的で扱いやすい手法である一方，指や他の AR オブジェクトによる Occlusion の問題や，オブジェクトの大きさが指のサイズより小さいために生じる Fat Finger 問題 [1] が存在する [2], [3]．そのためオブジェクトのサイズが小さく，また密集度の高い場所に存在するオブジェクトの直接選択は難しい．そこで画面上のオブジェクトに直接触れることなく選択が可能な，二次元カーソルによる選択手法が提案されている [2], [3]．

本研究においては，画面上のオブジェクトをタッチすることなく選択が可能な手法として，VR において広く用いられている手法であるレイキャスティング [4] によるレイを用いた選択手法に着目した．レイを用いた選択手法では，移動方向の軸による 3 自由度と移動方向の軸周りの回転による 3 自由度の計 6 自由度を持ったデバイスからレイが射出される．ユーザはレイを射出しているデバイスに 6 自由度の入力を行うことによって，レイの射出位置と方向の制御を行う．そして射出されているレイと衝突したオブジェクトを選択する．レイキャスティング手法は拡張性に優れており，様々な研究で広く活用されている [5], [6], [7], [8]．

しかしハンドヘルド AR において，VR と同様の操作性を有したレイを実装することは難しい．ハンドヘルド AR にレイキャスティングを実装する場合，映像を出力するデバイスとレイのコントローラの役割を果たす 6 自由度をもったデバイスが同一になる．また AR 情報を認知するために，眼前にハンドヘルドデバイスを掲げる姿勢を取る必要がある．ゆえに，ハンドヘルドデバイスを一定以上回転させることが出来ず，VR コントローラが持つ回転の 3 自由度をハンドヘルド AR 操作時に表現することが難しい．そのためレイキャスティングを実装する場合，ディスプレイから射出されたレイを移動の 3 自由度のみで制御する必要がある．

そこで本研究ではバーチャルジョイスティックを用いることで，レイ操作における回転に関する自由度を補完する手法を提案する．本稿においては，提案手法におけるパラメータである，CD 比の適切な値の調査を行い，適切な CD 比の考察した．本研究の貢献を以下に要約する．

- ハンドヘルド AR において VR と同様の操作性を有したレイを実装することを目的として，バーチャルジョイスティックを用いたハンドヘルド AR でのレイ操作手法を提案した．
- バーチャルジョイスティックによるレイ操作におけるパラメータである CD 比の適切な値の調査を行った．
- その結果，CD 比 3 が適切な値であることが明らかになった．

[1] 北海道大学

ⓒ 2022 Information Processing Society of Japan

2. 関連研究

2.1 レイキャスティングに関する研究

レイキャスティング [4] を用いたオブジェクト選択手法は，直感的な操作が可能であることや遠距離のオブジェクトを選択できることから，VR において特に広く用いられている．一方で，レイキャスティングにはオブジェクトを選択するにあたって何点か問題が存在する．まず，多くのレイキャスティング手法は射出地点から最も近いオブジェクトを選択するため，ターゲットが他のオブジェクトによって遮蔽されることによって選択が難しくなる（オブジェクト同士による Occlusiton の問題）．また小さいオブジェクトの選択が難しいうえに，レイの射出位置付近の揺れがレイの先端では大きくなってしまい，遠くのオブジェクトの選択が難しい [5], [8], [9].

これらの問題に対処するため，様々な研究がなされている．レイの形状をコーンのような円錐の形にすることで遠方のオブジェクトの選択に容易にした cone-ray[6], [9], [10] が提案されている．また，レイキャスティングによるオブジェクトとの交点に円形のカーソルを投影し，カーソル内に存在するオブジェクトを 4 つに分割した領域を持つ平面に再配置することで Occulusion の問題を軽減した [7]. Grossman ら [5] は，球状の立体ディスプレイと 6 自由度を持つデバイスを用いて，それぞれが異なるオブジェクト選択手法を持つ 4 種類のレイを実装した．このほか，Baloup ら [8] は，レイの上にカーソルを表示しカーソルに最も近いオブジェクトを選択する RayCursor を提案した．トラックパッドを備えた VR コントローラを用いてコントローラの 6 自由度の入力に加えてトラックパッド上で入力を行うことで，レイ上のカーソルに奥行きを持たせ，移動させることを実現した．これによって VR オブジェクト同士による Occlusion の問題の影響を軽減した.

2.2 ハンドヘルド AR におけるオブジェクト選択手法

ハンドヘルド AR において，最も一般的なオブジェクト選択手法は，指を用いて画面に表示されたオブジェクトをタッチすることによる直接選択を行う手法である．この手法ではタッチ位置を射出位置，ハンドヘルドデバイスと AR 空間のオブジェクトの位置の差分を射出方向とする，レイキャスティング [4] による選択が行われている．この手法はハンドヘルドデバイスの AR 以外の操作にも広く用いられている直感的で扱いやすい手法である一方，指や他の AR オブジェクトによる Occlusion の問題やオブジェクトの大きさが指のサイズより小さいために意図しない選択が生じる Fat Finger 問題 [1] が報告されている．

このため，オブジェクトに指で直接触れることなく選択を行う手法として，画面上の任意の点に表示したカーソルを用いてオブジェクトを選択する手法が提案されている [2], [3], [11]．カーソルは画面上の座標に固定されており，ハンドヘルドデバイスを動かすことによって選択を行う．また，固定したカーソルに Bubble Cursor[12] や，Sticky Targets[13]，Target Gravity[14] など，小さなオブジェクトを用意に選択する手法を適用した研究 [3] も存在する．また，カーソルの位置をユーザが動かすことでオブジェクト選択を行う Offset-Ray-Casting のような手法も存在するほか，ハンドヘルドデバイスのカメラや外部デバイスによって手をトラッキングし，その手を用いたジェスチャ認識によって AR オブジェクトを選択する手法も存在する [15], [16].

2.3 ハンドヘルドデバイスにおける回転の 3 自由度の表現

ハンドヘルドデバイスが HMD と VR コントローラの両方の役割を担うハンドヘルド AR においては，AR オブジェクトがハンドヘルドデバイスの画面上に表示されており，ユーザの眼前に表示されている．このため，ハンドヘルドデバイスを一定以上回転させることが出来ず，回転の 3 自由度を AR での操作時にハンドヘルドデバイスの自体の回転によって表現することが難しい．そのため，様々な方法でモバイルデバイスで回転を表現する方法が提案されている．

2.3.1 ボタンによる方法

画面表示したボタンやハンドヘルドデバイスに備えられたボタンを用いることで，回転の 3 自由度を表現することが出来る．Henrysson ら [17] は，携帯電話に備え付けられたキーパッドで回転の 3 自由度を表現することで，AR オブジェクトの移動と回転を行った．Bai ら [18] は，画面上に表示したボタンを選択することによってオブジェクトに対して行う操作と操作方向を定め，指の動きを用いて操作の大きさを定めることで，AR オブジェクトの回転を行った．一方で，この方法は物理ボタンの配置や機能を表すボタンを表示する必要があるため，多くのボタンが必要となってしまう.

2.3.2 カメラや外部デバイスを用いたジェスチャによる方法

ハンドヘルドデバイスに備え付けられたカメラや，ハンドヘルドデバイス以外のデバイスを用いてユーザの手の動きを測定することで，回転の 3 自由度を表現する．Bai ら [15] は，RGB-depth camera を用いて手のジェスチャ認識を行うことで，AR 空間上で手を用いて掴んだ AR オブジェクトに対して移動，回転，拡大縮小を可能とした．Yusof ら [16] はセンサを用いて手をトラッキングし，トラッキングした指からレイを射出することでレイ操作を実現した．しかし，これらの手法は，ハンドヘルドデバイスが表示する AR オブジェクトに対して手を用いて操作を行うた

め，ハンドヘルドデバイスを片手のみで把持する必要がある．片手での把持は把持姿勢が不安定となり，使用中の疲労やハンドヘルドデバイスの落下につながる [19] ため，長期間の使用は好ましくない．

2.3.3 画面上で入力を行う方法

画面上でユーザが操作を行うことで，回転の自由度を表現する．この方法において，ユーザは画面を直接指で触れながら，ジェスチャを行う．例えば Arcball[20] は，オブジェクトの周囲に回転の 3 自由の操作方向を表示し，表示に合わせて画面上でスワイプ動作等の特定の動作を行うことで，オブジェクトを回転させる手法である．この Arcball は Unity の開発画面などの開発の場面や研究でも用いられている．Mossel ら [21] は，画面に表示したボタンによって移動，回転，拡大縮小を行う操作モードの変換を行った後，選択した操作を AR オブジェクトに適用する手法を提案した．この手法では回転操作時に Arcball を用いてオブジェクトを回転させる．これらの手法では，ハンドヘルドデバイスを両手で把持したままレイ操作が可能である．この方法を基にレイ操作における回転に関する自由度の補完を行う．

3. 提案手法

3.1 提案手法

ハンドヘルド AR のレイ操作においては，VR コントローラが持つ回転の 3 自由度を AR 操作時に使用することは難しい．ゆえに本研究では，バーチャルジョイスティックを用いてレイ操作における回転に関する自由度を補完する手法を提案する．本提案手法によって，指で画面上のオブジェクトを触れることなくオブジェクト選択が可能になるほか，ハンドヘルドデバイスにおいて VR と同様の操作性を有したレイを実装することで，VR におけるレイを用いた選択手法をハンドヘルド AR へ実装することが可能になると考えられる．

3.2 実装

ハンドヘルドデバイスの画面上の任意の点をユーザがタッチした時，バーチャルジョイスティックがユーザがタッチした画面上の座標に表示される．ユーザはバーチャルジョイスティックを操作することで，バーチャルジョイスティックに応じた方向にレイを回転させることが出来る．この際，レイの射出位置は固定されている．ターゲットにポインティングを行う場合は，このレイとターゲットが交わるようにレイ操作を行うことでポインティングを行う．

3.3 レイ操作の Control Display 比の設定について

VR におけるレイの場合，コントローラから直接レイが射出されているため，コントローラの位置や回転による変位がレイ操作にそのまま適用される．本実装のように画面上に表示したバーチャルジョイスティックを用いて射出位置の固定されたレイを操作する場合に，入力として与えるバーチャルジョイスティックに与えた基準点からの変位とレイ上の任意の点との画面上での変位の比を CD 比と呼称する．今後は入力として与えた変位が 1 の時にレイ上の任意の点の画面上の変位が N となるような，CD 比を CD 比 N として表記する．本システムを実装した実験監督者が様々な CD 比で提案手法を操作したところ，CD 比が 1 や 2 など小さい時に，画面の端にレイが届かないことがあった．また，CD 比 10 など大きい時にはレイの細かな操作が困難であった．そのため，バーチャルジョイスティックを用いてレイ操作を行う場合，適切な CD 比を調査する必要があると考え，これを調査する実験を行った．

4. 実験

本研究では，提案手法であるバーチャルジョイスティックを用いたレイ操作におけるパラメータである，CD 比の適切な値の調査を目的とした実験を行う．また，オブジェクトのサイズや CD 比による選択速度とエラー率への影響に関する調査も行う．

4.1 実験参加者

実験参加者は大学生・大学院生 12 名（男性 9 名，女性 3 名，平均年齢 22.4 歳，年齢の標準偏差は 1.26 歳）であった．実験参加者全員が右手を用いてハンドヘルドデバイスの操作を行った．実験参加者のスマートフォンの平均利用年数と標準偏差はそれぞれ 8.58 年と 1.75 年であった．また，AR の利用経験があったのは，9 人であった．実験にかかった時間は，アンケートの回答を含めて 40 分程度であった．

4.2 使用機器

実装には Unity を用いた．実験で用いるハンドヘルドデバイスとして，Google Pixel 5（6.0 インチ，2340×1080 ピクセル，432ppi）を用いた．今回の実験では，ハンドヘルド AR 環境として Unity が開発したフレームワークである AR Foundation[*1] を用いた．また，本実験に用いたハンドヘルドデバイスの備え付けられたカメラと Unity 上で設定するカメラの画角が大きく異なっていた．そこで，この 2 つのカメラの画角を合わせるために Unity 上で設定するカメラについて，ハンドヘルドデバイスに備え付けられたカメラの性能を参考に焦点距離 $5.4mm$，レンズのサイズを $7.3mm \times 5.4mm$ に設定して画角を調整した．実験に用いたアプリケーションの frames per second（fps）は，60fps であった．

[*1] https://unity.com/ja/unity/features/arfoundation

4.3 実験デザイン

実験は参加者内実験計画を用いて実施した．独立変数は以下の通りである．

- Control Display 比:CD 比（3, 4, 5, 6, 7, 8）
- ターゲットサイズ:Size（1°, 2.5°, 4°）

ハンドヘルド AR における CD 比の調査を行った研究は我々の知る限り存在しなかった．しかし，ハンドヘルド AR を対象とはしていないが，スマートフォン（縦持ち）を用いて 2 次元的に配置したオブジェクトに対して CD 比の調査を行った研究 [22] で，最もユーザに好まれた CD 比は 3 であった．実験姿勢がスマートフォンの横持ちであることから，本提案手法の最適な CD 比は 3 以上であると考えられること，また本システムを実装した実験監督者の実装での経験や事前に行った実験の結果を反映して，CD 比 3 から 8 の値を独立変数とした．

また，従属変数として以下を記録した．

- 選択時間
- エラー率

選択時間は，実験参加者が画面に触れてから正解ターゲットに対してポインティングを完了した時間として定義し，記録した．また，エラー率は実験参加者が正解ターゲットをポインティングすることができなかった時を選択失敗として定義し，記録した．なお，何もないところを選択した場合も選択失敗とした．

図 1 のように，画面上の座標を縦に 3 等分，横に 6 等分し，画面を計 18 等分し，等分した領域の中心（図 1 の赤点）の各座標を，正解ターゲットの出現位置として，Unity 上で設定した．本研究において，図 1 の配置について，縦方向に上から（1, 2, 3），横方向に左から（A, B, C, D, E, F）と呼称する．

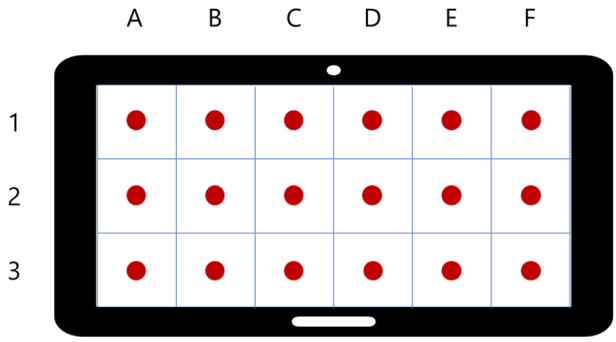

図 1: 正解ターゲットを配置する画面の座標

実験参加者は，CD 比ごとに 3（Size）× 18（正解ターゲットの表示位置）＝ 54 回の選択タスクを行った．Size と正解ターゲットの表示位置の提示順は，独立変数の組み合わせごとにランダムに提示した．この 1 つの CD 比ごとの行う 54 回の選択タスクをセッションと呼称する．CD 比は 6 つあるので合計 6 セッション行った．タスクにおける CD 比の提示順は，標準ラテン方格法を用いて決定した．実験参加者 1 人あたりのタスクは，6（CD 比）× 54（1 つの条件あたりのタスク数）＝ 324 回である．全データ数は 324（実験参加者 1 人当たりのタスク数）× 12（実験参加者数）＝ 3,888 回である．また正解ターゲットに加えて，20 個の偽ターゲットを正解ターゲットと画面上で同じ大きさかつ，正解ターゲットに Occlusion を起こさない画面上のランダムな位置に表示した．

4.4 実験手順

実験を行う部屋の窓を開けて机や使用機器，実験監督者の手指を消毒した状態で，実験参加者の手指の消毒を行った後に椅子に座らせた．まず，実験参加者に実験中は利き手の親指のみ（今回は全て右手）を用いてタスクを行うように説明を行った．その後，使用する腕やスマートフォンの利用歴や AR の利用経験等を問う事前アンケートを記入してもらった．続いて図を用いて実験概要と本実験におけるレイの操作手法について説明を行った．この際，実験参加者にタスク中は正解ターゲットを画面上で見つけてから画面に触れるようにするよう説明した．また，セッションは CD 比ごとに分かれていることを伝えた．この際，実験参加者には CD 比の実際の値は伝えなかった．説明後，レイ操作手法に対して理解を深めるための練習として，実際に提案手法の操作を行ってもらった．. この時，練習はユーザが申告するまで続けられた．練習時の CD 比，Size，正解ターゲットの表示位置については，実際のパラメータから変更したタスクを用いた．その後，各条件について実験参加者にポインティングタスクを行ってもらった．タスク中，実験参加者の疲労軽減のため，タスクは肘をついて行ってもらった．休憩は各セッションの間に任意に取ることができた．すべての条件のセッションが終了した後，好みの CD 比等を問う事後アンケートに回答してもらい，実験終了とした．

実験タスクはポインティングタスクであり，実験参加者が AR 空間に存在する正解ターゲットをバーチャルジョイスティックを用いたレイ操作により選択するタスクである．正解ターゲットとしてピンク色の球を，ハンドヘルドデバイスから約 2.15m 離れた図 1 の画面上の位置に，ハンドヘルドデバイスのカメラに固定して配置した．1 回のタスク中に表示する正解ターゲットは 1 つであり，その正解ターゲットの大きさと位置は，独立変数の組み合わせごとにランダムに提示した．また，正解ターゲットのほかに，偽ターゲットとして白色の球をハンドヘルドデバイスから約 5.15m 離れた位置に画面上にランダムに 20 個表示した．この時偽ターゲットの大きさは正解ターゲットが画面上に表示されている大きさと同じ大きさで画面上にハンドヘルドデバイスのカメラに固定して表示されるように設定

ⓒ 2022 Information Processing Society of Japan

した．本実験のタスクは，AR 空間に表示された正解ターゲットと偽ターゲットの合計 21 個のオブジェクトの中から，正解ターゲットを選択することである．実験参加者は，出来る限り速く，かつ正確に正解ターゲットを選択するよう指示された．

タスク中に行う正解ターゲット選択の流れを記す．ユーザが画面に触れた時，画面中央に半透明な緑色のレイが表示され，また画面の触れた位置に灰色の半透明なバーチャルジョイスティックが表示される．この時，AR 空間上でハンドヘルドデバイスの位置とレイの射出位置が近すぎると，レイが適切に表示されないため，レイの射出位置は画面中央かつハンドヘルドデバイスの画面に対して垂直な方向に 0.15m だけ奥とした．レイの太さは AR 空間上でハンドヘルドデバイス側から見てレイ上の 1.0m の位置で大きさ 0.2° となるように設定した．実験参加者は表示されたバーチャルジョイスティックを目安に，画面に触れたまま指を画面上で移動させることで，レイの方向を操作する．この時，CD 比の基準となるレイ上の位置は，AR 空間上でハンドヘルドデバイス側から見てレイ上の 2.0m の位置である．本実験では，この CD 比の基準となる位置にオブジェクトを完全に覆わないサイズである大きさ 0.8° の半透明な緑色の円形のカーソルを表示した画面上の指の移動による入力について，手や指の震えによってレイが揺れるのを防ぐため，現在のフレームを含めて直近 5 フレーム分の加重平均フィルタを用いて算出した．本実験では選択中オブジェクトの可視化のため，レイとオブジェクトが交わった時にオブジェクトが黄色にハイライトされるように実装した．このため，正解ターゲットがレイと交わって黄色にハイライトされた時に，画面から指を離すことで正解ターゲットの選択が行われる．レイが正解ターゲットと交わった状態で実験参加者が指を画面から離した（選択成功）か，レイが正解ターゲットと交わっていない状態で実験参加者が指を画面から離した（選択失敗）時に画面上のすべてのオブジェクトは消え，独立変数に従った大きさと位置に 21 個のターゲット群が再生成された．また，選択成功と選択失敗の際にそれぞれ約 1 秒の異なる音をフィードバックとして再生した．

実験参加者はこれを CD 比ごとに 54 回行った．54 回のタスクが終わると終了を伝える画面が表示され，実験参加者は必要に応じて CD 比の条件に対して操作性などのメモや休憩を行った．このオブジェクト選択をすべての CD 比に対して繰り返すことが実験タスクである．実験参加者は任意のタイミングで実験開始と次の CD 比のセッションを始めることができた．

5. 結果

選択速度について Kolmogorov-Smirnov 検定を行い，データが正規分布に従っていないことを確認した．ゆえに，それぞれの従属変数（選択時間，エラー率）に対して，ノンパラメトリックな分散分析手法である，整数ランク変換分散分析（ART）[23] を行った．多重比較には Wilcoxon の符号順位検定を用い，有意水準の補正には Holm の方法 [24] を用いた．エラー率について，エラーバーは標準誤差を示している．

5.1 選択時間

CD 比と Size の二つを独立変数として，選択時間を従属変数として分析を行った．その結果，単純主効果の CD 比（$F_{5,3567} = 41.2, p < 0.01$），Size（$F_{2,3567} = 743.8, p < 0.01$）について有意差が確認された．また，1 次の交互作用として，CD 比 ×Size（$F_{10,3567} = 3.91, p < 0.01$）について有意差が確認された．また，多重比較により確認された有意差を記す．

- Size=1.0° の時
  CD 比 3 と CD 比 5（$Z = -3.57, p < 0.01$），CD 比 3 と CD 比 6（$Z = -6.31, p < 0.01$），CD 比 3 と CD 比 7（$Z = -5.65, p < 0.01$），CD 比 3 と CD 比 8（$Z = -6.19, p < 0.01$），CD 比 4 と CD 比 6（$Z = -5.10, p < 0.01$），CD 比 4 と CD 比 7（$Z = -3.25, p < 0.01$），CD 比 4 と CD 比 8（$Z = -5.14, p < 0.01$），CD 比 5 と CD 比 6（$Z = -3.76, p < 0.01$），CD 比 5 と CD 比 8（$Z = -2.96, p < 0.05$）の間に有意差が確認された．
- Size=2.5° の時
  CD 比 3 と CD 比 6（$Z = -3.40, p < 0.01$），CD 比 3 と CD 比 7（$Z = -4.15, p < 0.01$），CD 比 3 と CD 比 8（$Z = -6.02, p < 0.01$），CD 比 4 と CD 比 6（$Z = -3.55, p < 0.01$），CD 比 4 と CD 比 7（$Z = -3.84, p < 0.01$），CD 比 4 と CD 比 8（$Z = -6.03, p < 0.01$），CD 比 5 と CD 比 8（$Z = -3.97, p < 0.01$），CD 比 6 と CD 比 8（$Z = -2.96, p < 0.05$），CD 比 7 と CD 比 8（$Z = -2.79, p < 0.05$）の間に有意差が確認された．
- Size=4.0° の時
  CD 比 3 と CD 比 6（$Z = -2.83, p < 0.05$），CD 比 3 と CD 比 7（$Z = -3.20, p < 0.05$），CD 比 3 と CD 比 8（$Z = -5.85, p < 0.01$），CD 比 4 と CD 比 6（$Z = -3.59, p < 0.01$），CD 比 4 と CD 比 7（$Z = -3.40, p < 0.01$），CD 比 4 と CD 比 8（$Z = -5.77, p < 0.01$），CD 比 5 と CD 比 8（$Z = -4.01, p < 0.01$）の間に有意差が確認された．

Size ごとの各 CD 比の選択時間を**図 2** に示す．また，図 1 で示した正解ターゲットの表示位置に対しての選択時間の中央値を**表 5.1** に示す．

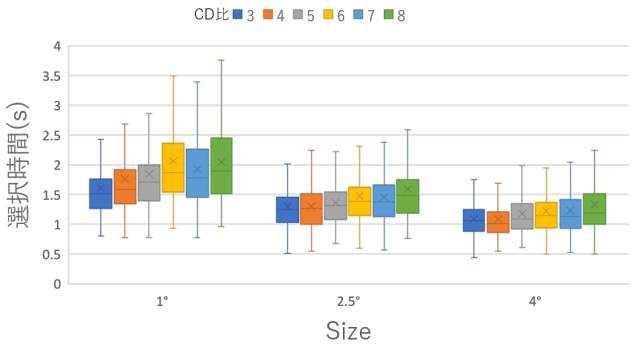

図 2: Size ごとの各 CD 比の選択時間

表 1: 正解ターゲットの配置による選択時間の中央値

	A	B	C	D	E	F
1	1.40 s	1.36 s	1.19 s	1.20 s	1.37 s	1.43 s
2	1.38 s	1.25 s	1.19 s	1.26 s	1.25 s	1.43 s
3	1.42 s	1.31 s	1.30 s	1.33 s	1.64 s	1.82 s

5.2 エラー率

CD 比と Size の二つを独立変数として，エラー率を従属変数として分析を行った．その結果，単純主効果の CD 比（$F_{5,3859} = 129.3, p < 0.01$）と Size（$F_{2,3859} = 38.181, p < 0.01$）について有意差が確認された．また，1 次の交互作用として，CD 比 ×Size（$F_{10,3859} = 41.957, p < 0.01$）について有意差が確認された．多重比較を行ったが有意差は確認されなかった．各 CD 比と Size によるエラー率を**図 3** に示す．また，図 1 で示した正解ターゲットの表示位置に対してのエラー率を**表 5.2** に示し，各独立変数における選択速度の中央値とエラー率を**表 3** に示す．

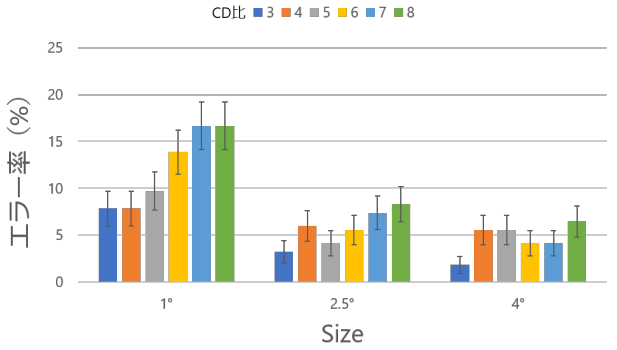

図 3: Size ごとの各 CD 比のエラー率

表 2: 正解ターゲットの配置によるエラー率

	A	B	C	D	E	F
1	3.70 %	5.56 %	6.94 %	8.80 %	5.56 %	8.33 %
2	6.02 %	6.94 %	9.26 %	12.04 %	7.87 %	7.97 %
3	4.63 %	5.09 %	9.26 %	6.48 %	10.19 %	10.65 %

表 3: 各独立変数ごとの選択時間の中央値とエラー率

	3	4	5	6	7	8
Size = 1.0°						
選択速度（s）	1.51	1.59	1.71	1.78	1.90	1.84
エラー率（%）	7.87	7.87	9.72	13.89	16.67	16.67
Size = 2.5°						
選択速度（s）	1.24	1.26	1.31	1.38	1.37	1.48
エラー率（%）	3.24	6.02	4.17	5.56	7.41	8.33
Size = 4.0°						
選択速度（s）	1.07	1.00	1.09	1.15	1.13	1.19
エラー率（%）	1.85	5.56	5.56	4.17	4.17	6.48

5.3 アンケート結果

好みによる順位付けの結果について，1 位の CD 比を 6 点，2 位の CD 比を 5 点，3 位の CD 比を 4 点，4 位の CD 比を 3 点，5 位の CD 比を 2 点，6 位の CD 比を 1 点として重み付けした．その時の合計点は降順に，CD 比 3 が 53 点，CD 比 4 が 46 点，CD 比 8 が 44 点，CD 比 5 が 43 点，CD 比 7 が 34 点，CD 比 6 が 32 点であった．

6. 考察

実験の結果以下のことが明らかになった．

- 選択時間は，いずれのターゲットサイズ Size に対しても CD 比が小さい方が優れている傾向があった．
- エラー率は CD 比が小さい方が優れている傾向があった．
- 正解ターゲット表示位置が右下の時，同じ角度に表示された正解ターゲットと比べ選択時間の中央値が大きくなっていた．
- 実験参加者が好んだ CD 比の順位を重み付けしたところ CD 比 3 から 8 の順に合計点が （53 点, 46 点, 43 点, 32 点, 34 点, 44 点）であった．

6.1 選択時間

選択時間について，CD 比が小さい方が選択時間が短い傾向があった．Size 別にみてもこの傾向は同様に存在した．CD 比が大きいと選択時間が長くなる傾向の要因として，CD 比が大きいと少ない指の移動でレイを移動させることができる反面，レイをターゲットに合わせるための細かな調整が難しかったことが考えられる．また，事後アン

ケートからは，CD 比が大きい条件について「速すぎて細かい操作が困難であった.」というコメントや，CD 比 8 の条件について「どの位置の小さいターゲットに対しても選択が難しく感じた」というコメントがあり，特に小さいターゲットの選択が困難であったと考えられる．

また，正解ターゲットの配置による選択速度について，表 5.1 で示したように，画面右下の部分の選択速度の中央値が大きかった．これは，実験参加者が全員右手で選択を行ったため，レイを操作するためのバーチャルジョイスティックへの入力を行う方向と把持している手が存在する方向が同一であったため，正解ターゲットの選択を行う際に指がターゲットを隠してしまう Occlusion の問題が生じたことが原因だと考えられる．このため，オブジェクトと指が近い場合に別の位置に指によって隠された領域を表示するなど，Occlusion の対策を適宜検討する必要があると考えられる．

6.2 エラー率

エラー率について，CD 比が小さい方がエラー率が小さい傾向があった．これは選択時間の項で述べたように，CD 比が小さいことによってターゲット近傍においてレイの調整がしやすかったことが要因であると考えられる．実験後アンケートからは，「小さいターゲットの選択は難しいので何かしらサポートがほしい」といったコメントがあり，Bubble Cursor[12] や RayCursor[8] のように，カーソルの一番近くのターゲットを選択を行うといったサポートが必要だと考えられる．

6.3 最適な CD 比

選択時間とエラー率について CD 比が小さい方が優れている傾向があり，実験参加者がつけた順位に対する重み付けを行った結果，CD 比 3 が最も高得点であった．このため，多くの実験参加者に好まれた CD 比として，CD 比の調整をできる機能の実装ができない場合には CD 比 3 を用いるのが適切と考えられる．一方で，実験後アンケートより，「レイが遅く小さな球体を選択しやすかったが，端まで動かすのにかかる時間がかかったのであまり好みじゃなかった」というコメントや「遅いと指の移動がつらく，早いと手振れで選択がずれる」といったコメントが見受けられた．アンケートの順位において，各 CD 比について最低でも 1 人は 1 位とした実験参加者がいたことや，CD 比による順位を重み付けした合計点で，CD 比 4，5，8 の合計点が近い値となっていたことからどの CD 比を好むのかはユーザごとに異なる可能性がある．このため，本提案手法を実装する場合には，ユーザが CD 比の調整をできる機能の実装を行うことで個々のユーザに対して使いやすいレイ操作が可能になると考えられる．

6.4 今後の展望

本研究では CD 比の伝達関数として定数関数を用いたが，今回適切な CD 比の値が明らかになったため，この値を参考に CD 比の伝達関数として [8] で用いていたようにシグモイド関数などの伝達関数を用いることも検討する必要があると考えられる．これによって，バーチャルジョイスティックへの入力の大きさに対して，より適切な CD 比の調節ができるようになると考えられる．

また本研究によって，これまでハンドヘルド AR 以外の提案されてきたレイキャスティングによるレイを用いた手法を，ハンドヘルド AR 環境でも適用することができるようになると考えられる．これによって，ハンドヘルド AR のオブジェクト選択手法の選択肢を広げることが可能である．例えばレイ操作を行わない手の方の画面上にスライダーを表示することで，Raycursor[8] のようにレイに表示したカーソルの深度調節を行うことが可能だと考えられる．

7. おわりに

本稿では，ハンドヘルド AR において VR と同様の操作性を有したレイを実装することが難しいことから，バーチャルジョイスティックを用いたレイの回転に関する自由度を補完する手法を提案した．レイ操作をバーチャルジョイスティックで行うにあたって必要なパラメータである CD 比の適切な値の調査を行った．その結果，選択時間，エラー率，アンケート結果を総合的に勘案して CD 比 3 が適切な CD 比であることが明らかになった．また，6.4 で述べたように，本手法によってこれまでハンドヘルド AR 以外の環境で提案されてきたレイキャスティングによるレイを用いた手法をハンドヘルド AR 環境でも適用することができるようになると考えられる．

参考文献

[1] Siek, K. A., Rogers, Y. and Connelly, K. H.: Fat finger worries: how older and younger users physically interact with PDAs, *IFIP Conference on Human-Computer Interaction*, Springer, pp. 267–280 (2005).
[2] Yin, J., Fu, C., Zhang, X. and Liu, T.: Precise Target Selection Techniques in Handheld Augmented Reality Interfaces, *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 17663–17674 (2019).
[3] Asokan, V., Bateman, S. and Tang, A.: Assistance for Target Selection in Mobile Augmented Reality, GI 2020.
[4] Mine, M. R.: Virtual environment interaction techniques, *UNC Chapel Hill CS Dept* (1995).
[5] Grossman, T. and Balakrishnan, R.: The Design and Evaluation of Selection Techniques for 3D Volumetric Displays, *Proceedings of the 19th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '06, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 3–12 (online), DOI: 10.1145/1166253.1166257 (2006).
[6] Mendes, D., Medeiros, D., Sousa, M., Cordeiro, E., Ferreira, A. and Jorge, J. A.: Design and evaluation of a novel out-of-reach selection tech-

nique for VR using iterative refinement, *Computers & Graphics*, Vol. 67, pp. 95–102 (online), DOI: https://doi.org/10.1016/j.cag.2017.06.003 (2017).

[7] Kopper, R., Bacim, F. and Bowman, D. A.: Rapid and accurate 3D selection by progressive refinement, *2011 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 67–74 (online), DOI: 10.1109/3DUI.2011.5759219 (2011).

[8] Baloup, M., Pietrzak, T. and Casiez, G.: Raycursor: A 3d pointing facilitation technique based on raycasting, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–12 (2019).

[9] Steed, A. and Parker, C.: 3D selection strategies for head tracked and non-head tracked operation of spatially immersive displays, *8th international immersive projection technology workshop*, Vol. 2 (2004).

[10] Hincapié-Ramos, J. D., Ozacar, K., Irani, P. P. and Kitamura, Y.: GyroWand: IMU-based raycasting for augmented reality head-mounted displays, *Proceedings of the 3rd ACM Symposium on Spatial User Interaction*, pp. 89–98 (2015).

[11] Google LLC: ARCore Elements, `https://play.google.com/store/apps/details?id=com.google.ar.unity.ddelements&hl=ja&gl=US`.

[12] Grossman, T. and Balakrishnan, R.: The bubble cursor: enhancing target acquisition by dynamic resizing of the cursor's activation area, *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 281–290 (2005).

[13] Worden, A., Walker, N., Bharat, K. and Hudson, S.: Making computers easier for older adults to use: area cursors and sticky icons, *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems*, pp. 266–271 (1997).

[14] Bateman, S., Mandryk, R. L., Gutwin, C. and Xiao, R.: Analysis and comparison of target assistance techniques for relative ray-cast pointing, *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 71, No. 5, pp. 511–532 (2013).

[15] Bai, H., Lee, G. A., Ramakrishnan, M. and Billinghurst, M.: 3D gesture interaction for handheld augmented reality, *SIGGRAPH Asia 2014 Mobile Graphics and Interactive Applications*, pp. 1–6 (2014).

[16] Yusof, C., Halim, N., MNANor' a, Ismail, A.: Finger-Ray Interaction using Real Hand in Handheld Augmented Reality Interface, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 979, No. 1, IOP Publishing, p. 012009 (2020).

[17] Henrysson, A., Billinghurst, M. and Ollila, M.: Virtual Object Manipulation Using a Mobile Phone, *ACM International Conference Proceeding Series*, Vol. 157 (online), DOI: 10.1145/1152399.1152430 (2005).

[18] Bai, H., Lee, G. A. and Billinghurst, M.: Freeze view touch and finger gesture based interaction methods for handheld augmented reality interfaces, *Proceedings of the 27th Conference on Image and Vision Computing New Zealand*, pp. 126–131 (2012).

[19] Eardley, R., Roudaut, A., Gill, S. and Thompson, S. J.: Understanding Grip Shifts: How Form Factors Impact Hand Movements on Mobile Phones, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 4680–4691 (online), DOI: 10.1145/3025453.3025835 (2017).

[20] Shoemake, K.: ARCBALL: A user interface for specifying three-dimensional orientation using a mouse, *Graphics interface*, Vol. 92, pp. 151–156 (1992).

[21] Mossel, A., Venditti, B. and Kaufmann, H.: 3DTouch and HOMER-S: intuitive manipulation techniques for one-handed handheld augmented reality, *Proceedings of the virtual reality international conference: laval virtual*, pp. 1–10 (2013).

[22] Li, W. H. A., Fu, H. and Zhu, K.: BezelCursor: Bezel-Initiated Cursor for One-Handed Target Acquisition on Mobile Touch Screens, *Int. J. Mob. Hum. Comput. Interact.*, Vol. 8, No. 1, p. 1–22 (online), DOI: 10.4018/IJMHCI.2016010101 (2016).

[23] Wobbrock, J. O., Findlater, L., Gergle, D. and Higgins, J. J.: The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures, *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*, pp. 143–146 (2011).

[24] Holm, S.: A simple sequentially rejective multiple test procedure, *Scandinavian journal of statistics*, pp. 65–70 (1979).

ⓒ 2022 Information Processing Society of Japan