筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

卒業研究論文

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

指導教員　志築 文太郎，川口 一画

2024年1月

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，ポインティングタスクを用いた実験により，AR 空間内におけるカーソルのターゲットへの吸着（以降，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．実験では，スナッピングとして，ユーザの手の上に重ねられた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するシステムを用いた．このとき，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）にて定めた．実験の結果，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．

目 次

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

第 2 章　関連研究 **3**
2.1 AR 空間内におけるターゲット選択 3
2.2 スナッピング 3

第 3 章　実験 **4**
3.1 実験参加者 4
3.2 実験デバイスおよび実験環境 4
3.3 実験タスク 4
3.4 実装 5
3.5 実験手順 6
3.6 実験設計 7
3.7 評価指標 8
3.8 データ分析 11
3.9 結果 12
3.9.1 MT 12
3.9.2 TP 13
3.9.3 We 13
3.9.4 ER 14
3.9.5 HM 16
3.9.6 Fitts の法則のモデルとの適合度 17
3.9.7 NASA-TLX 17
3.9.8 SUS 17
3.9.9 アンケート 18

第 4 章　考察 **20**
4.1 カーソルの種類 20

4.2 吸着率 21
4.3 カーソルの種類および吸着率の交互作用 21
4.4 カーソルに対する自己所有感 21

第 5 章 今後の課題 **22**

第 6 章 結論 **23**

謝辞 **24**

参考文献 **25**

著者論文リスト **29**

付 録 A 実験において用いたアンケート **30**
A.1 事前アンケート 30
A.2 タスク後アンケート 34
A.3 NASA-TLX アンケート 42
A.4 事後アンケート 45

図目次

3.1 実験の様子．実験参加者は，Microsoft HoloLens 2 を装着した状態において，ポインティングタスクを行った．実験参加者は，模様のない白い壁から 3 m 離れて立った．また，実験は十分に広く静かな部屋にて行われた． 5
3.2 実験タスクの概要．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． 6
3.3 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．a: W=3.5 cm，D=12.5 cm．b: W=2.5 cm，D=20 cm． 7
3.4 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． 8
3.5 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． 9
3.6 吸着率の調節の例．異なるターゲットの吸着範囲同士が重なる場合，吸着率は吸着範囲同士が重ならない最大値に調節される．なお，図中の灰色の円，およびその周りの赤色の点線はそれぞれターゲット，および吸着範囲を示す．a: 吸着率の調節前．b: 吸着率の調節後． 10
3.7 実験にて用いた独立変数．実験は，4 つの独立変数（カーソルの種類，吸着率，W，および D）を用いた被験者内実験として実施された． 11
3.8 吸着率間における各指標の平均値．ただし，*およびエラーバーはそれぞれ有意差，および標準誤差を示す．a: 選択完了時間 MT．b: エラー率 ER． . . . 13
3.9 吸着率× W 間における選択完了時間 MT の平均値．ただし，*およびエラーバーはそれぞれ有意差，および標準誤差を示す． 14
3.10 カーソルの種類× D 間における各指標の平均値．ただし，*およびエラーバーはそれぞれ有意差，および標準誤差を示す．a: スループット TP．b: エラー率 ER．c: 手の移動量 HM． 15
3.11 カーソルの種類間における各指標の平均値．ただし，*およびエラーバーはそれぞれ有意差，および標準誤差を示す．a: 有効幅 We．b: 手の移動量 HM． . 16
3.12 NASA-TLX の平均値．ただし，*およびエラーバーはそれぞれ有意差，および標準誤差を示す． 17
3.13 SUS の平均値．ただし，*およびエラーバーはそれぞれ有意差，および標準誤差を示す． 18

3.14 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が付けられたことを示す． 19

A.1 事前アンケート-Part1． 31
A.2 事前アンケート-Part2． 32
A.3 事前アンケート-Part3． 33
A.4 タスク後アンケート-Part1． 35
A.5 タスク後アンケート-Part2．本問は，吸着率 100%，および吸着率 200%のときのみ使用された． 36
A.6 タスク後アンケート-Part3． 37
A.7 タスク後アンケート-Part4．本問は，SUS アンケートの内容である． 38
A.8 タスク後アンケート-Part5．本問は，SUS アンケートの内容である． 39
A.9 タスク後アンケート-Part6．本問は，SUS アンケートの内容である． 40
A.10 タスク後アンケート-Part7． 41
A.11 NASA-TLX アンケート-Part1． 43
A.12 NASA-TLX アンケート-Part2．回答者は，画面上に表示された 2 つの指標のうち，重要であると考える方を選択する． 44
A.13 事後アンケート-Part1． 46
A.14 事後アンケート-Part2． 47

表 目 次

3.1 Fitts の法則のモデルとの適合度を示す補正 R^2 の値. 18

第1章　はじめに

本研究では，AR 空間内におけるカーソルのターゲットへの吸着（以降，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．本章においては，本研究の背景，目的とアプローチ，貢献，および本論文の構成を述べる．

1.1　背景

AR（Augmented Reality，拡張現実）とは，以下の 3 つの条件を満たすものである [1]．（1）現実および仮想が組み合わされている．（2）相互作用がリアルタイムにて行われる．（3）3D により再現される．近年，AR 空間内における様々なアプリケーション，ゲーム，およびトレーニングが開発されている [2]．AR 空間は，ヘッドマウントディスプレイ（以降，HMD），スマートフォン，タブレット等のデバイスにより実現される．なお，本研究においては，HMD により実現される AR 空間（以降，AR 空間）のみを対象にする．

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．例として，既存の AR 用 HMD である Microsoft HoloLens 2 においては，手を用いて直接仮想オブジェクトを選択した後に，仮想オブジェクトの移動，回転，または拡大縮小の操作を行うことが求められる [3]．したがって，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 [3] 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がある [4]．

1.2　目的とアプローチ

本研究では，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，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 [5, 6, 7]，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 [8] 等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 [9]．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，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するために，ISO9241-411 [10] における multidirectional pointing task を用いた実験を行った．

1.3 貢献

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．

1.4 本論文の構成

本論文の構成を示す．まず，第 1 章では，本研究の背景，目的とアプローチ，および貢献を述べた．第 2 章では，本研究の関連研究を示す．第 3 章では，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するために行った実験を述べる．第 4 章では，実験結果の考察を述べる．第 5 章では，本研究の今後の課題を述べる．第 6 章では，本研究の結論を述べる．

第2章　関連研究

本研究では，AR 空間内におけるターゲット選択においてスナッピングを用いる．したがって，本章では，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ゲット選択には，ハンドジェスチャを用いる方法 [3]，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 [11]，ユーザの頭から伸びるレイを用いる方法 [12]，および視線を用いる方法 [13, 14] が使用される．HeadCrusher [15] および Gaze&Finger [16] 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 [17] 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 [18] 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，ターゲット選択性能の向上のため，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 [5, 6, 7]，視線入力 [19]，フリーハンドポインティング [8, 20]，および携帯型デバイスによる操作 [21] 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，Magnetic Cursor [8] 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．Snap-to-Target [20] 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．

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の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．

第3章　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を調査するための実験を行った．本章では，実験参加者，実験デバイスおよび実験環境，実験タスク，実装，実験手順，実験設計，評価指標，データ分析，および結果を述べる．

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 HMD 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）を，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

実験の様子を図 3.1 に示す．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（$43° \times 29°$ 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．先行研究 [17] と同様に，実験は十分に広く，かつ静かな部屋にて行われ，実験参加者は模様のない白い壁から 3m 離れて立った．

3.3　実験タスク

実験タスクの概要を図 3.2 に示す．実験参加者は，ISO9241-411 における multidirectional pointing task を行った．図 3.3 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．このとき，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，利き手の人差し指を用いて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）[22] 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には，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には，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 [23, 24].



図 3.1: 実験の様子．実験参加者は，Microsoft HoloLens 2 を装着した状態において，ポインティングタスクを行った．実験参加者は，模様のない白い壁から 3 m 離れて立った．また，実験は十分に広く静かな部屋にて行われた．

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 HoloLens 2 にてサポートされている指先カーソル（図 3.4a）およびハンドメッシュ（図 3.4b）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には，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 3.5，スナッピングが実際に動作している様子を図 3.4 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

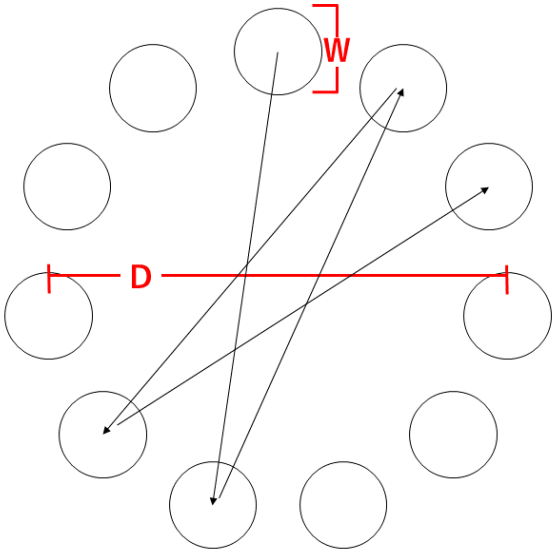


図 3.2: 実験タスクの概要．D はターゲット間の距離，W はターゲット幅を表す．実験参加者は，矢印の順番にて表示されるターゲットを順に選択する．

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（図 3.6）．

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×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．

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，最低 1 分間の休憩を取り，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 3×3=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，最低 2 分間の休憩を取った後，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約 80 分であった．

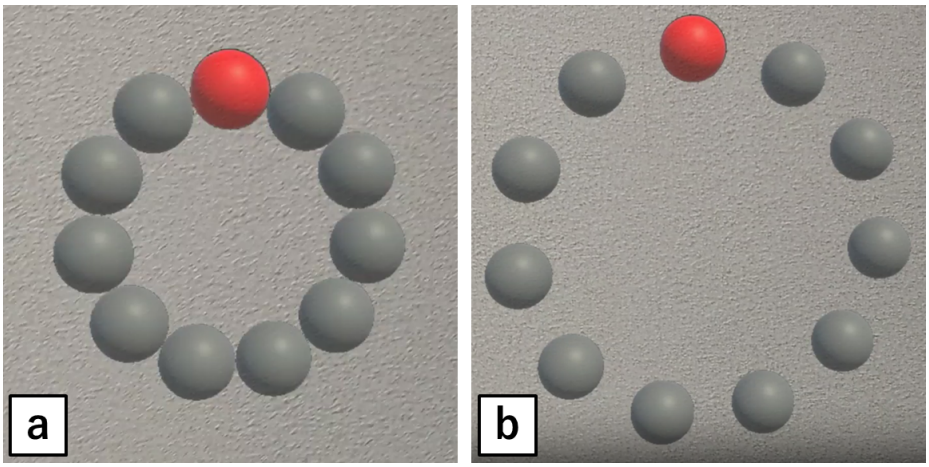


図 3.3: 実験参加者から見た円形に配置された球体オブジェクト．a: W=3.5 cm，D=12.5 cm. b: W=2.5 cm，D=20 cm.

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（図 3.7）.

- 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 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無くなるように W および D の値を設定した（図 3.3a）．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 W および D の値を設定した．さらに，W および D の各組み合わせの Fitts の法則 [25] における ID（式 3.4）が 2.1-4.2 bits の中にて一意になるように W および D の値を設定した.

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 cm, 13.5 cm），（2.6 cm, 19 cm），（1.6 cm, 24 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

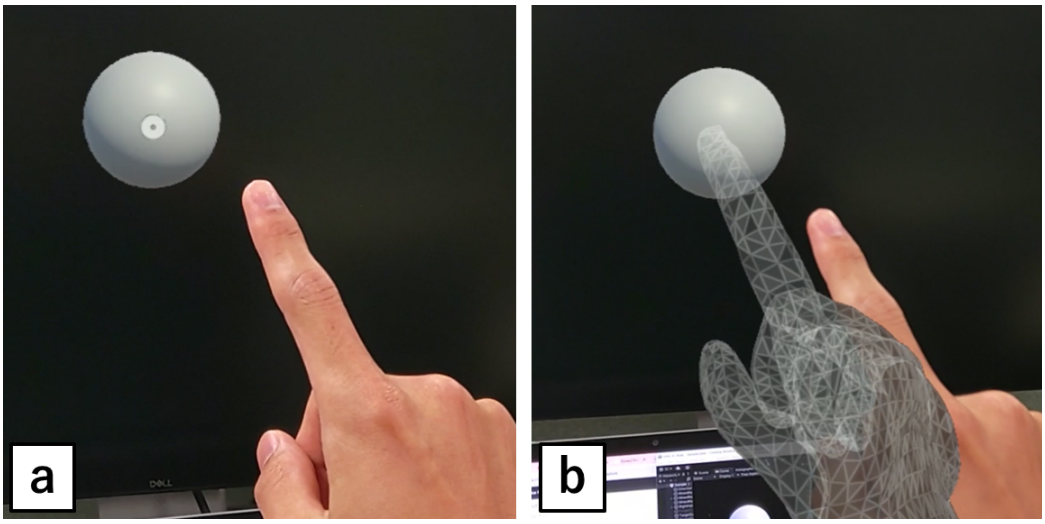


図 3.4: 2 種類のカーソルがターゲットに吸着している様子．a：指先カーソル．b：ハンドメッシュ．

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．実験参加者が操作に十分に慣れることができ，かつ学習効果を避けることができると考えたためである．

円の中心の実験参加者からの距離は 55 cm とした [26]．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 3.2 に示す順序にて固定した．

3.7 評価指標

本実験にて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 [10]．

$$TP = \frac{ID_e}{MT} \tag{3.1}$$

また，ID_e は次式にて表される [10]．

$$ID_e = \log_2 \left(\frac{A_e}{W_e + 1} \right) \tag{3.2}$$

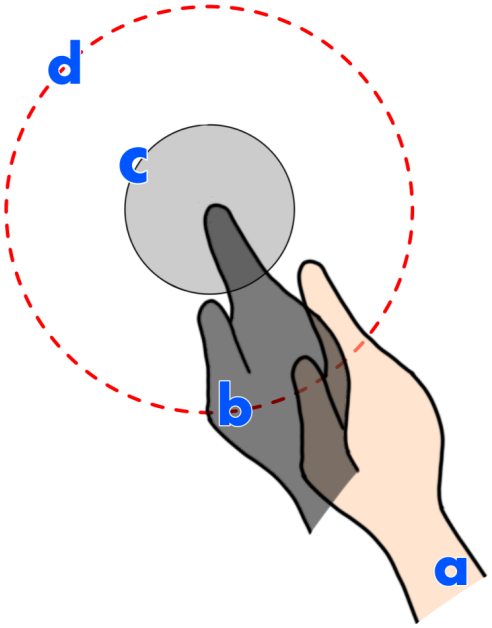


図 3.5: 本実験にて用いるスナッピングの概要．ユーザの手がターゲットの吸着範囲内に入ると，カーソルはターゲットの中心に移動する．a：ユーザの手．b：カーソル．c：ターゲット．d：吸着範囲．

Ae 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（We） We は，選択点のばらつきの小ささを表す指標である．We が小さいほど，選択点のばらつきが小さい，すなわち選択精度が高い選択が可能であることを示す．We は，次式にて表される [10]．

$$W_e = 4.133 \times SD_x \tag{3.3}$$

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 [27]．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．

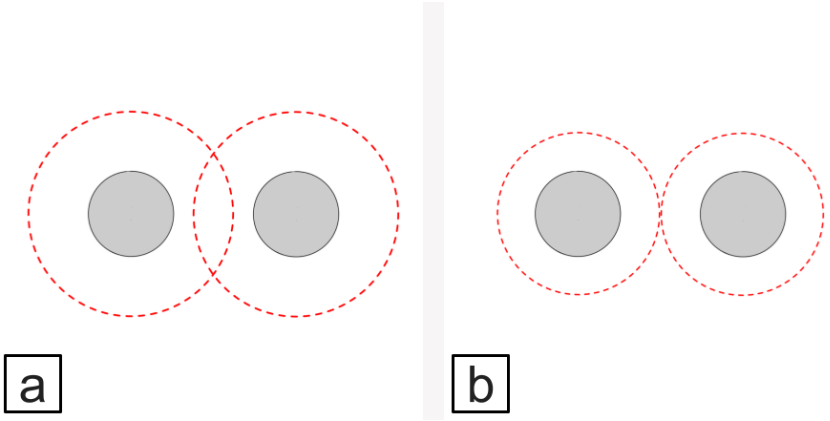


図 3.6: 吸着率の調節の例．異なるターゲットの吸着範囲同士が重なる場合，吸着率は吸着範囲同士が重ならない最大値に調節される．なお，図中の灰色の円，およびその周りの赤色の点線はそれぞれターゲット，および吸着範囲を示す．a: 吸着率の調節前．b: 吸着率の調節後．

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 [10].

$$MT = a + b \times ID, \text{ with } ID = \log_2\left(\frac{D}{W} + 1\right) \tag{3.4}$$

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（知覚・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，およびフラストレーション）から主観的なワークロードを 100 点満点のスコアにて評価するものである [28]．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測定し，100 点満点のスコアにて評価するものである [29]．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

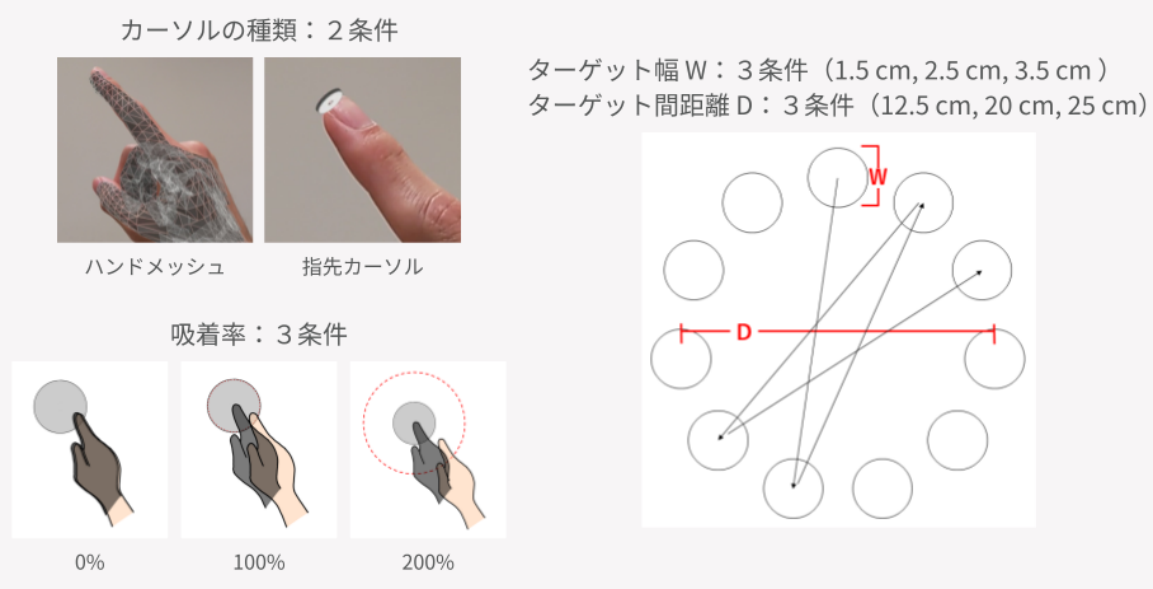


図 3.7: 実験にて用いた独立変数．実験は，4 つの独立変数（カーソルの種類，吸着率，W，および D）を用いた被験者内実験として実施された．

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 × 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 × 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 回のエアタップによる選択の試み（以降，試行）につき，複数回の試行が記録されることがあった．これは，現在の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 [30] 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 [17] 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 [31] と同一に，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 [17, 31] と同一に，整列ランク変換（Aligned rank transform，ART）[32] 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，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 [17] と同一に，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 結果

本節では，MT，TP，We，ER，HM，Fitts の法則のモデルとの適合度，NASA-TLX，SUS，およびアンケートの実験における結果を述べる．

3.9.1 MT

MT の結果を図 3.8a，および図 3.9 に示す．

MT に対して 4 元配置反復測定分散分析を行った結果，吸着率（$F(2, 22) = 19.050$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .634$），W（$F(1.310, 14.408) = 38.785$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .779$），および D（$F(2, 22) = 11.742$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .516$）に有意差が得られた．また，吸着率および W の交互作用（$F(4, 44) = 2.738$, $p = .040$, $\eta_p^2 = .199$），およびカーソルの種類および D の交互作用（$F(2, 22) = 8.615$, $p = .002$, $\eta_p^2 = .439$）に有意差が得られた．

また，多重分析の結果，吸着率に関して，吸着率 200%は，吸着率 0%（$p < .001$），および吸着率 100%（$p = .003$）に比べ MT が有意に短かった．W に関して，W=1.5 cm は，W=2.5 cm（$p < .001$），および W=3.5cm（$p < .001$）に比べ MT が有意に長かった（$p < .001$）．D に関して，D=20 cm は，D=25 cm に比べ MT が有意に短かった（$p < .001$）．吸着率および W の交互作用に関して，全ての吸着率において，W=1.5 cm は，W=2.5 cm（$p < .001$）および W=3.5 cm（$p = .002$）に比べ MT が有意に長かった．また，W=1.5 cm および W=2.5 cm のとき，吸着率 200%は，吸着率 0%（$p < .001$），および吸着率 100%（$p \leq .030$）に比べ MT が有意に短かった．さらに，カーソルの種類および D の交互作用に関して，カーソルの種類が指先カーソルのとき，D=25 cm は，D=12.5 cm（$p = .001$），および D=20 cm（$p < .001$）に比べ MT が有意に長かった．

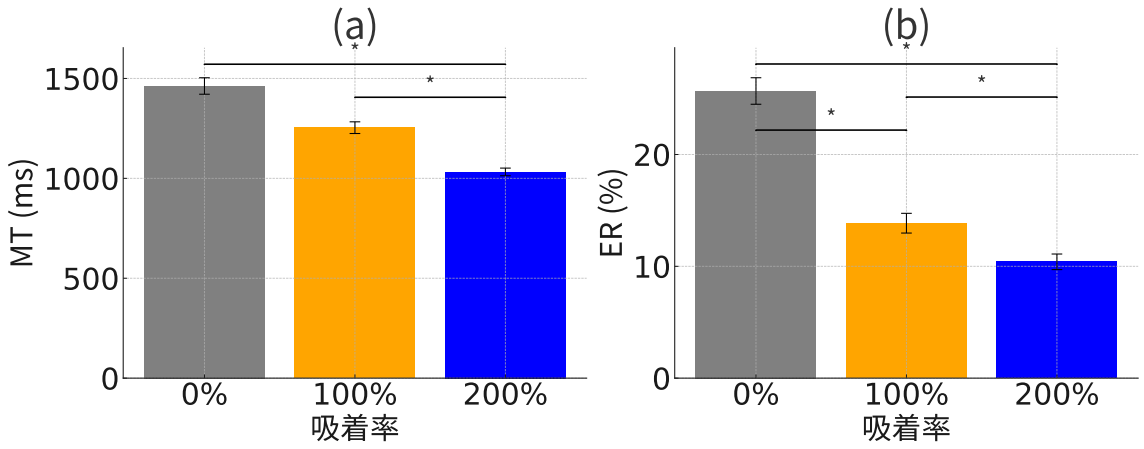


図 3.8: 吸着率間における各指標の平均値．ただし，*およびエラーバーはそれぞれ有意差，および標準誤差を示す．a: 選択完了時間 MT．b: エラー率 ER.

3.9.2 TP

TP の結果を図 3.10a に示す.

TP に対して 4 元配置反復測定分散分析を行った結果, W（$F(2,22)=14.359$, $p<.001$, $\eta_p^2=.566$），および D（$F(2,22)=46.231$, $p<.001$, $\eta_p^2=.808$）に有意差が得られた．また，カーソルの種類および D の交互作用（$F(2,22)=5.584$, $p=.011$, $\eta_p^2=.337$），および W および D の交互作用（$F(4,44)=4.104$, $p=.007$, $\eta_p^2=.272$）に有意差が得られた.

また，多重分析の結果，W に関して，W が大きいほど TP が有意に高かった（$p\leq.012$）．D に関して，D=12.5 cm は，D=20 cm（$p<.001$），および D=25 cm（$p<.001$）に比べ TP が有意に低かった．W および D の交互作用に関して，W=1.5 cm および W=3.5 cm のとき，D=12.5 cm は，D=20 cm（$p<.001$），および D=25 cm（$p\leq.004$）に比べ TP が有意に低かった．また，W=2.5 cm のとき，D=12.5 cm は，D=25 cm（$p<.001$）に比べ TP が有意に低かった．さらに，D=12.5 cm のとき，W=1.5 cm は W=2.5 cm に比べ TP が有意に低く（$p=.019$），W=2.5 cm は W=3.5 cm に比べ TP が有意に高かった（$p=.049$）．また，D=20 cm および D=25 cm のとき，W=1.5 cm は，W=2.5 cm（$p\leq.027$），および W=3.5 cm（$p\leq.018$）に比べ TP が有意に低かった．カーソルの種類および D の交互作用に関して，全てのカーソルにおいて，D=12.5 cm は，D=20 cm（$p\leq.002$），および D=25 cm（$p<.001$）に比べ TP が有意に低かった．また，D=20 cm のとき，指先カーソルは，ハンドメッシュに比べ TP が有意に高かった（$p=.021$）.

3.9.3 We

We の結果を図 3.11a に示す.

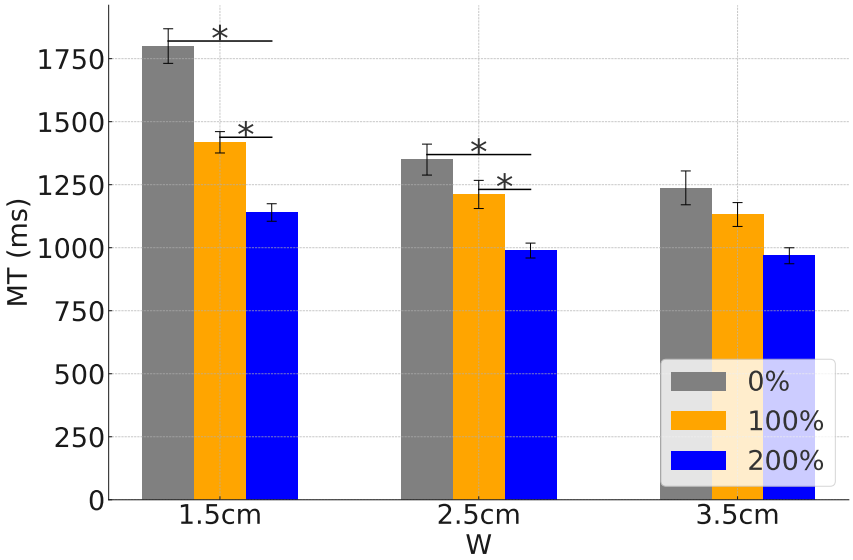


図 3.9: 吸着率× W 間における選択完了時間 MT の平均値．ただし，*およびエラーバーはそれぞれ有意差，および標準誤差を示す．

We に対して 4 元配置反復測定分散分析を行った結果, カーソルの種類（$F(1,11) = 6.664$, $p = .026$, $\eta_p^2 = .377$），および W（$F(2,22) = 6.700$, $p = .005$, $\eta_p^2 = .379$）に有意差が得られた．また，W および D の交互作用（$F(4,44) = 5.323$, $p = .001$, $\eta_p^2 = .326$）に有意差が得られた．

また，多重分析の結果，カーソルの種類に関して，指先カーソルは，ハンドメッシュに比べ We が有意に低かった（$p = .026$）．W に関して，W=2.5 cm は，W=3.5 cm に比べ We が有意に低かった（$p = .020$）．W および D の交互作用に関して，W=3.5 cm のとき，D=12.5 cm は，D=20 cm に比べ We が有意に高かった（$p = .015$）．また，D=12.5 cm のとき，W=3.5 cm は，W=1.5 cm（$p = .003$），および W=2.5 cm（$p = .005$）に比べ We が有意に高かった．

3.9.4 ER

ER の結果を図 3.8b，および図 3.10b に示す．

ER に対して 4 元配置反復測定分散分析を行った結果，吸着率（$F(2,22) = 44.268$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .801$），W（$F(2,22) = 36.041$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .766$），および D（$F(2,22) = 6.010$, $p = .008$, $\eta_p^2 = .353$）に有意差が得られた．また，カーソルの種類および D の交互作用（$F(2,22) = 13.071$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .543$）に有意差が得られた．

また, 多重分析の結果, 吸着率に関して, 吸着率が高いほど ER が有意に低かった（$p \leq .030$）．W に関して，W が大きいほど ER が有意に低かった（$p \leq .040$）．D に関して，D=12.5 cm は，D=20 cm に比べ ER が有意に大きかった（$p = .021$）．カーソルの種類および D の交互作用に関して，カーソルの種類が指先カーソルのとき，D=20 cm は，D=12.5 cm（$p = .002$），および D=25 cm（$p = .005$）に比べ ER が有意に低かった．また，カーソルの種類がハンド

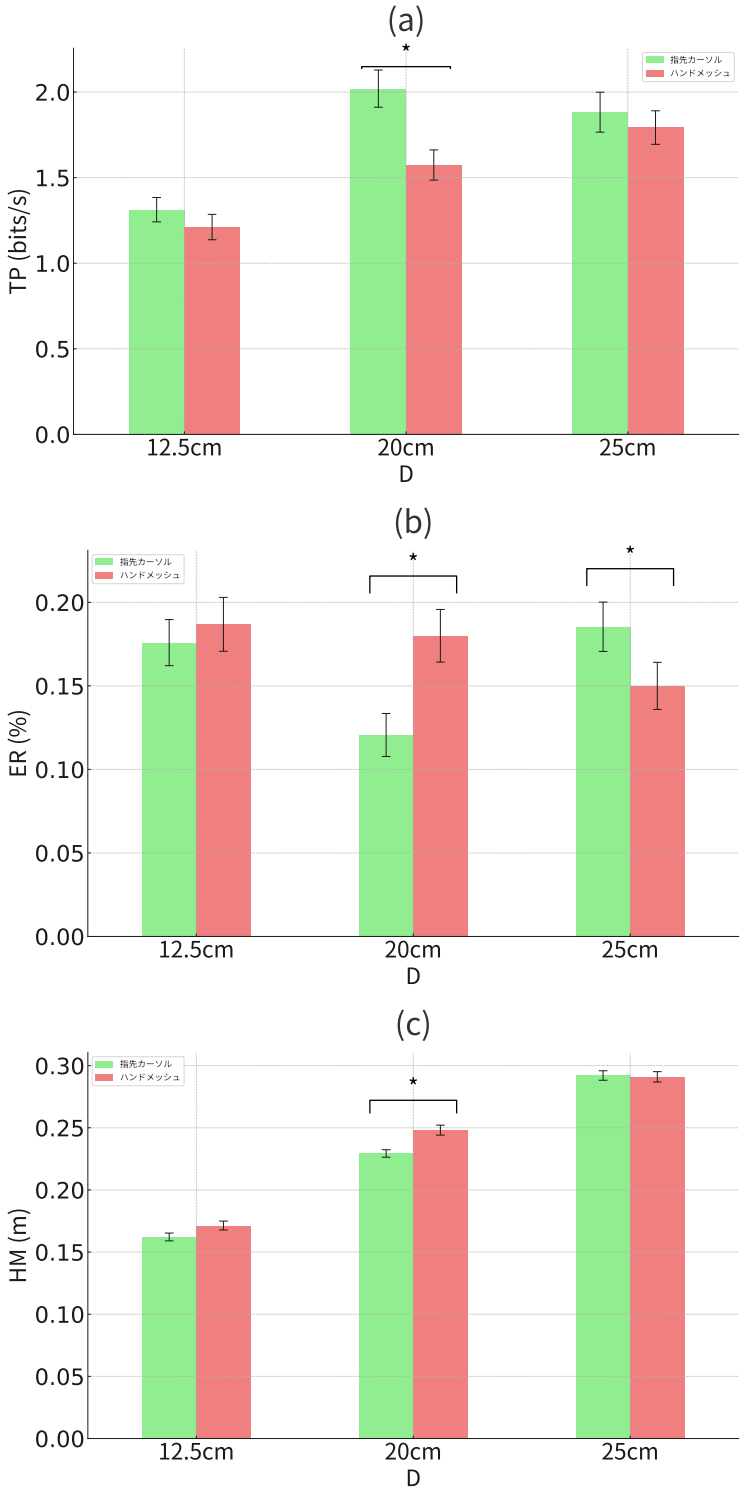


図 3.10: カーソルの種類× D 間における各指標の平均値．ただし，*およびエラーバーはそれぞれ有意差，および標準誤差を示す．a: スループット TP．b: エラー率 ER．c: 手の移動量 HM．

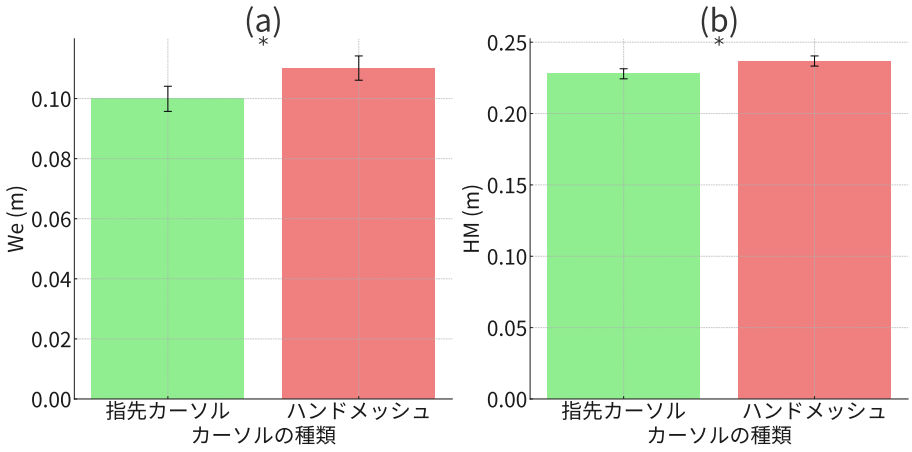


図 3.11: カーソルの種類間における各指標の平均値．ただし，*およびエラーバーはそれぞれ有意差，および標準誤差を示す．a: 有効幅 We．b: 手の移動量 HM．

メッシュのとき，D=25 cm は，D=12.5 cm に比べ ER が有意に低かった（$p = .024$）．さらに，D=20 cm および D=25 cm のとき，指先カーソルは，ハンドメッシュに比べ ER が有意に低かった（$p \leq .012$）．

3.9.5 *HM*

HM の結果を図 3.11b，および図 3.10c に示す．

HM に対して 4 元配置反復測定分散分析を行った結果, カーソルの種類（$F(1, 11) = 9.177$, $p = .011$, $\eta_p^2 = .455$), 吸着率（$F(2, 22) = 3.511$, $p < .048$, $\eta_p^2 = .242$), W（$F(2, 22) = 16.138$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .595$），および D（$F(2, 22) = 649.193$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .983$）に有意差が得られた．また，カーソルの種類および D の交互作用（$F(2, 22) = 6.335$, $p = .007$, $\eta_p^2 = .365$），W および D の交互作用（$F(4, 44) = 2.772$, $p = .002$, $\eta_p^2 = .241$），カーソルの種類，吸着率，および D の交互作用（$F(4, 44) = 3.502$, $p = .002$, $\eta_p^2 = .201$）に有意差が得られた．

また，多重分析の結果，カーソルの種類に関して，指先カーソルは，ハンドメッシュに比べ HM が有意に小さかった（$p = .011$）．吸着率に関しては，分散分析の結果においては有意差が得られたが，多重分析においては有意差が得られなかった．W に関して，W=1.5 cm は，W=2.5cm（$p = .003$），および W=3.5 cm（$p = .002$）に比べ HM が有意に大きかった．D に関して，D が大きいほど HM が有意に大きかった（$p < .001$）．カーソルの種類および D の交互作用に関して，全てのカーソルにおいて，D が大きいほど HM が有意に大きかった（$p < .001$）．また，D=20 cm のとき，指先カーソルは，ハンドメッシュに比べ HM が有意に小さかった（$p < .001$）．W および D の交互作用に関して，全ての W において，D が大きいほど HM が有意に大きかった（$p < .001$）．また，D=12.5 cm および D=25 cm のとき，W=1.5 cm は，W=2.5 cm（$p \leq .016$），および W=3.5 cm（$p \leq .030$）に比べ HM が有意に大きかっ

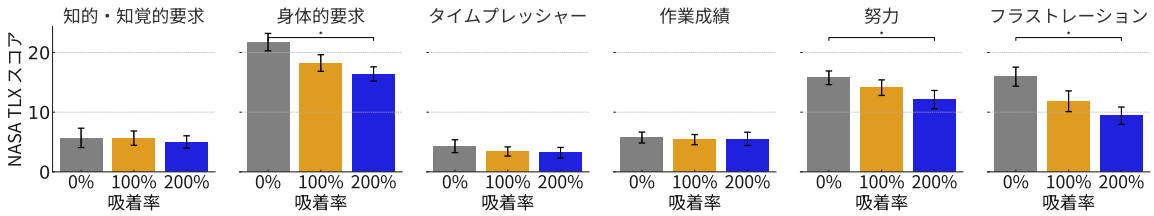


図 3.12: NASA-TLX の平均値．ただし，*およびエラーバーはそれぞれ有意差，および標準誤差を示す．

た．さらに，D=20cm とき，W=1.5 cm は，W=3.5 cm（$p \leq .004$）に比べ HM が有意に大きかった．カーソルの種類，吸着率，および D の交互作用に関して，全てのカーソルの種類および吸着率の組み合わせにおいて，D が大きいほど HM が有意に大きかった（$p \leq .002$）．また，カーソルの種類が指先カーソルかつ D=25 cm のとき，吸着率 0%は，吸着率 200%に比べ HM が有意に大きかった（$p = .045$）．さらに，吸着率 0%かつ D=12.5 cm，および吸着率 100%かつ D=12.5 cm のとき，指先カーソルは，ハンドメッシュに比べ HM が有意に小さかった（$p \leq .046$）．また，吸着率 0%かつ D=20 cm，および吸着率 100%かつ D=25 cm のとき，指先カーソルは，ハンドメッシュに比べ HM が有意に小さかった（$p \leq .006$）．

3.9.6 Fitts の法則のモデルとの適合度

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 3.1 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．

3.9.7 NASA-TLX

NASA-TLX の結果を図 3.12 に示す．

NASA-TLX の 6 項目のそれぞれに対して 2 元配置反復測定分散分析を行った結果，身体的要求（$F(2, 22) = 6.075$, $p = .008$, $\eta_p^2 = .837$），努力（$F(2, 22) = 3.793$, $p = .038$, $\eta_p^2 = .629$），およびフラストレーション（$F(2, 22) = 7.230$, $p = .004$, $\eta_p^2 = .898$）において，吸着率に有意差が得られた．また，多重分析の結果，身体的要求（$p = .035$），努力（$p = .038$），およびフラストレーション（$p = .021$）の全ての項目において，吸着率 0%は，吸着率 200%に比べスコアが有意に高かった．

3.9.8 SUS

SUS の結果を図 3.13 に示す．

SUS スコアに対して 2 元配置反復測定分散分析を行った結果，吸着率（$F(2, 22) = 16.671$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .602$）に有意差が得られた．また，多重分析の結果，吸着率 0%は，吸着率 100%（$p = .018$），および吸着率 200%（$p < .001$）と比べ SUS スコアが有意に低かった．

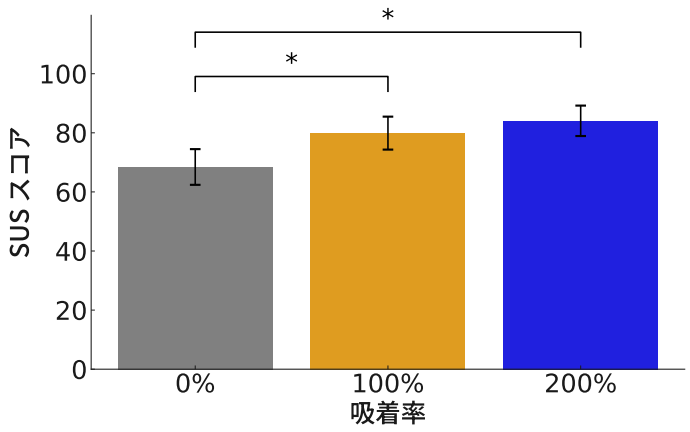


図 3.13: SUS の平均値．ただし，*およびエラーバーはそれぞれ有意差，および標準誤差を示す．

表 3.1: 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

3.9.9 アンケート

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「カーソルがターゲットの中心に移動することに対する印象」のそれぞれに対して 2 元配置反復測定分散分析を行った結果，いずれにおいても有意差は得られなかった．また，上記 2 項目の相関係数は 0.272 であった．すなわち，上記 2 項目間に相関関係は認められなった．

また，事後アンケートおけるカーソルの種類 2 条件×吸着率 3 条件=計 6 条件の好みに応じた順位付けの結果を図 3.14 に示す．

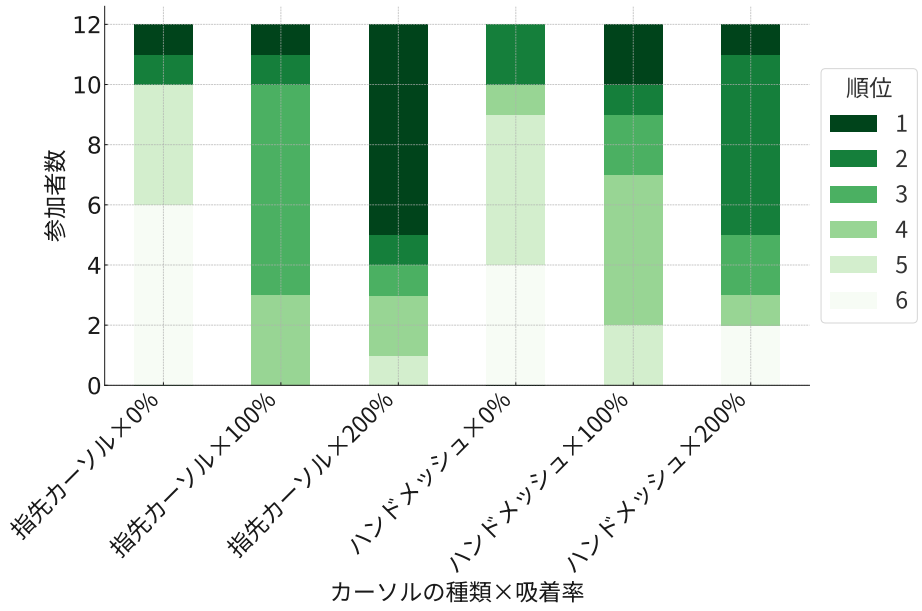


図 3.14: 参加者によるカーソルの種類 2 条件×吸着率 3 条件＝ 6 条件の順位付けの結果．色が濃いほど高い順位が付けられたことを示す．

第4章　考察

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．したがって，本章では，カーソルの種類，吸着率，カーソルの種類および吸着率の交互作用，およびカーソルに対する自己所有感に関する考察を述べる．

4.1　カーソルの種類

カーソルの種類に関して，We 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 3.11a）．この結果は，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 3.10a）および *HM*（図 3.11c）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 3.11b）．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により描画されたユーザ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．そのため，*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，ハンドメッシュによって描画されたユーザ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好みに応じた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 位に選んだことから，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 3.14）．

4.2 吸着率

吸着率に関して，ER に対する吸着率の主効果が検出された．具体的には，吸着率が高いほど有意に優れていた（図 3.8b）．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=2.5cm 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 3.9）．すなわち，特に W= 1.5 cm および W=2.5cm 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 3.12）．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 3.13）．また，事後アンケートにおける好みに応じた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 3.14）．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 0%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 が小さくなることが，高い吸着率ほど高い性能を示した一因と考えられる．

4.3 カーソルの種類および吸着率の交互作用

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．しかし，実験の結果，カーソルの種類および吸着率の交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．

4.4 カーソルに対する自己所有感

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．

第5章　今後の課題

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．ゆえに，左利きを対象とした調査が必要である．

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った．ゆえに，より実践的な環境を想定した実験設計における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にも影響を与えた可能性がある．ゆえに，エアタップ以外の選択方法を用いた調査を行う必要がある．

また，本研究にて用いた吸着率の上限は 200%であったが，実験結果から，より高い吸着率がより高いターゲット選択性能を発揮する可能性が示された．ゆえに，200%よりも高い吸着率を用いた調査を行う必要がある．

第6章　結論

本研究では，ISO9241-411 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．

謝辞

本研究を進めるに当たり，志築文太郎先生，高橋伸先生，川口一画先生には貴重なご意見およびご指導を賜りました．心から感謝申し上げます．特に志築文太郎先生においては，研究の進め方や論文の書き方をはじめとし，研究に関することを一からご指導いただきました．また，学生生活や進路に関しても，多くの助言とご指導をいただきました．ここに深く感謝の意を表します．

また，インタラクティブプログラミング研究室の同輩，先輩方には，研究に関する相談や実験協力において，大変お世話になりました．心から感謝申し上げます．さらに，WAVE チームの皆さまには，チームゼミにおけるご意見や論文添削をはじめとし，研究に関する多くの助言を頂きました．深く感謝いたします．特に角田陸氏には，研究方針や実験実施，論文投稿など，本研究における重要な場面において多くのご指導をいただきました．重ねて感謝申し上げます．

最後に，私の学生生活を経済的に支えてくださった家族に深く感謝申し上げます．

参考文献

[1] Ronald T. Azuma. A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 6, No. 4, pp. 355–385, 1997.

[2] Fabio Arena, Mario Collotta, Giovanni Pau, and Francesco Termine. An overview of augmented reality. *Computers*, Vol. 11, No. 2, pp. 1–15, 2022.

[3] Microsoft. Direct manipulation with hands, `https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/design/direct-manipulation`（最終閲覧日: 2024 年 1 月 26 日）.

[4] Yahya Ghazwani and Shamus Smith. Interaction in augmented reality: Challenges to enhance user experience. In *Proceedings of the 2020 4th International Conference on Virtual and Augmented Reality Simulations*, ICVARS 2020, pp. 39–44, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.

[5] Yves Guiard, Renaud Blanch, and Michel Beaudouin-Lafon. Object pointing: A complement to bitmap pointing in GUIs. In *Proceedings of Graphics Interface 2004*, GI '04, pp. 9–16, Waterloo, CAN, 2004. Canadian Human-Computer Communications Society.

[6] Shari Trewin, Simeon Keates, and Karyn Moffatt. Developing steady clicks: A method of cursor assistance for people with motor impairments. In *Proceedings of the 8th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, Assets '06, pp. 26–33, New York, NY, USA, 2006. Association for Computing Machinery.

[7] Aileen Worden, Nef Walker, Krishna Bharat, and Scott Hudson. Making computers easier for older adults to use: Area cursors and sticky icons. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '97, pp. 266–271, New York, NY, USA, 1997. Association for Computing Machinery.

[8] Ville Mäkelä, Tomi Heimonen, and Markku Turunen. Magnetic Cursor: Improving target selection in freehand pointing interfaces. In *Proceedings of The International Symposium on Pervasive Displays*, PerDis '14, pp. 112–117, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.

[9] Ye Yuan and Anthony Steed. Is the rubber hand illusion induced by immersive virtual reality? In *2010 IEEE Virtual Reality Conference (VR)*, pp. 95–102, 2010.

[10] International Organization for Standardization. ISO/TS 9241-411:2012, https://www.iso.org/standard/54106.html（最終閲覧日: 2024 年 1 月 26 日）.

[11] 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: 2024 年 1 月 26 日）.

[12] Microsoft. https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/design/cursors#head-gaze-cursors.

[13] Ishan Chatterjee, Robert Xiao, and Chris Harrison. Gaze+gesture: Expressive, precise and targeted free-space interactions. In *Proceedings of the 2015 ACM on International Conference on Multimodal Interaction*, ICMI '15, pp. 131–138, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.

[14] Ken Pfeuffer, Benedikt Mayer, Diako Mardanbegi, and Hans Gellersen. Gaze + pinch interaction in virtual reality. In *Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction*, SUI '17, pp. 99–108, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.

[15] Jeffrey S. Pierce, Andrew S. Forsberg, Matthew J. Conway, Seung Hong, Robert C. Zeleznik, and Mark R. Mine. Image plane interaction techniques in 3D immersive environments. In *Proceedings of the 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics*, I3D '97, pp. 39–43, New York, NY, USA, 1997. Association for Computing Machinery.

[16] 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. In *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, pp. 145:1–145:18, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.

[17] Uta Wagner, Mathias N. Lystbæk, Pavel Manakhov, Jens Emil Sloth Grønbæk, Ken Pfeuffer, and Hans Gellersen. A Fitts' law study of gaze-hand alignment for selection in 3D user interfaces. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, pp. 252:1–252:15, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.

[18] Yushi Wei, Rongkai Shi, Difeng Yu, Yihong Wang, Yue Li, Lingyun Yu, and Hai-Ning Liang. Predicting gaze-based target selection in augmented reality headsets based on eye and head endpoint distributions. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, pp. 283:1–283:14, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.

[19] Shaoyao Zhang, Yu Tian, Chunhui Wang, and Kunlin Wei. Target selection by gaze pointing and manual confirmation: Performance improved by locking the gaze cursor. Ergonomics, pp. 1–24, 2020.

[20] J. Karen Parker, Regan L. Mandryk, Michael N. Nunes, and Kori M. Inkpen. Tractorbeam selection aids: Improving target acquisition for pointing input on tabletop displays. In *Human-Computer Interaction - INTERACT 2005*, pp. 80–93, Berlin, Heidelberg, 2005. Springer Berlin Heidelberg.

[21] Matthias Baldauf and Peter Fröhlich. 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.

[22] Microsoft. Getting around HoloLens 2, `https://learn.microsoft.com/en-us/hololens/hololens2-basic-usage#select-using-air-tap`（最終閲覧日: 2024 年 1 月 26 日）.

[23] R. William Soukoreff and I. Scott MacKenzie. Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of Fitts' law research in HCI. *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 61, No. 6, pp. 751–789, 2004.

[24] I. Scott MacKenzie. Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction. *Hum.-Comput. Interact.*, Vol. 7, No. 1, pp. 91–139, mar 1992.

[25] Paul M Fitts. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 47, No. 6, pp. 381–391, 1954.

[26] Machuca Mayra Donaji Barrera and Wolfgang Stuerzlinger. The effect of stereo display deficiencies on virtual hand pointing. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, pp. 207:1–207:14, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.

[27] Duc-Minh Pham and Wolfgang Stuerzlinger. Is the pen mightier than the controller? a comparison of input devices for selection in virtual and augmented reality. In *Proceedings of the 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp. 35:1–35:11, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.

[28] Sandra G. Hart and Lowell E. Staveland. Development of NASA-TLX (task load index): Results of empirical and theoretical research. In *Human Mental Workload*, Advances in Psychology, pp. 139–183. North-Holland, 1988.

[29] John Brooke. *SUS – a quick and dirty usability scale*, pp. 189–194. 1996.

[30] Shota Yamanaka. Test-retest reliability on movement times and error rates in target pointing. In *Proceedings of the 2022 ACM Designing Interactive Systems Conference*, DIS '22, pp. 178–188, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.

[31] Anil Ufuk Batmaz, Kangyou Yu, Hai-Ning Liang, and Wolfgang Stuerzlinger. Improving effective throughput performance using auditory feedback in virtual reality. In *Proceedings of the 2022 ACM Symposium on Spatial User Interaction*, SUI '22, pp. 18:1–18:11, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.

[32] Jacob O. Wobbrock, Leah Findlater, Darren Gergle, and James J. Higgins. The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pp. 143–146, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.

著者論文リスト

本論文に関する論文

- 査読なし国内会議論文

1. 石井奏多，角田陸，志築文太郎．AR 空間内におけるカーソルのターゲットへの吸着を用いたターゲット選択手法の試作．第 31 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，日本ソフトウェア科学会，2023 年 12 月，3 pages.
2. 石井奏多，角田陸，志築文太郎．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．情報処理学会研究報告，HCI-206，情報処理学会，2024 年 1 月，8 pages.

付 録A　実験において用いたアンケート

本付録では，実験において用いた事前アンケート，タスク後アンケート，NASA-TLX アンケート，および事後アンケートを示す.

A.1　事前アンケート

実験において用いた事前アンケートを図 A.1，図 A.2，および図 A.3 に示す.



図 A.1: 事前アンケート-Part1.

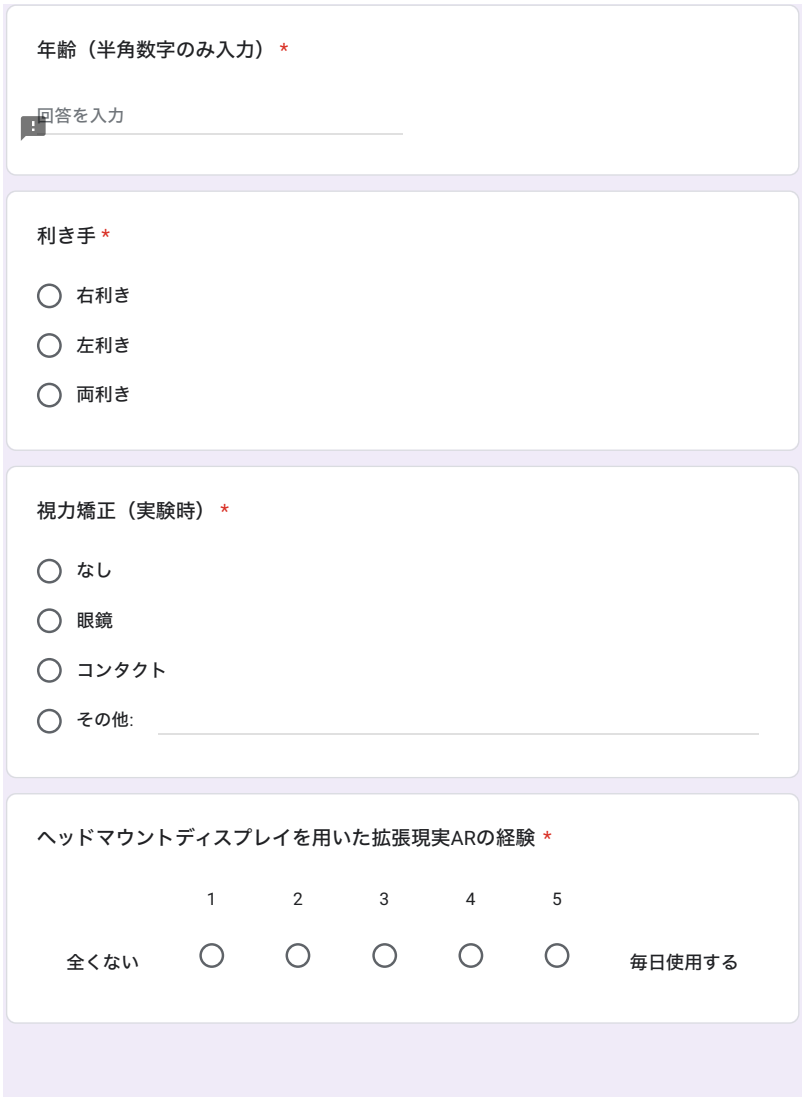


図 A.2: 事前アンケート-Part2.



図 A.3: 事前アンケート-Part3.

A.2　タスク後アンケート

実験において用いたタスク後アンケートを図 A.4，図 A.5，図 A.6，図 A.7，図 A.8，図 A.9，および図 A.10 に示す．なお，本アンケートは，SUS アンケートを含む．



タスク後アンケート

「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」

kishii@iplab.cs.tsukuba.ac.jp アカウントを切り替える

共有なし

* 必須の質問です

参加者ID *

回答を入力

カーソルの種類 *

- 指先カーソル
- ハンドメッシュ

吸着率 *

- 0%
- 100%
- 200%

次へ

フォームをクリア

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSeGhxSeUv3om6IDb_WLTGFtBA95O7oGXHyu1Id9woVPzsbaqQ/viewform 2024/01/22, 5:08
Page 1 of 2

図 A.4: タスク後アンケート-Part1.



図 A.5: タスク後アンケート-Part2．本問は，吸着率 100%，および吸着率 200%のときのみ使用された．



図 A.6: タスク後アンケート-Part3.



図 A.7: タスク後アンケート-Part4．本問は，SUS アンケートの内容である．



図 A.8: タスク後アンケート-Part5．本問は，SUS アンケートの内容である．

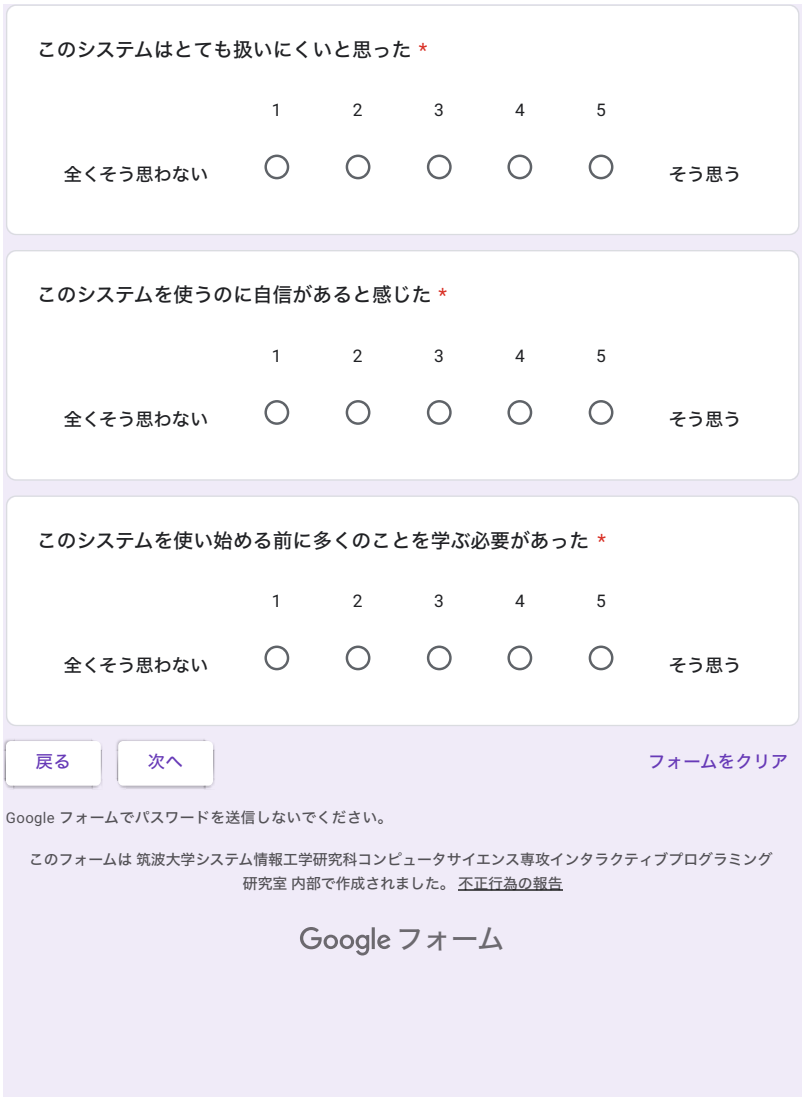


図 A.9: タスク後アンケート-Part6．本問は，SUS アンケートの内容である．



図 A.10: タスク後アンケート-Part7.

A.3　NASA-TLX アンケート

実験において用いた NASA-TLX アンケートを図 A.11，および図 A.12 に示す.

タスクアンケート - パート 1

タスクの経験に最も近い各スケール上のポイントをクリックしてください

知的・知覚的要求



小さい　大きい

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



小さい　大きい

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



弱い　強い

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



良い　悪い

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



少ない　多い

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



低い　高い

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

次へ >>

図 A.11: NASA-TLX アンケート-Part1.



図 A.12: NASA-TLX アンケート-Part2．回答者は，画面上に表示された 2 つの指標のうち，重要であると考える方を選択する．

A.4　事後アンケート

実験において用いた事後アンケートを図 A.13，および図 A.14 に示す．



図 A.13: 事後アンケート-Part1.



本実験にて利用した6つの条件を好みに応じて順位付けしてください．（1位 = 最も好む） *

	1位	2位	3位	4位	5位	6位
指先カーソル × 0%	○	○	○	○	○	○
指先カーソル × 100%	○	○	○	○	○	○
指先カーソル × 200%	○	○	○	○	○	○
ハンドメッシュ × 0%	○	○	○	○	○	○
ハンドメッシュ × 100%	○	○	○	○	○	○
ハンドメッシュ × 200%	○	○	○	○	○	○

本実験全体を通した感想を自由に記述してください． *

回答を入力

送信　フォームをクリア

Google フォームでパスワードを送信しないでください。

このフォームは 筑波大学システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻インタラクティブプログラミング研究室 内部で作成されました。 不正行為の報告

https://docs.google.com/forms/d/1mqMzuXEizJfB1jrDTPvKFNDY3ro3jhUefPxFxTBtREc/viewform?edit_requested=true 2024/01/22, 5:11
Page 2 of 3

図 A.14: 事後アンケート-Part2.