

AR空間内におけるカーソルのターゲットへの吸着が ターゲット選択性能に与える影響の調査

石井 奏多^{1,a)} 角田 陸² 志築 文太郎³

概要：ヘッドマウントディスプレイにより実現される AR 空間内において、ユーザは手を用いて直接仮想オブジェクトの選択を求められることが多い。本研究では、AR 空間内におけるスナッピングがターゲット選択性能に与える影響を調査した。その結果、吸着率 0%, 100%および 200%のうち、吸着率 200%が最もターゲット選択性能および主観評価を向上させることが示された。また、高い吸着率は、ターゲットが小さい場合において、より有効であることが示唆された。さらに、スナッピングは、カーソルの種類によらず同等の効果をもたらすことが示唆された。また、オブジェクト間の距離によって、カーソルの有効性が変化することが示された。

1. はじめに

ヘッドマウントディスプレイ（以降、HMD）により実現される AR 空間内において、ターゲット選択は基本的なタスクの 1 つである。特に、ユーザは手を用いて直接仮想オブジェクトの選択を求められることが多い。ゆえに、我々は、手を用いた仮想オブジェクトの直接選択に注目する。手を用いた仮想オブジェクトの直接選択においては、一般的に、ハンドジェスチャ [12] が利用される。しかし、これには、今日の手のトラッキング性能の限界から、快適なターゲット選択が難しいという問題 [6] がある。

そこで我々は、ハンドジェスチャを用いたターゲットの直接選択を補助するために、カーソルのターゲットへの吸着（以降、スナッピング）を用いる。スナッピングとは、カーソルがターゲットから一定範囲内（以降、吸着範囲）にあるとき、カーソルをターゲットの中心に移動させる、またはカーソルの動きを遅くすることによって、ターゲット選択性能を向上させる技術である。これまでに、GUI におけるマウス操作 [7, 19, 23]、および公共の場に設置された大型ディスプレイ（以降、パブリックディスプレイ）におけるフリーハンドポインティング [11] などにてスナッピングがターゲット選択性能向上に有効であることが示されてきた。ゆえに、AR 空間内におけるハンドジェスチャを用いたターゲット選択においてもスナッピングが有効である可能性がある。

一方、AR 空間内における適切な吸着範囲については明らかではない。また、カーソルの種類によって、スナッピングによる効果は異なる可能性がある。さらに、カーソルはユーザの手の上に重ねられ、ユーザの手の動きに同期して動くため、ユーザはカーソルに自己所有感を感じる可能性がある [25]。ゆえに、スナッピングによりカーソルがユーザの手から離れてしまうことが、ターゲット選択に悪影響を与える可能性がある。

本研究では、ISO9241-411 [9] における multidirectional pointing task を用いて、AR 空間内におけるスナッピングがターゲット選択性能に与える影響について調査した。本研究の貢献を以下に示す。

- 吸着率 0%, 100%および 200%のうち、吸着率 200%が最もターゲット選択性能および主観評価を向上させることを示した。
- 高い吸着率は、ターゲットが小さい場合において、より有効であることを示唆する実験結果が得られた。
- スナッピングは、カーソルの種類によらず同等の効果をもたらすことを示唆する実験結果が得られた。
- オブジェクト間の距離によって、カーソルの有効性が変化することを示した。

2. 関連研究

本節では、AR 空間内におけるターゲット選択に関する研究、およびスナッピングに関する研究を述べる。

2.1 AR 空間内におけるターゲット選択

既存の AR 用 HMD を用いた AR 空間内におけるター

¹ 筑波大学 情報メディア創成学類
² 筑波大学 情報理工学位プログラム
³ 筑波大学 システム情報系
^{a)} kishii@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

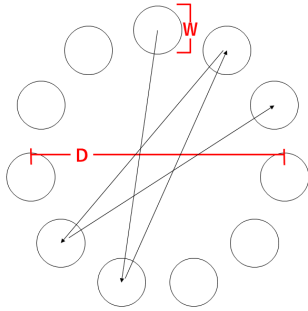


図 1 D はターゲット間の距離、 W はターゲット幅を表す。実験参加者は、矢印の順番にて表示されるターゲットを順に選択する。

ゲット選択には、ハンドジェスチャを用いる方法 [12]、ユーザの手のひらから伸びるレイ（以降、ハンドレイ）を用いる方法 [13]、および視線を用いる方法 [5, 16] が使用される。HeadCrusher [18] および Gaze&Finger [10] は、視線によりターゲットを指した後、視線上に手を重ねることによってターゲットを選択する手法である。Gaze&Handray [20] は、ハンドレイおよび視線の両方によりターゲットを指すことによってターゲットを選択する手法である。また、Wei ら [21] は、ユーザ行動モデルに基づきターゲット選択を予測することによってターゲット選択を支援した。

これらの研究は、ターゲット選択性能の向上のため、複数のターゲット選択手法を組み合わせる、またはターゲット選択を予測する等の方法を用いた。一方、本研究ではスナッピングを用いる。

2.2 スナッピング

スナッピングは、マウス操作 [7, 19, 23]、視線入力 [26]、フリーハンドポインティング [11, 15]、および携帯型デバイスによる操作 [1] などの様々なインタフェースにて有効であることが示されている。例として、Snap-to-Target [15] は、テーブルトップ型ディスプレイにおけるフリーハンドポインティングにおいて、カーソルがターゲットの吸着範囲内にあるとき、ターゲットの中心に移動する手法である。また、Magnetic Cursor [11] は、パブリックディスプレイにおけるフリーハンドポインティングにおいて、カーソルがターゲットの吸着範囲内にあるとき、カーソルがターゲット上に移動し、かつカーソルの動きが遅くなる手法である。

以上のように、これまでに様々なインタフェースにてスナッピングがターゲット選択性能向上に有効であることが示されてきた。ゆえに、AR 空間内におけるハンドジェスチャを用いたターゲットの直接選択においてもスナッピングは有効である可能性がある。

3. 実験

我々は、AR 空間内におけるスナッピングがターゲット選択性能に与える影響について調査するための実験を行った。

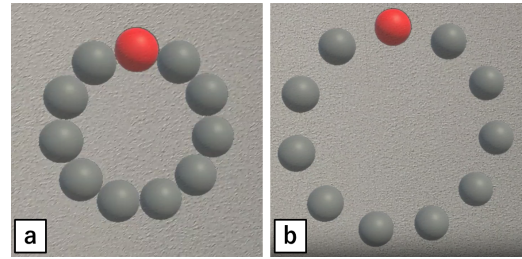


図 2 実験参加者から見た円形に配置された球体オブジェクトの様子。a: $W=3.5$ cm, $D=12.5$ cm. b: $W=2.5$ cm, $D=20$ cm.

3.1 実験参加者

実験参加者は、研究室内の学生 12 名（男性 10 名、女性 2 名）であった。実験参加者の年齢は、22-24 歳 ($M=23.0$, $SD=0.82$) であった。また、実験参加者は、全員が右利きであり、2 名が眼鏡、4 名がコンタクトを装着していた。さらに、実験参加者は自身のヘッドマウントディスプレイを用いた AR の経験 ($M=2.42$, $SD=1.19$)、および 3D ハンドジェスチャの経験 ($M=2.42$, $SD=1.11$) について、1-5（全くない-毎日使用する）のリッカート尺度にて評価した。

3.2 実験デバイスおよび実験環境

実験デバイスには、ハンドトラッキングをサポートする AR 用 HMD である Microsoft HoloLens 2 ($43^\circ \times 29^\circ$ FOV) を用いた。また、実験用アプリケーションの実装には、Unity および Mixed Reality Toolkit 2 を用いた。実験は十分に広く静かな部屋にて行われ、実験参加者は模様の無い白い壁から 3m 離れて立った [20]。

3.3 実験タスク

実験タスクの概要を図 1 に示す。実験参加者は、ISO9241-411 における multidirectional pointing task を行った。図 2 に示すように、灰色の球体オブジェクトが円形に配置される。実験参加者が選択すべき球体オブジェクト（以降、ターゲット）のみが赤色に表示される。実験参加者は利き手の人差し指により、ターゲットをポインティングし、人差し指を用いて上から下にタップするようなハンドジェスチャ（以降、エアタップ [14]）により選択を確定する。ターゲットの選択に成功した場合は、次のターゲットが赤色に表示される。一方、ターゲットの選択に失敗した場合は、ターゲットを赤色から黄色に変化させることにより選択の失敗を実験参加者に知らせる。実験参加者はターゲットの選択に成功するまで、同じターゲットの選択を続ける必要がある。

3.4 実装

Microsoft HoloLens 2 によるハンドトラッキングによって、ユーザの手の上にはカーソルが重ねられ、カーソルはユーザの手と同期して動く。カーソルには、Microsoft

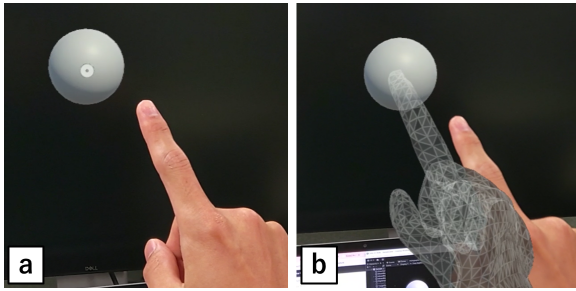


図 3 2 種類のカーソルがターゲットに吸着している様子。a: 指先カーソル。b: ハンドメッシュ。

HoloLens 2 にてサポートされている指先カーソル (図 3a) およびハンドメッシュ (図 3b) を用いた。エアタップの直前にカーソル (ハンドメッシュの場合は、ハンドメッシュの人差し指の先端) が触れていた球体オブジェクトが選択される。なお、カーソル間の当たり判定の大きさの違いが実験結果に影響を与えることを防ぐために、指先カーソルおよびハンドメッシュの当たり判定を同一にした。

本実験にて用いるスナッピングの概要を図 4、スナッピングが実際に動作している様子を図 3 に示す。ユーザの手がターゲットの吸着範囲内に入ると、カーソルはターゲットの中心に移動する。そして、ユーザの手が再び吸着範囲の外に出るまで、カーソルはターゲットの中心に留まる。本実験では、ターゲットは球形とし、吸着範囲の半径をターゲット半径を基準とした比率 (以降、吸着率) にて定める。例として、吸着率が 0% の場合、スナッピングは働かず、吸着率が 100% の場合、カーソルがターゲット内に入ったときにカーソルはターゲットの中心に移動する。また、吸着率が 200% の場合、ターゲット半径の 2 倍の半径の範囲にカーソルが入ったときにカーソルはターゲットの中心に移動する。なお、異なるターゲットの吸着範囲が重なる場合は、吸着率を吸着範囲同士が重ならない最大値に調節した。

3.5 実験手順

実験参加者は、まず研究に関する説明を受けた後、事前アンケートへの回答を行った。次に、実験参加者は実験タスクに関する説明を受けた。HMD の前面についているカメラおよび深度センサによりハンドトラッキングを行っているため、このとき実験参加者は、選択に用いる手 (利き手) をできるだけ HMD の前面に維持するように指示された。また、実験参加者からターゲットまでの距離を一定に保つために、できるだけ身体を前後左右に動かさないように指示された。さらに、実験タスクではできるだけ速く正確にターゲットを選択するように指示された。その後、実験参加者は、カーソルの種類 2 条件 $\times$ 吸着率 3 条件 = 計 6 条件のそれぞれについて、計 6 セッション分の実験タスクを行った。

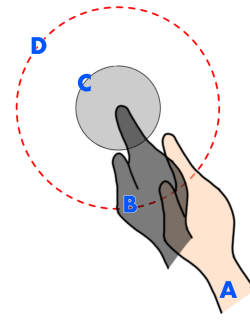


図 4 本実験にて用いるスナッピングの概要。ユーザの手がターゲットの吸着範囲内に入ると、カーソルはターゲットの中心に移動する。A: ユーザの手。B: カーソル。C: ターゲット。D: 吸着範囲。

各セッションでは、実験参加者はまず、条件の説明を受けた後、2 分間の練習タスクを行った。その後、1-2 分程度の休憩を取り、本番タスクを行った。本番タスクでは、球体オブジェクトの直径であるターゲット幅 W 、および円の直径であるターゲット間距離 D をそれぞれ 3 条件、計 $3 \times 3 = 9$ 条件分のポインティングタスクを行った。その後、実験参加者は、タスク後アンケートに回答し、2-3 分程度の休憩を取った後、次のセッションを開始した。

全てのセッションが終了した後は、実験参加者は事後アンケートに回答し実験を終えた。実験参加者 1 人あたりの実験実施時間は 80 分程度であった。

3.6 実験設計

本実験は、以下の 4 つの独立変数を用いた被験者内実験である。

- カーソルの種類: 2 条件 (指先カーソル, ハンドメッシュ)
- 吸着率: 3 条件 (0%, 100%, 200%)
- W : 3 条件 (1.5 cm, 2.5 cm, 3.5 cm)
- D : 3 条件 (12.5 cm, 20 cm, 25 cm)

W および D の値は、 W が最大かつ D が最小のとき、ターゲット間の隙間が完全になくなるように設定した (図 2a)。また、 W が最大かつ D が最大のとき、すべてのターゲットが Microsoft HoloLens 2 の視野範囲に収まるように設定した。さらに、 W および D の各組み合わせの Fitts の法則における ID (式 4) が 2.1-4.2 bits の中に一意になるように設定した。

計 6 回のセッションにおけるカーソルの種類および吸着率の組み合わせの順番は、実験参加者間においてラテン方格法によりカウンタバランスを取った。また、各セッション内における W および D の組み合わせの順番は、それが実験結果へ与える影響を低減するため、実験参加者内および実験参加者間において ID の昇順に統一した。

ターゲット数は、本番タスクでは 11、練習タスクでは

6とした。練習タスクに用いた W および D の組み合わせは、 $(W, D) = (3.6 \text{ cm}, 13.5 \text{ cm}), (2.6 \text{ cm}, 19 \text{ cm}), (1.6 \text{ cm}, 24 \text{ cm})$ の3種類である。これらの3種類を用いた理由は、本番タスクにおいて用いる W および D の組み合わせの ID の範囲である 2.1-4.2 bit のうち、低難易度・中難易度・高難易度の3種類を練習できるようにするためである。実験参加者は、2分間の練習タスクにおいて、3種類の難易度のポインティングタスクを繰り返し実施することができた。

円の中心の実験参加者からの距離は 55cm とした [2]。また、円の中心の高さは実験参加者の目の高さとした。なお、ターゲットの出現順は ISO 9241-411 に基づき、図 1 に示す順序にて固定した。

3.7 評価指標

本実験で用いる評価指標を以下に示す。

選択完了時間 (MT) MT は、実験参加者がターゲット選択を成功させた時刻からターゲットが出現した時刻を引いたものである。 MT が短いほど、素早い選択が可能であることを示す。

スループット (TP) TP は ISO 9241-411 における multidirectional pointing task に基づく指標であり、選択速度および選択精度の両方を考慮した指標である。 TP が高いほど、選択速度および選択精度を両立した選択が可能であることを示す。 TP は次式にて表される [9]。

$$TP = \frac{ID_e}{MT} \quad (1)$$

また、 ID_e は次式にて表される [9]。

$$ID_e = \log_2 \left(\frac{A_e}{W_e + 1} \right) \quad (2)$$

A_e は、前回のターゲットの選択点から現在のターゲットの選択点までの距離である。

有効幅 (W_e) W_e は、選択点のばらつきの小ささを表す指標である。 W_e が小さいほど、選択点のばらつきの小さい、すなわち選択精度の高い選択が可能であることを示す。 W_e は、次式にて表される [9]。

$$W_e = 4.133 \times SD_x \quad (3)$$

なお、 SD_x は、選択点からタスク軸（前回のターゲットの中心から現在のターゲットの中心へ伸びる軸）への投影点、および現在のターゲットの中心の一次元座標の差の標準偏差である。

エラー率 (ER) ER は、ターゲット選択の試行回数（エアタップした回数）に対するターゲット選択が失敗した回数の比率である。 ER が低いほど、失敗の少ない安定した選択が可能であることを示す。

手の移動量 (HM) HM は、ターゲット選択におけるフ

レーム間の手のひらの位置の累積差である。 HM は、肉体的な疲労と相関する可能性がある [17]。ゆえに、 HM が小さいほど、肉体的な疲労の少ない選択の可能性を示す。

Fitts の法則のモデルとの適合度 本研究では、実験結果の Fitts の法則に対するモデル適合性について調査する。Fitts の法則は、マウスなどの入力装置を用いたターゲット選択における所要時間に関するモデルであり、次式にて表される [9]。

$$MT = a + b \times ID, \text{ with } ID = \log_2 \left(\frac{D}{W} + 1 \right) \quad (4)$$

なお、 MT はターゲット選択に要する時間である。また、 a および b は線形回帰によって求められる定数であり、 D はターゲットまでの距離、 W はターゲットの幅を表す。なお、 ID はターゲット選択の難易度を示す難易度指数であり、 ID の値が高いほどターゲット選択の難易度は高くなる。

NASA TLX NASA TLX は、6つの項目から主観的なワークロードを評価するものである [8]。NASA TLX スコアが高いほど、主観的な選択にかかる作業負荷が大きいことを示す。

SUS SUS は、ユーザビリティの受け止められ方について評価するものである [4]。SUS スコアが高いほど、主観的なユーザビリティが高いことを示す。

アンケート 本実験では、タスク後アンケートにて、カーソルに自己所有感を感じたか（全くそう思わない-そう思う）、およびスナッピングに対する印象（不快-快適）に関する 1-5 のリッカート尺度によるアンケートを実施した。なお、後者は吸着率 0% 条件においては実施しなかった。また、ターゲット選択を行う上で気を付けたこと、およびセッションの感想に関する自由記述式によるアンケートを実施した。さらに、事後アンケートにて、実験参加者は、カーソルの種類 2 条件 × 吸着率 3 条件 = 計 6 条件を好みに応じて順位付けした。また、実験全体の感想に関する自由記述式によるアンケートを実施した。

3.8 データ分析

各実験参加者は、実験全体における本番タスクを通して、ターゲット数 $11 \times W3$ 条件 × $D3$ 条件 × カーソルの種類 2 条件 × 吸着率 3 条件 = 594 ターゲットを選択した。なお、データ分析においては、 W および D の各組み合わせの最初のターゲットを除く、ターゲット数 $10 \times W3$ 条件 × $D3$ 条件 × カーソルの種類 2 条件 × 吸着率 3 条件 = 540 データポイントを用いた。

実験タスクにおいて、1 回のエアタップにつき、複数回のエアタップが記録されることがあった。これは、現在の

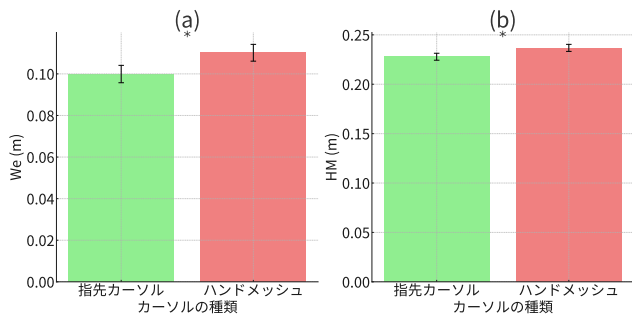


図 5 カーソルの種類間における各指標の平均値。ただし、*は有意差を示す。a: 有効幅 We 。b: 手の移動量 HM

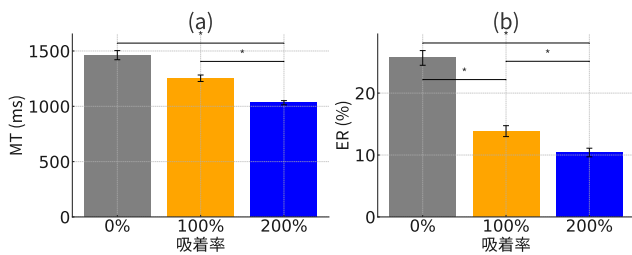


図 6 吸着率間における各指標の平均値。ただし、*は有意差を示す。a: 選択完了時間 MT 。b: エラー率 ER

ターゲットに対する試行が、前回のターゲットを選択した直後に意図せず発生してしまうことに繋がる。ゆえに、先行研究 [24] に倣って、選択点および前回のターゲットの中心からの距離が $D/2$ 未満の試行を取り除いた。これにより、全体において 1.63% の試行が取り除かれた。また、トラッキングエラーによりエアタップが認識されなかったことによって、 MT に異常値が発生した。ゆえに、先行研究 [20] に倣って、カーソルの種類×吸着率ごとに、 MT が平均値+6×標準偏差よりも大きいデータポイントを取り除いた。これにより、全体において 1.47% (指先カーソル×0%: 1.76%, 指先カーソル×100%: 1.76%, 指先カーソル×200%: 1.57%, ハンドメッシュ×0%: 0.86%, ハンドメッシュ×100%: 1.67%, ハンドメッシュ×200%: 1.20%) のデータポイントが取り除かれた。

統計分析においては、まず、量的変数について正規性の検定を行った。 MT , TP , We , ER , および HM に関しては、先行研究 [3] と同様に、データ分布の歪度 S および尖度 K の値が ± 1.5 以内である場合、データは正規分布しているとした。また、NASA TLX, SUS, およびアンケートに関しては、Shapiro-Wilk 検定により正規性の検定を行った。正規性の検定の結果、 ER , HM , NASA TLX の身体的要求および努力において正規性が認められたが、それ以外の評価指標においては正規性が認められなかった。正規性が認められない場合は、先行研究 [3, 20] と同様に、整列ランク変換 (ART) [22] を実施した。その後、 MT , TP , We , ER , および HM に関しては、4 元配置 (カーソルの種類×吸着率× W × D) 反復測定分散分析を実施した。また、

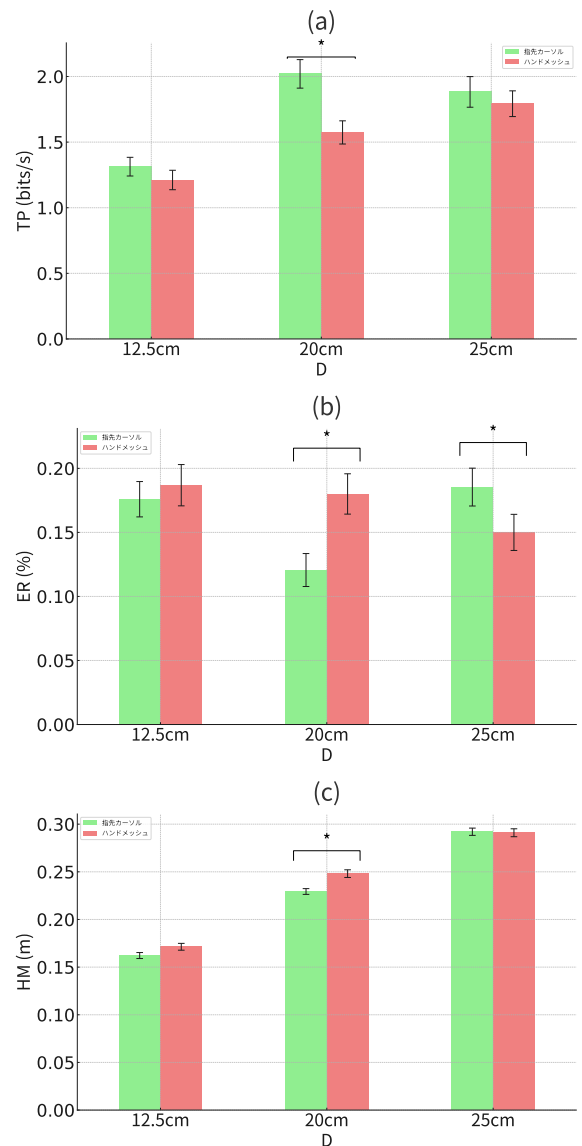


図 7 カーソルの種類× D 間における各指標の平均値。ただし、*は有意差を示す。a: スループット TP 。b: エラー率 ER 。c: 手の移動量 HM

NASA TLX, SUS, およびアンケートに関しては、2 元配置 (カーソルの種類×吸着率) 反復測定分散分析を実施した。なお、先行研究 [20] と同様に、Mauchly の球面性検定の結果、球面性が認められない場合は、Greenhouse-Geisser 補正を実施した。その後、Bonferroni 法により多重比較を実施した。なお、統計分析においては、有意水準を 0.05 とした。

3.9 実験結果

我々は、カーソルの種類および吸着率がターゲット選択性能に与える影響について関心がある。ゆえに、実験結果は簡潔のため、特筆すべき事項を除き、カーソルの種類および吸着率に関して有意差が得られたもののみ報告する。 MT , TP , We , ER , HM の結果を図 5, 図 6, 図 7, および図 8 に示す。また、NASA TLX, および SUS の結果をそ

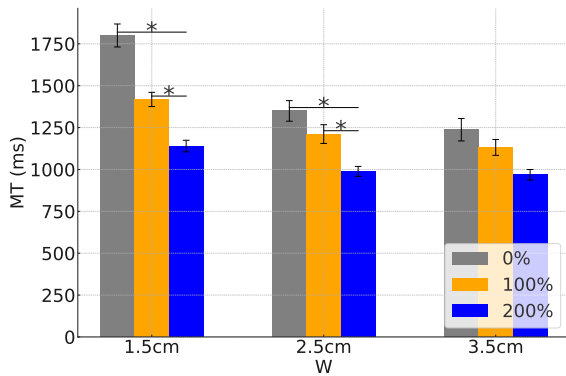


図 8 吸着率×W 間における選択完了時間 MT の平均値。ただし、*は有意差を示す。

それぞれ図 9, 図 10 に示す。さらに, Fitts の法則のモデルとの適合度を示す補正 R^2 の値 (1 に近いほど適合度が高い) の結果を表 1 に示す。いずれの条件においても Fitts の法則のモデルとの適合度は低かった。また, 事後アンケートにおける順位付けの結果を図 11 に示す。なお, タスク後アンケートにおける「カーソルに自己所有感を感じたか」および「スナッピングに対する印象」においては有意差が得られなかった。

4. 考察

まず, カーソルの種類に関して, W_e に対するカーソルの種類の主効果が検出された。具体的には, 指先カーソルはハンドメッシュよりも有意に優れていた (図 5a)。この結果は, 一般的に指先カーソルはハンドメッシュに比べ選択点のばらつきの小さい選択を実現することを示す。一方, TP (図 7a) および HM (図 5c) において, $D=20$ cm の場合, 指先カーソルはハンドメッシュよりも有意に優れていたが, $D=12.5$ cm および $D=25$ cm の場合には有意差が得られなかった。また, ER においては, $D=20$ cm の場合, 指先カーソルはハンドメッシュよりも有意に優れていたが, $D=25$ cm の場合には, ハンドメッシュの方が指先カーソルよりも有意に優れていた (図 5b)。すなわち, オブジェクト間の距離が $D=20$ cm 程度の場合には, 指先カーソルはハンドメッシュに比べターゲット選択性能の向上に特に有効であるが, オブジェクト間の距離が $D=25$ cm 程度の場合には, ハンドメッシュの方が指先カーソルよりも高い性能を示すと考えられる。

アンケートにおいて, 「ハンドメッシュは視覚的に邪魔であり, ターゲットを隠すことがあった」等のハンドメッシュの高い遮蔽性に関する回答を複数得た。一方, 「ハンドメッシュの方が自分の手の位置を把握しやすかった」「ハンドメッシュの方が指の角度などが分かりやすくて操作しやすかった」等のハンドメッシュの自身の手の高い認識性に関する回答も複数得た。 $D=25$ cm は, $D=12.5$ cm および $D=20$ cm に比べオブジェクト間の密度が小さくなるた

表 1 Fitts の法則のモデルとの適合度を示す補正 R^2 の値。

	0%	100%	200%
指先カーソル	0.549	0.750	0.317
ハンドメッシュ	0.232	0.371	0.395

め, ハンドメッシュによるオブジェクトの遮蔽が少なくなる。ゆえに, $D=25$ cm の場合, ハンドメッシュの高い遮蔽性の問題が低減されることにより, ハンドメッシュの自身の手の高い認識性がターゲット選択性能向上に効果を示したと考えられる。なお, 事後アンケートにおける順位付けにおいては, 12 人の実験参加者のうち, 9 人の実験参加者が指先カーソルを 1 位に選んだように, 指先カーソルの方がハンドメッシュよりも一般的に好まれた (図 11)。

次に, 吸着率に関して, ER は, 吸着率の主効果において, 吸着率が高いほど有意に優れていた (図 6b)。このことは, 本研究にて用いた吸着率の中では, 高い吸着率ほどエラー率の低い安定した選択が可能であることを示す。一方, MT においては, $W=1.5$ cm および $W=2.5$ cm の場合, 吸着率 200% は吸着率 0% および吸着率 100% よりも有意に優れていたが, $W=3.5$ cm の場合, いずれの吸着率間においても有意差は得られなかった (図 8)。すなわち, 特に $W=1.5$ cm および $W=2.5$ cm のような小さいオブジェクトを選択する場合には, 吸着率 200% のような高い吸着率がターゲット選択性能の向上により有効であると考えられる。また, アンケートにおける「小さいターゲットにはより高い吸着率が良いと思った」という回答にもあるように, 200% よりも大きい吸着率の使用も考えられる。

また, NASA TLX においては, 身体的要求, 努力, およびフラストレーションの 3 つの項目において, 吸着率 200% は吸着率 0% よりも有意に優れていた (図 9)。SUS においては, 吸着率 100% および吸着率 200% は, 吸着率 0% よりも有意に優れていた (図 10)。また, 事後アンケートにおける順位付けにおいては, 吸着率が高いほど一般的に好まれた (図 11)。これらの結果から, 本研究にて用いた吸着率の中では, 高い吸着率ほど主観評価をより向上させると考えられる。

実験参加者からは, 吸着率 100% および 200% に関して「ターゲットが正しくポインティングされているかが分かりやすかった」「手振れが抑えられた」などの回答を得た。すなわち, スナッピングによる視覚的フィードバックおよびカーソルの動きの補正が, 吸着率 100% および吸着率 200% が吸着率 100% に比べ高い選択性能を示したことの一因となったと考えられる。また, アンケートにおける, 「吸着率が高いほど手の移動量が減った」との回答にもあるように, 吸着率が高いほど, 実質的に W が大きくなり, かつ D が小さくなることで, 高い吸着率ほど高い性能を示した一因と考えられる。

一方, 我々は, カーソルの種類によってスナッピングに

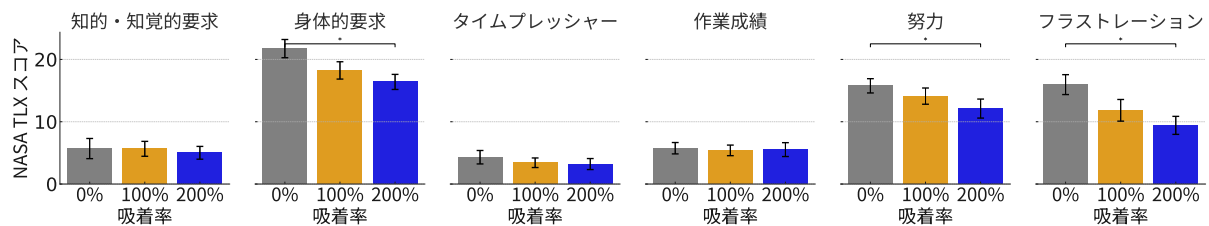


図 9 NASA TLX の平均値。ただし、*は有意差を示す。

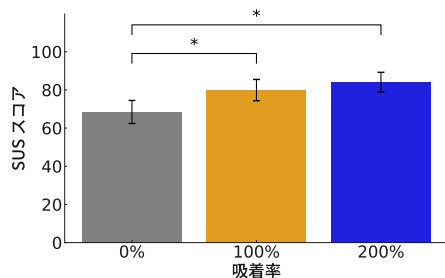


図 10 SUS の平均値。ただし、*は有意差を示す。

よる効果は異なると考えていたが、実験の結果、カーソルの種類および吸着率の相互作用に有意差が見られなかった。すなわち、スナッピングは、カーソルの種類によらず同等の効果をもたらすことが示唆された。

また、タスク後アンケートにおける「カーソルに自己所有感を感じたか」および「スナッピングに対する印象」に関する有意差は得られなかった。さらに、両者の間に相関は認められなかった（相関係数：0.272）。すなわち、我々は、カーソルに対する自己所有感がスナッピングに悪影響を与えていると考えていたが、実験の結果、両者に関係性は認められなかった。

5. 本研究の制約

本研究の実験参加者全員が右利きであったことが実験結果に影響を与えた可能性がある。また、本研究にて用いたポインティングタスクの D , W , およびターゲットの配置は限定的であるため、より実践的な環境を想定した実験設計にて更なる調査が必要である。

さらに、本研究ではターゲット選択にエアタップを用いたが、アンケートにおける、「ターゲットが密集しているときカーソルが意図しないターゲットに吸着・選択してしまい不快」「エアタップによって選択がずれてしまうことがあった」との回答にもあるように、エアタップによる選択が実験結果に影響を与えた可能性がある。また、このことは、いずれの条件においても Fitts の法則のモデルとの適合度が低かったこと（表 1）にも影響を与えた可能性がある。ゆえに、異なる選択方法を用いた調査も行う必要がある。

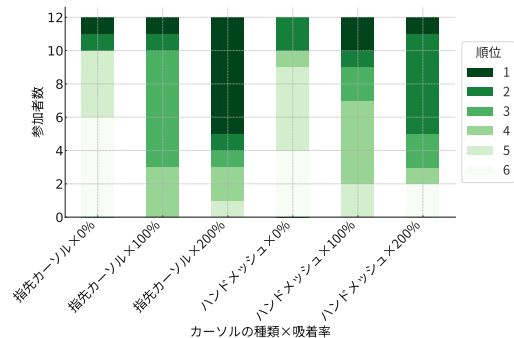


図 11 参加者によるカーソルの種類 2 条件 × 吸着率 3 条件 = 6 条件の順位付けの結果。色が濃いほど高い順位を付けられたことを示す。

6. まとめおよび今後の課題

本研究では、ISO9241-411 [9] における multidirectional pointing task を用いて、AR 空間内におけるスナッピングがターゲット選択性能に与える影響について調査した。その結果、吸着率 0%, 100% および 200% のうち、吸着率 200% が最もターゲット選択性能および主観評価を向上させることが示された。また、高い吸着率は、ターゲットが小さい場合において、より有効であることが示唆された。さらに、オブジェクト間の距離によって、指先カーソルおよびハンドメッシュの有効性が変化することが示された。また、我々は、カーソルの種類によってスナッピングによる効果は異なると考えていたが、スナッピングは、カーソルの種類によらず同等の効果をもたらすことが示唆された。また、我々は、カーソルに対する自己所有感がスナッピングに悪影響を与えていると考えていたが、両者に関係性は認められなかった。今後は、200% 以上の吸着率を用いた調査、異なる選択方法を用いた調査、およびより実践的な環境における調査を行う。

参考文献

- [1] Baldauf, M. and Fröhlich, P.: Snap Target: Investigating an Assistance Technique for Mobile Magic Lens Interaction With Large Displays, *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol. 30, No. 6, pp. 446–458 (2014).
- [2] Barrera, M. M. D. and Stuerzlinger, W.: The Effect of Stereo Display Deficiencies on Virtual Hand Pointing, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human*

- Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 207:1–207:14 (2019).
- [3] Batmaz, A. U., Yu, K., Liang, H.-N. and Stuerzlinger, W.: Improving Effective Throughput Performance Using Auditory Feedback in Virtual Reality, *Proceedings of the 2022 ACM Symposium on Spatial User Interaction*, SUI '22, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 18:1–18:11 (2022).
 - [4] Brooke, J.: *SUS – a quick and dirty usability scale*, pp. 189–194 (1996).
 - [5] Chatterjee, I., Xiao, R. and Harrison, C.: Gaze+Gesture: Expressive, Precise and Targeted Free-Space Interactions, *Proceedings of the 2015 ACM on International Conference on Multimodal Interaction*, ICMI '15, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 131–138 (2015).
 - [6] Ghazwani, Y. and Smith, S.: Interaction in Augmented Reality: Challenges to Enhance User Experience, *Proceedings of the 2020 4th International Conference on Virtual and Augmented Reality Simulations*, ICVARS 2020, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 39–44 (2020).
 - [7] Guiard, Y., Blanch, R. and Beaudouin-Lafon, M.: Object Pointing: A Complement to Bitmap Pointing in GUIs, *Proceedings of Graphics Interface 2004*, GI '04, Waterloo, CAN, Canadian Human-Computer Communications Society, pp. 9–16 (2004).
 - [8] Hart, S. G. and Staveland, L. E.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research, *Human Mental Workload*, Advances in Psychology, North-Holland, pp. 139–183 (1988).
 - [9] International Organization for Standardization: ISO/TS 9241-411:2012, <https://www.iso.org/standard/54106.html> (最終閲覧日: 2023 年 12 月 14 日) .
 - [10] Lystbæk, M. N., Rosenberg, P., Pfeuffer, K., Grønbaek, J. E. and Gellersen, H.: Gaze-Hand Alignment: Combining Eye Gaze and Mid-Air Pointing for Interacting with Menus in Augmented Reality, *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 145:1–145:18 (2022).
 - [11] Mäkelä, V., Heimonen, T. and Turunen, M.: Magnetic Cursor: Improving Target Selection in Freehand Pointing Interfaces, *Proceedings of The International Symposium on Pervasive Displays*, PerDis '14, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 112–117 (2014).
 - [12] Microsoft: Direct manipulation with hands, <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/design/direct-manipulation> (最終閲覧日: 2023 年 12 月 14 日) .
 - [13] Microsoft: Point and commit with hands, <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/design/point-and-commit#hand-rays> (最終閲覧日: 2023 年 12 月 14 日) .
 - [14] Microsoft: Getting around HoloLens 2, <https://learn.microsoft.com/en-us/hololens/hololens2-basic-usage#select-using-air-tap> (最終閲覧日: 2023 年 12 月 14 日) .
 - [15] Parker, J. K., Mandryk, R. L., Nunes, M. N. and Inkpen, K. M.: TractorBeam Selection Aids: Improving Target Acquisition for Pointing Input on Tabletop Displays, *Human-Computer Interaction - INTERACT 2005*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, pp. 80–93 (2005).
 - [16] Pfeuffer, K., Mayer, B., Mardanbegi, D. and Gellersen, H.: Gaze + Pinch Interaction in Virtual Reality, *Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction*, SUI '17, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 99–108 (2017).
 - [17] Pham, D.-M. and Stuerzlinger, W.: Is the Pen Mightier than the Controller? A Comparison of Input Devices for Selection in Virtual and Augmented Reality, *Proceedings of the 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery (2019).
 - [18] Pierce, J. S., Forsberg, A. S., Conway, M. J., Hong, S., Zeleznik, R. C. and Mine, M. R.: Image Plane Interaction Techniques in 3D Immersive Environments, *Proceedings of the 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics*, I3D '97, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 39–43 (1997).
 - [19] Trewin, S., Keates, S. and Moffatt, K.: Developing Steady Clicks: A Method of Cursor Assistance for People with Motor Impairments, *Proceedings of the 8th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, Assets '06, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 26–33 (2006).
 - [20] Wagner, U., Lystbæk, M. N., Manakhov, P., Grønbaek, J. E. S., Pfeuffer, K. and Gellersen, H.: A Fitts' Law Study of Gaze-Hand Alignment for Selection in 3D User Interfaces, *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 252:1–252:15 (2023).
 - [21] Wei, Y., Shi, R., Yu, D., Wang, Y., Li, Y., Yu, L. and Liang, H.-N.: Predicting Gaze-Based Target Selection in Augmented Reality Headsets Based on Eye and Head Endpoint Distributions, *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 283:1–283:14 (2023).
 - [22] 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*, CHI '11, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 143–146 (2011).
 - [23] 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*, CHI '97, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 266–271 (1997).
 - [24] Yamanaka, S.: Test-Retest Reliability on Movement Times and Error Rates in Target Pointing, *Proceedings of the 2022 ACM Designing Interactive Systems Conference*, DIS '22, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 178–188 (2022).
 - [25] Yuan, Y. and Steed, A.: Is the Rubber Hand Illusion Induced by Immersive Virtual Reality?, *2010 IEEE Virtual Reality Conference (VR)*, pp. 95–102 (2010).
 - [26] Zhang, S., Tian, Y., Wang, C. and Wei, K.: Target Selection by Gaze Pointing and Manual Confirmation: Performance Improved by Locking the Gaze Cursor, *Ergonomics*, pp. 1–24 (2020).