

筑波大学大学院博士課程
理工情報生命学院
システム情報工学研究群修士論文

スマートフォン向けの視線およびタッチを
利用した片手ポインティング手法

池田 凌
修士（工学）
（情報理工学位プログラム）

指導教員 志築 文太郎

2022年3月

概要

スマートフォンを片手のみで使用する際、親指が届きにくい領域が存在することからユーザはスマートフォンを持ち替える必要がある。しかし、頻繁な持ち方の変更はスマートフォンの動きを大きくするため、スマートフォンの持ち方が不安定になる。本論文では、この問題を解決するために設計したユーザの視線およびタッチを組み合わせたスマートフォンの片手ポインティング手法である Gaze Cursor を示す。Gaze Cursor ではユーザの見ている場所の近くにカーソルを起動し、その位置をユーザがドラッグによって微調整することにより親指が届きにくい領域へのポインティングを可能にする。また、Gaze Cursor のポインティング性能およびユーザビリティを調査するために、通常のタッチ操作 (DT) および既存の2つのスマートフォンの片手ポインティング手法である Bezel Cursor (BC) および Head+Touch (HT) との比較実験を行った。その結果、Gaze Cursor のポインティングにかかる時間は 1,448 ms と DT (1,022 ms) よりも遅く、また BC (1,366 ms) と同程度であった一方で、ポインティングの成功率は 98.51% と比較手法よりも高い結果となった。また、スマートフォンの把持の安定性を表すデバイスの回転について、Gaze Cursor は 9.26 度であり、他の手法と比較して最もデバイスの回転が小さかった。このことから、ユーザは Gaze Cursor を用いることにより高精度かつ安定した把持にて親指の届きにくい領域にある対象をポインティングできる。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	片手ポインティングの問題	1
1.2	スマートフォンにおける視線追跡の可能性	3
1.3	本研究の目的とアプローチ	3
1.4	本研究の貢献	4
1.5	本論文の構成	4
第2章	関連研究	5
2.1	スマートフォンの片手ポインティング手法	5
2.1.1	画面を移動または縮小させる手法	5
2.1.2	カーソルを利用する手法	6
2.2	大画面および離れたディスプレイに対するポインティング手法	7
2.3	視線のみを用いたポインティング手法	8
2.4	タッチおよび視線を組み合わせたコンピュータの操作手法	9
第3章	Gaze Cursor の設計	10
3.1	操作手順	10
3.2	設計方針および手段	10
3.2.1	既存のタッチ操作との共存	12
3.2.2	ポインティングの高精度化	12
3.2.3	ポインティングの高速化	13
3.2.4	把持の安定化	13
第4章	視線追跡システムの実装	14
4.1	視線追跡システムの流れ	14
4.2	実装環境	14
4.3	ベースモデルの構成および学習	16
4.4	キャリブレーションおよびパーソナライゼーション	16
第5章	実験：Gaze Cursor の性能調査	18
5.1	実験参加者および実験機器	18
5.2	比較手法	18
5.2.1	BezelCursor (BC)	19

5.2.2	Head+Touch (HT)	19
5.2.3	Gaze Cursor (GC)	19
5.3	タスク	20
5.4	変数および手順	22
5.5	結果	22
5.5.1	TIME	22
5.5.2	SUCCESS	24
5.5.3	ROTATION	25
5.5.4	手法に関するアンケート	25
第 6 章	実験結果のまとめおよび考察	28
6.1	DT	28
6.2	BC	28
6.3	HT	28
6.4	GC	29
第 7 章	議論および今後の課題	31
7.1	Gaze Cursor の改善	31
7.2	視線追跡の精度の影響	31
7.3	ユーザの属性および姿勢の影響	33
7.4	明るさの影響	33
7.5	シングルタッチジェスチャの実行可能性	34
第 8 章	おわりに	35
	謝辞	36
	参考文献	37
付 録 A	実験に用いた各種書類	46
A.1	実験に関する事前アンケート	47
A.2	手法に関するアンケート	49
付 録 B	実験におけるアンケートの回答	51
B.1	自由記述コメント	51

目次

1.1	スマートフォンを使用する場面の例. ユーザは例えばデスクの前に座っている時 (a), 歩行時または立っている時 (b), ベッドに横たわっている時 (c) にスマートフォンを使用する.	2
1.2	スマートフォンの持ち方の例. a) スマートフォンを片手で持ち, その親指を用いた操作. b) 片手で持ち, もう一方の人差し指を用いた操作. c) 両手で持ち, 両手の親指を用いた操作.	2
3.1	Gaze Cursor の操作手順. a) 選択対象を凝視する. b) 画面を押し込むことにより凝視位置の近くにカーソルを起動する. c) ドラッグによりカーソルの位置を微調整する. d) 画面から親指を離すことによりカーソルの下の対象を選択する.	11
3.2	画面押し込みの認識の仕組み. 画面に指が触れてから離れるまでの時間がある一定時間 (ロングタップ待機時間) よりも短かった場合にはタップ (a), 長かった場合にはロングタップ (b) と認識される. ロングタップ待機時間よりも前に, 日常のスマートフォン操作にて発生することのないタッチの強さ (押し込み閾値) を超えた場合には押し込みと認識される (c).	11
4.1	ベースモデルの構成. 右目の画像, 左目の反転画像, および目尻ならびに目頭の座標を入力として, 3つの畳み込み層および6つの全結合層によって処理された後, 画面上のユーザの凝視座標を出力する.	15
4.2	キャリブレーションの画面構成. ターゲットは画面の左上から右下へと 30 秒かけてジグザグに進む.	16
5.1	実験における画面構成. 画面を 12×6 に分割したセル内に 12 個のターゲット候補 (数字あり) および 60 個のダミー (数字なし) が配置された.	20
5.2	実験手順. 実験参加者は実験説明および事前アンケートを受けた後, 各手法において練習セッションおよび4回の本番セッションを実施した. GC の場合のみ, 各本番セッションの前に視線追跡のためのキャリブレーションが行われた.	21
5.3	実験の様子. 実験参加者は椅子に深く腰掛け (a), スマートフォンを片手で持ち, その手の親指を用いて (b) タスクを行った.	21
5.4	各手法に対する TIME. エラーバーは 95%信頼区間を表す.	23

5.5	各手法および各ターゲットサイズに対する TIME. エラーバーは 95%信頼区間を表す.	23
5.6	各手法に対する SUCCESS. エラーバーは 95%信頼区間を表す.	24
5.7	各手法および各ターゲットサイズに対する SUCCESS. エラーバーは 95%信頼区間を表す.	24
5.8	各手法に対する ROTATION. エラーバーは 95%信頼区間を表す.	25
5.9	各手法および各回転軸に対する ROTATION. エラーバーは 95%信頼区間を表す.	26
5.10	各手法および各アンケート項目に対する評価. エラーバーは 95%信頼区間を表す.	26
6.1	手法に対する TIME の詳細. ターゲットが表示されて 1 回目のポインティングにおける各手法のカーソルを起動するまでの時間（起動時間）, HT における頭部の向きを用いたカーソルの移動時間（Head 時間）, およびドラッグによるカーソルの移動時間（Drag 時間）を示している.	29
7.1	Gaze Cursor における各ターゲットの中心とカーソル起動座標のユークリッド誤差に対する TIME.	32

表 目 次

5.1	実験参加者の情報.	19
7.1	Gaze Cursor における各ターゲットの中心とカーソル起動座標の誤差. 丸括弧内は標準偏差を表す. 単位は pt である.	32
B.1	DT に対する自由記述コメントの回答	51
B.2	BC に対する自由記述コメントの回答	52
B.3	HT に対する自由記述コメントの回答	52
B.4	GC に対する自由記述コメントの回答	53

第1章 はじめに

スマートフォンは近年最も普及している情報通信端末である [総務 21]。スマートフォンはパーソナルコンピュータおよびタブレット端末などと比較して持ち運びが容易であり、また従来の携帯電話と比較して画面が大きいことから、通話、メール、SNS、ブラウジング、動画視聴、およびゲームなど様々な用途に使用される。そのため、ユーザがスマートフォンを使用する場面も様々である (図 1.1)。例えばデスクの前に座っている時 (図 1.1a)、歩行時または立っている時 (図 1.1b)、およびベッドに横たわっている時 (図 1.1c) などがある。さらに、ユーザのスマートフォンの持ち方もまた様々である (図 1.2)。例えばスマートフォンを片手で持ち、その親指を用いて操作をする場合 (片手操作, 図 1.2a)、片手で持ち、もう一方の手の人差し指で操作する場合 (図 1.2b)、および両手で持ち、両手の親指で操作する場合 (図 1.2c) などがある。

また、スマートフォンにはタッチパネルが搭載されているため、ユーザは主にタッチパネルへのタッチを伴うジェスチャ (タッチジェスチャ) を実行することによりスマートフォンを操作する。タッチジェスチャには例えばタッチパネルに一瞬タッチするタップ、一定時間タッチし続けるロングタップ、タップを連続して2回繰り返すダブルタップ、およびタッチしたのち画面上をなぞるスワイプなどがある。これらのうち、タップはホーム画面におけるアプリケーションの起動、ソフトウェアキーボードにおけるキー入力、およびウェブブラウザにおけるリンク先ページへの遷移など、主に対象を選択すること (ポインティング) に用いられているため、タッチジェスチャの中でも使用される頻度が最も高い [LK18]。

本論文ではスマートフォン操作のうち、片手操作におけるポインティング (片手ポインティング) に焦点をあて、片手ポインティングの問題を解決するために設計したユーザの視線およびタッチを利用した片手ポインティング手法を示す。本章ではまず、片手ポインティングの問題を述べる。続いてスマートフォンにおける視線追跡の可能性を述べる。次に片手ポインティングの問題を解決するための本研究の目的およびアプローチを述べる。最後に本研究の貢献を述べたのち、本論文の構成を述べる。

1.1 片手ポインティングの問題

多くのユーザはスマートフォンを片手操作することがある。これにはユーザが片手操作を好んで使用する場合 [KB07]、および片方の手がカバンおよび傘などの荷物により塞がっているために片手操作を強いられる場合がある。こうしたスマートフォンの片手操作において、スマートフォンの持ち方を変えずにユーザの親指が届く領域は限られている [BLO14,

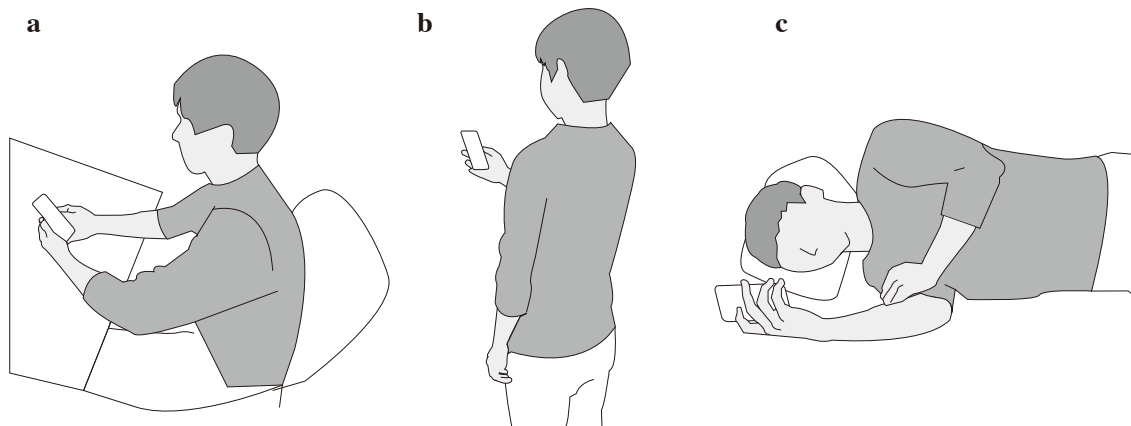


図 1.1: スマートフォンを使用する場面の例. ユーザは例えばデスクの前に座っている時 (a), 歩行時または立っている時 (b), ベッドに横たわっている時 (c) にスマートフォンを使用する.

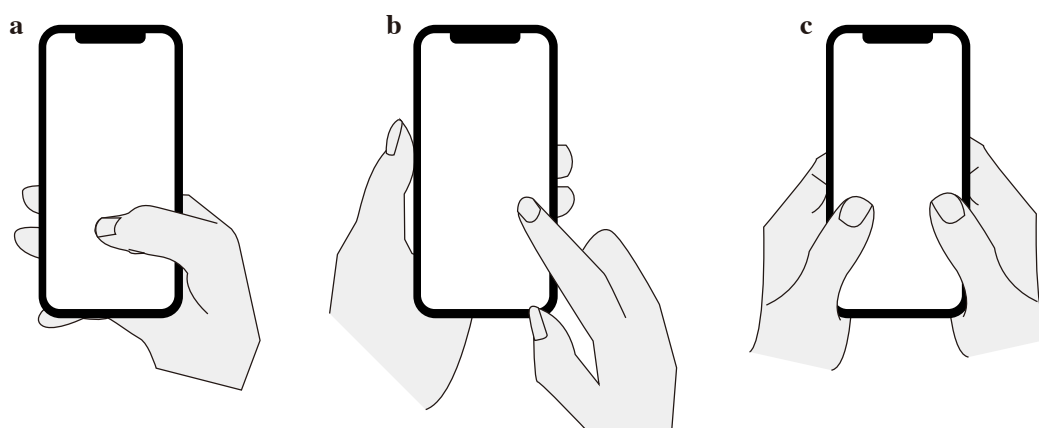


図 1.2: スマートフォンの持ち方の例. a) スマートフォンを片手で持ち, その親指を用いた操作. b) 片手で持ち, もう一方の人差し指を用いた操作. c) 両手で持ち, 両手の親指を用いた操作.

LMBH18, MLFH19]. したがって、ユーザは親指が届かない領域に対するポインティングのためにスマートフォンの持ち方を変える必要がある。しかし、頻繁な持ち方の変更はスマートフォンの動きを大きくするため、片手操作では他の持ち方による操作と比較してスマートフォンの持ち方が不安定になる [ERGT17, ERGT18, IOES20]. これはスマートフォンを落下させる原因ともなりうる。さらに、スマートフォンにおける片手ポインティングの精度は他の持ち方と比較して低い [LK18]. また、スマートフォンの画面の大きさはスマートフォン登場初期の 2008 年 (3.39 インチ) と比較すると、2020 年 (5.59 インチ) では約 1.6 倍に大型化している [BCN20]. 画面の大型化に伴い、ユーザの親指が届かない領域も拡大することから、これらの問題はより深刻となる。

これらのことから、親指が届かない領域に対するポインティングの際に、スマートフォンを安定して操作できる、かつポインティング精度が高い片手ポインティング手法が必要だと考えられる。

1.2 スマートフォンにおける視線追跡の可能性

近年、スマートフォンのカメラおよび処理能力の進歩により、スマートフォン上での画像認識の可能性が拡大している。例えば iPhone のフロントカメラ部に搭載されている True Depth カメラでは深度マップおよび赤外線画像を取得することが可能であり、これを用いることにより顔認証である Face ID を実現している [App21b]. また、iPhone には Neural Engine, Pixel スマートフォンには Tensor Processing Unit と呼ばれる機械学習に特化したプロセッサが搭載されており、これによりスマートフォン上での高速な推論を可能にしている。こうした技術の進歩から、将来スマートフォンのみを用いたユーザの視線追跡の実現が期待される。

1.3 本研究の目的とアプローチ

本研究の目的は、ユーザがスマートフォン上の親指の届きにくい領域にある対象を片手ポインティングする際に、スマートフォンを安定して持てる、かつ高い精度にてポインティングできるようにすることである。そのアプローチとして、本研究ではユーザの視線情報（つまりユーザが画面のどこを見ているか）を親指が届きにくい領域に対するポインティングに利用する。ユーザの視線を用いたポインティングは高速かつ労力が少なく、さらにユーザは対象をポインティングする前に自然に対象をみる [BCF⁺10]. このことから視線はタブレット端末 [PG16] およびテーブルトップ端末 [NVCV16] のようなスマートフォンと比較して大きなディスプレイにおける指および手が届かない領域のポインティング、さらにはユーザから離れた場所にあるディスプレイにおける対象のポインティング [SD12, SD13] に利用されてきた。そこで、本研究では離れた場所にある対象のポインティングに有用だと考えられる視線を利用することにより、安定した把持および高い精度のポインティングができるスマートフォンの片手ポインティング手法である Gaze Cursor を設計した。

1.4 本研究の貢献

本研究の貢献は以下の通りである．

- 親指が届かない領域のポインティングを安定して行えるスマートフォンの片手ポインティング手法である Gaze Cursor の設計
- 既存手法との比較実験による Gaze Cursor の性能調査

1.5 本論文の構成

第 1 章では本研究の背景および目的を述べる．第 2 章では関連研究に対する本研究の位置付けを述べる．第 3 章では提案手法である Gaze Cursor の設計を述べる．第 4 章では Gaze Cursor のための視線追跡システムの実装を述べる．第 5 章では既存手法との比較実験による Gaze Cursor の性能調査を述べる．第 6 章では実験結果のまとめおよび考察を述べる．第 7 章では本研究の議論を述べる．第 8 章では本研究のまとめを述べる．

第2章 関連研究

本研究ではスマートフォンにおいて、親指が届かない領域に対する片手ポインティングをユーザが安定して行えるように、視線およびタッチを利用したポインティング手法を設計した。本章では本研究の関連研究として、本研究と同様に親指が届かない領域に対するポインティングを可能にするスマートフォンの片手ポインティング手法に加え、大画面および離れたディスプレイに対するポインティング手法、視線のみを用いたポインティング手法、ならびにタッチおよび視線を組み合わせたコンピュータの操作手法を述べる。また、これらの研究に対する本研究の位置付けを述べる。

2.1 スマートフォンの片手ポインティング手法

本節では既存のスマートフォンの片手ポインティング手法を画面を移動または縮小させる手法、カーソルを利用する手法に分類して述べる。

2.1.1 画面を移動または縮小させる手法

画面を移動または縮小させる手法では、ユーザは親指の届きにくい領域にある対象を親指の近くに来るように画面全体を移動または縮小させたのち、対象を直接タッチすることによりポインティングする。

これらの手法は市販のスマートフォンにも搭載されている。Apple の iPhone にアクセシビリティ機能として搭載されている Reachability [App21a] では、ユーザは画面の下端を下方向にスワイプする、またはホームボタンをダブルタップすることにより画面の上半分を下に移動できる。また Samsung の Galaxy スマートフォンに搭載されている One-Handed Mode [Sam19] では、ユーザは画面下端を下にスワイプする、またはホームボタンをダブルタップすることにより画面全体を画面右下または左下に縮小できる。

ヒューマンコンピュータインタラクション分野における研究者もまた様々な手法を開発してきた。ThumbSpace [KB07] では、ユーザはドラッグによって指定した領域内に画面全体が縮小されたポップアップを表示でき、それをタッチすることにより親指の届かない領域にある対象をポインティングできる。SlidingScreen [KYL12] では、ユーザは画面端から画面内側へスワイプすることにより、画面をスワイプと逆方向に移動できる。また、ユーザは接触面積が大きくなるようにタッチ [BLC⁺12] した後、ドラッグすることにより、画面をドラッグと同方向に移動できる。LoopTouch [土佐 13] では、ユーザはスマートフォンの前面および背

面にて親指および人差し指の距離が近づくようにスワイプすることにより、画面をループさせる（例えば画面全体が上にずれるとともに、画面からはみ出した部分の下から出てくる）ことにより親指が届きにくい領域を親指が届く位置に移動させる。TiltSlide [CLKS15] では、ユーザはスマートフォンを傾けることにより、傾けた方向に基づいて画面を8方向（画面の4隅または画面の4端の中心）のいずれかの方向に移動できる。TiltReduction [CLKS15] では、ユーザはスマートフォンを傾けることにより画面全体を事前にユーザによって定義された領域に縮小できる。MovingScreen [THH⁺16] では、ユーザは画面の端上をスクロールした後、画面内側にスワイプすることにより画面をスワイプと逆方向に移動できる。この手法ではスクロールの距離に基づいて画面が移動する速度が調節される。IndexAccess [HBH16] および Leira [LBKH16] によって開発された手法では、ユーザはスマートフォンの背面にて人差し指を下にスワイプすることにより画面を下に移動できる。これらの手法ではそれぞれスマートフォンの背面にフォトリフレクタまたはタッチパネルを取り付けることにより人差し指による操作を認識している。Telekinetic Thumb [HRY19] では、ユーザは画面上空にて選択したい対象を親指の近くに引っ張るように親指を動かすことにより画面を移動できる。この手法では画面上空にホバーする指の座標を取得可能なスマートフォンを利用することにより空中の指のジェスチャを認識している。

本研究の位置付け

画面を移動または縮小させる手法では、ユーザは親指を用いて対象を直接タッチすることによりポインティングすることから、ポインティング対象が小さい場合に指が対象を隠してしまうオクルージョン問題および親指が大きいことから正確に対象をポインティングすることが困難になるファットフィンガ問題 [SRC05] が発生する。これによりポインティング精度が低下する可能性がある。特に画面を縮小させる手法では、選択対象も同様に縮小されることからよりポインティング精度が低下する [CLBV19, 八箇20]。これに対し、Gaze Cursor では、ユーザはカーソルを用いて間接的に対象をポインティングすることからオクルージョン問題およびファットフィンガ問題が発生しない。また、実験の結果、小さい対象に対しても高い精度にてポインティングできることがわかった。

2.1.2 カーソルを利用する手法

カーソルを利用する手法では、ユーザはカーソルを親指から離れた選択対象に移動させることにより間接的に対象をポインティングする。

MagStick [RHL08] では、ユーザは画面にタッチすることによりカーソルをタッチした座標に表示させたのち、続くドラッグによりカーソルをドラッグの逆方向に移動できる。Extendible Cursor [KYL12] では、ユーザは画面端から画面内側へスワイプする操作 [RT09] によりカーソルを起動させた後、続くドラッグと同方向にカーソルを移動できる。また、ユーザは接触面積が大きくなるようにタッチした後、続くドラッグと逆方向にカーソルを移動できる。[KYL12] の実験において、指の移動量に対するカーソルの移動量はユーザが自由に調節した。Löchtfeld

ら [LHG13] の手法では、ユーザはスマートフォンの背面にて指をなぞることにより、なぞった方向にカーソルを移動できる。BezelCursor [LFZ16] では画面端から画面内側にスワイプすることにより、ExtendedThumb [LZ15] ではダブルタップによりカーソルが起動したのち、続くドラッグと同方向にカーソルが移動する。CornerSpace [YHHH13] では、ユーザが画面端から画面内側にスワイプした際に画面の4隅に対応する4つのボタンが表示される。ユーザはいずれかのボタンをタッチした後ドラッグすることにより、タッチしたボタンに対応する画面の隅からカーソルを起動および移動できる。TouchOver [大西 16] では、ユーザはホームボタンのダブルタップによりカーソルを起動できる。カーソルは画面上空にホバーする親指から画面の高さの半分上に移動した位置に表示される。ForceRay [CLBV19] では、ユーザは画面を強く押し込むことにより親指の先に伸びるレイおよびそのレイに沿って動くカーソルを起動することができる。ユーザは親指の向きを選択対象に向けることによりレイの向きを選択対象に合わせた後、画面を押し込む強さを調節することによりカーソルを選択対象に移動させる。ユーザが画面を強く押し込むほどカーソルは親指から遠くの方角に移動する。Voelkerら [VHCR20] はユーザの顔の向きを利用した3つの手法（Pure Head, Head + Touch, および Head Area + Touch）を開発した。Pure Head ではユーザは顔の向きのみを用いてカーソルを移動させる。Head + Touch ではユーザは顔の向きによるカーソルの移動後、ドラッグによりカーソルの位置を微調整する。Head Area + Touch では、ユーザは顔の向きにより4分割された画面の領域の中からカーソルを起動する領域を選択する。その後、ユーザは選択した領域の中心に表示されるカーソルをドラッグにより移動できる。

本研究の立ち位置

Gaze Cursorでは、これらの手法と同様にカーソルを利用することによりユーザは間接的に対象をポインティングする。一方で、Gaze Cursorではカーソルがユーザのしている場所の近くで起動することから、カーソルの移動に要する時間を削減することができる。また、ポインティングに必要な指の動きも削減できるため、ポインティング時のスマートフォンの回転量を小さくでき、それによりユーザは安定した把持を維持してポインティングできる。

2.2 大画面および離れたディスプレイに対するポインティング手法

テーブルトップディスプレイのような大画面ディスプレイにおいて、手が届きにくい領域の操作を容易にするために様々な手法が開発されてきた。Parkerら [PMI05] の手法では、テーブルトップにおいてスタイラスの先端からのレイキャスティングにより手が届きにくい領域へのポインティングを可能にした。Abednegoら [ALMP09] の手法では、ユーザが両手にてテーブルトップ上の2点をタッチしたのち、一方のタッチ点をもう一方から離すことにより伸びるマジックハンドの見た目をしたUIを操作することにより、手の届かない対象をポインティングできる。Banerjeeら [BBGV11] の手法では、モーションキャプチャシステムを利用してユーザの手の形状を認識することにより、指先からのレイキャストによるテーブルトップ上

の手の届きにくい領域へのポインティングを可能にした。栗原ら [栗原 14] の手法では、マルチタッチテーブルトップにおいて、ユーザは画面にタッチした2本の指の間から引き出すようにもう片方の手の指を動かす引き出しジェスチャ [YST12] を利用することにより、手の届かない対象をポインティングできる。Tochihara ら [TSK16] の手法では、テーブルトップにおいて、空中における指のピンチの後の手の動きによって動くカーソルにより、手の届きにくい領域へのポインティングを可能にした。

本研究の立ち位置

これらの研究では大画面および離れたディスプレイにおける手の届きにくい対象のポインティングを容易にすることを目的としている一方で、本研究ではこれらのディスプレイと比較して小さいスマートフォンの片手ポインティングを容易にすることを目的としている。また、これらの研究と比較して、本研究ではユーザが親指のみを用いる、および手にデバイスを持って利用する点が異なる。

2.3 視線のみを用いたポインティング手法

ユーザの視線情報（画面上のユーザが見ている座標および時間）のみを用いることにより対象をポインティングする手法の1つとして凝視を用いる手法 [Jac90, Jac91] がある。この手法ではユーザは対象を一定時間以上見続ける（凝視する）ことにより、その対象を選択することができる。対象が凝視されたかはユーザの視線座標が一定時間（凝視時間）以上対象の中に滞在したかにより判定される。しかし、凝視を用いる手法ではユーザが対象を選択しようとしていないにも関わらず、視線座標が対象の中に一定時間以上滞在したことにより、ユーザの意図しない選択が生じる問題（ミダスタッチ問題 [Jac90]）が発生する。この問題を解決するために、対象の大きさ [PLW12] およびユーザの慣れ [NDA+17] に応じて凝視時間を変える、フィッツの法則 [Fit54] に視線の動きが従った場合に対象が選択されるようにする [IAST18]、視線座標のばらつきを利用する [儀本 20] 手法が開発されている。

その他の視線情報のみを用いたポインティング手法として視線の追従を用いる手法 [VPBG13] がある。この手法ではユーザは移動する対象を視線で追従することにより対象を選択できる。また、選択対象の周りを回るオブジェクトを視線で追従することにより対象を選択する手法 [EVBG15, SCZ+20] もある。

本研究の立ち位置

視線のみを用いたポインティング手法は視線追跡の精度が十分に高い環境下においてうまく機能する。一方で、スマートフォンのみを用いた視線追跡の精度はデスクトップ環境および眼鏡型デバイス環境における視線追跡精度に比べて低い。さらに、視線追跡の精度は歩行時のような揺れが伴う環境において低下することから、様々な環境にて使用されるスマート

フォンにおいて視線のみを用いたポインティング手法を利用することは困難であると考えられる。本研究ではスマートフォンの片手ポインティングの補助として視線を利用する。また、Stellmach ら [SD12] と同様に視線追跡の誤差をタッチによる微調整によって補完する。

2.4 タッチおよび視線を組み合わせたコンピュータの操作手法

Nagamatsu ら [NYS10] はスマートフォン上部にステレオカメラを取り付けることにより、ユーザの視線を追跡するシステムを作製した。また、このシステムを利用することにより、地図アプリケーションにおいてユーザの視線座標付近を拡大および縮小させる利用例を示した。Stellmach ら [SD12, SD13] は遠隔の大型ディスプレイ上に対するポインティングにおいて、手元にあるスマートフォンに対する画面へのタッチを視線によるポインティングと組み合わせることにより、正確なポインティングを可能にした。Turner ら [TABG15] は視線および手元のタッチパネルに対するタッチを組み合わせることにより、遠隔の大型ディスプレイ上の対象の回転、拡大縮小、および移動を可能にした。Pfeffer ら [PG16] はタブレット端末において、視線によるポインティングに加えてタッチによりカーソルの位置を微調整することにより指から遠い対象のポインティングを可能にした。

本研究の立ち位置

本研究も [SD12, SD13, TABG15, PG16] と同様に、視線によるポインティングの誤差をタッチにより微調整する。一方で、本研究はこれらの研究と比較して画面が小さく、様々な状況において利用されるスマートフォンにおいて、タッチおよび視線を組み合わせた操作が既存のスマートフォンの片手ポインティング手法と比較して有用であるかを調査した点が異なる。

第3章 Gaze Cursor の設計

スマートフォンにおいて親指の届かない領域に対するポインティングを安定して行える手法である Gaze Cursor を設計した。本章では Gaze Cursor の操作手順および設計方針を述べる。

3.1 操作手順

Gaze Cursor の操作手順を図 3.1 に示す。ユーザはまず、親指が届きにくい領域にあるポインティングしたい対象を凝視する(図 3.1a)。その後、ユーザは画面を強く押し込むことによりカーソルを起動する(図 3.1b)。カーソルはユーザの凝視した座標付近に表示される。これは視線追跡による誤差が生じるためである。その後、ユーザはドラッグによってカーソルの位置を微調整できる(図 3.1c)。その際、カーソルはドラッグと同方向に同距離移動する。カーソルを対象に合わせたのち、ユーザは画面から指を離すことにより対象を選択することができる(図 3.1d)。

上記の手順にてユーザが親指から遠い対象をポインティングできるか確認するために予備実験をした際、ポインティング対象を凝視する前にカーソルを起動してしまったことによりカーソルが凝視した位置から遠い位置で起動してしまうことがあった。その際、「ドラッグによりカーソルを移動しようとしたが、ドラッグしている親指が画面端に来てしまったことによりそれ以上カーソルを動かさず、困惑した。」という意見が得られた。このことから、カーソルの起動位置が対象から遠すぎた場合に、カーソルを再起動できるようにした。ユーザはカーソル起動後、再度画面を強く押し込むことによりカーソルを再起動できる。

3.2 設計方針および手段

以下の設計方針に基づいて Gaze Cursor を設計した。

- 既存のタッチ操作との共存
- ポインティングの高精度化
- ポインティングの高速化
- 把持の安定化

本節では上記のそれぞれの設計方針について、その詳細と実現のための手段を述べる。

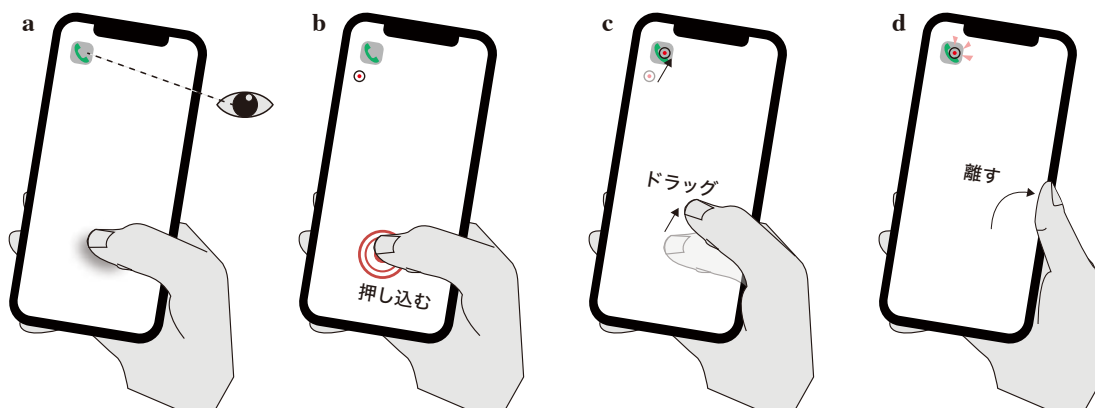


図 3.1: Gaze Cursor の操作手順. a) 選択対象を凝視する. b) 画面を押し込むことにより凝視位置の近くにカーソルを起動する. c) ドラッグによりカーソルの位置を微調整する. d) 画面から親指を離すことによりカーソルの下の対象を選択する.

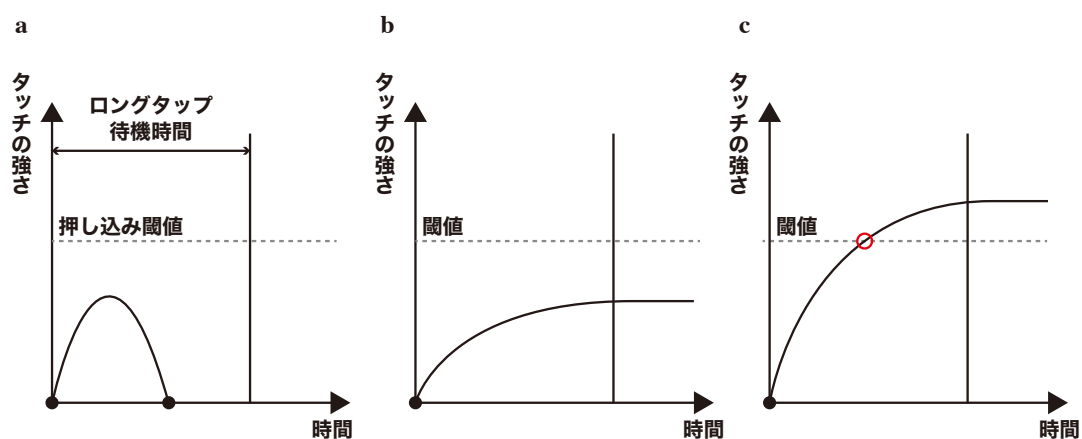


図 3.2: 画面押し込みの認識の仕組み. 画面に指が触れてから離れるまでの時間がある一定時間 (ロングタップ待機時間) よりも短かった場合にはタップ (a), 長かった場合にはロングタップ (b) と認識される. ロングタップ待機時間よりも前に, 日常のスマートフォン操作にて発生することのないタッチの強さ (押し込み閾値) を超えた場合には押し込みと認識される (c).

3.2.1 既存のタッチ操作との共存

ユーザは通常のタッチ操作時に、親指が届かない領域に対するポインティングが必要になった場合に、その補助として片手ポインティング手法を利用すると考えられる。したがって、通常のタッチ操作と片手ポインティング手法とを切り替えるための明確なトリガが必要である。このトリガが日常的なスマートフォン操作において偶発する操作である場合、ユーザの意図しない切り替えが生じる。したがって、トリガには既存のタッチ操作と競合しない操作が必要である。

これまでに様々なトリガが片手ポインティング手法の切り替えに用いられてきた。例えば、接触面積の大きいタッチ（ラージタッチ）[KYL12]、画面端から画面内側へのスワイプ（ベゼルスワイプ）[KYL12, LBKH16]、ホームボタンのダブルタップ [大西 16, App21a]、画面下端の下方スワイプ [App21a, Sam19]、画面の押し込み [CLBV19, VHCR20] がある。Kim ら [KYL12] の実験においてラージタッチはタッチする位置によって接触面積が異なるために信頼性が低いことが報告されている。またベゼルスワイプを起動トリガに利用した場合、1 回のスワイプでカーソルを起動および移動できるため、滑らかな操作を実行できる [LBKH16]。しかし、Gaze Cursor ではカーソルの起動位置は凝視位置の推定結果によって決まるため、カーソルの起動位置がポインティング対象に対してどの方向にあるかが起動するまでわからない。したがって、ベゼルスワイプする方向と違う方向にカーソルを動かす必要が生じる可能性があるため Gaze Cursor の起動トリガとしてベゼルカーソルは適さないと考えられる。また、ホームボタンのダブルタップおよび画面下端の下方スワイプをトリガとした場合、トリガのために指を画面下側に移動させた後、再度親指を快適に操作できる位置まで戻し、その後カーソルを移動させる必要が生じる。そこで Gaze Cursor ではカーソルの起動トリガとして画面の押し込みを採用した。トリガを画面の押し込みにすることにより、トリガに必要な親指の移動量を少なくでき、かつカーソル起動後に自由な方向にカーソルを移動できる。

画面押し込みの認識の仕組みを図 3.2 に示す。通常のタッチ操作では一般的に、画面に指が触れてから離れるまでの時間がある一定時間（ロングタップ待機時間）よりも短かった場合にはタップと認識され（図 3.2a）、ロングタップ待機時間よりも長かった場合にはロングタップと認識される（図 3.2b）。Android スマートフォンにおける標準のロングタップ待機時間は 500 ms である。したがって、ロングタップ待機時間よりも前に、日常のスマートフォン操作にて発生することのないタッチの強さ（押し込み閾値）を超えた場合（図 3.2）に押し込みと認識されることにより、既存のタッチ操作と競合することなく、カーソルを起動できる。

3.2.2 ポインティングの高精度化

タッチスクリーンに対する操作では、ポインティング対象が小さい場合に指が対象を隠してしまうオクルージョン問題および指が大きいことから正確に対象をポインティングすることが困難になるファットフィンガ問題 [SRC05] が発生する。Corsten ら [CLBV19] および八箇ら [八箇 20] の実験では、これらによって画面を縮小させる手法のポインティング精度が低かった。一方で、カーソルを用いる手法はポインティング対象を隠すことがないため、ポインティ

ング精度が高い。このことから Gaze Cursor においてもカーソルを用いることによりオクルージョン問題およびファットフィンガ問題の発生を防ぎ、それによりポインティングの精度を高められると考えられる。

さらに、カーソルを用いる既存の手法の多く [LFZ16, LZ15, YHHH13, KYL12] では小さな指の動きによって画面全体にカーソルを移動できるように、指の移動量に対するカーソルの移動量 (CD 比) を上げている。それに対して本手法では、カーソルの起動位置をユーザの凝視座標とすることにより、カーソルの起動位置と対象との距離を縮めている。これにより、CD 比を上げることなく画面全体にカーソルを移動できるため、より微細なカーソル移動の調整ができると考えられる。

3.2.3 ポインティングの高速化

カーソルを用いる既存の片手ポインティング手法の多く [LFZ16, LZ15, YHHH13, KYL12] ではドラッグによってカーソルを移動させることにより、徐々に対象とカーソルとの距離を小さくすることによりポインティングを行う。また、[CLBV19] では徐々に画面の押し込みの強さを強めることによりポインティングを行う。こうした相対ポインティングのみによってポインティングを行う手法に対し、本手法では凝視座標にカーソルを起動する絶対ポインティングをドラッグによる相対ポインティングと組み合わせている。これにより、相対ポインティングにかかる時間を短くし、それによりポインティングを高速化できると考えられる。

3.2.4 把持の安定化

ユーザのスマートフォンの把持を安定させるためには、親指が届きにくい対象のポインティング時にスマートフォンの持ち替えをなくすことが重要である。したがって、ユーザがスマートフォンを持ち替えることなくポインティング可能な領域 [LMBH18] 内での操作が必要となる。

そこで、本手法ではカーソルの起動に、実行する場所の制約がない、つまりユーザが親指を自由に動かせる場所で実行可能な画面の押し込みを採用した。また、カーソルの起動位置を凝視座標とすることにより、カーソルの移動に必要な指の移動量を削減し、それによりユーザの把持が安定すると考えられる。

第4章 視線追跡システムの実装

Gaze Cursorではカーソルの起動位置としてユーザの凝視座標を用いる。そのため、ユーザが画面上のどこを見ているかを推定する必要がある。そこで、第5章の実験の際に必要な視線追跡システムを実装した。本視線追跡システムはスマートフォンのフロントカメラから取得されるRGB画像からスマートフォン上のユーザの凝視座標を推定する。本章では視線追跡システムの流れ、実装環境、ベースモデルの構成および学習、キャリブレーションおよびパーソナライゼーションを述べる。

4.1 視線追跡システムの流れ

実験で視線追跡を利用する前に事前準備が必要である。まず、サーバ上にて畳み込みニューラルネットワークをベースとした深層学習モデルを大規模データセットを用いて学習させることによりベースモデルを作製する。その後、学習済みのベースモデルをモバイルデバイス、組み込みデバイス、およびIoTデバイスで推論可能なモデルに変換したのち、スマートフォン上にベースモデルを保存する。

次に実験時の視線追跡の流れを述べる。まず、ユーザごとにキャリブレーションを行う。スマートフォン上で取得されたキャリブレーションデータはサーバに送信されたのち、そのデータを用いてサポートベクタ回帰モデル（SVR）を学習させることによりユーザごとにパーソナライゼーションしたモデルを作製する。作製したモデルはスマートフォン用のモデルに変換されたのち、サーバからスマートフォン上に送信および保存される。最終的にスマートフォン上に保存されたベースモデルおよびSVRを用いることにより、スマートフォンのフロントカメラから取得された画像からユーザの凝視座標を推定する。

4.2 実装環境

本システムの実装において、サーバにはブラウザ上でPythonの実行が可能な環境であるGoogle Colaboratoryを使用した。また、スマートフォンにはiPhone XS Maxを利用した。また、利用した主なライブラリとして深層学習モデルの作製および学習にはTensorFlow 2.7.0, SVRの学習にはScikit-Learn 0.19.2, 学習済みのベースモデルおよびSVRのスマートフォン用のモデルへの変換にはそれぞれTensorFlow LiteおよびCoreML Toolsを使用した。

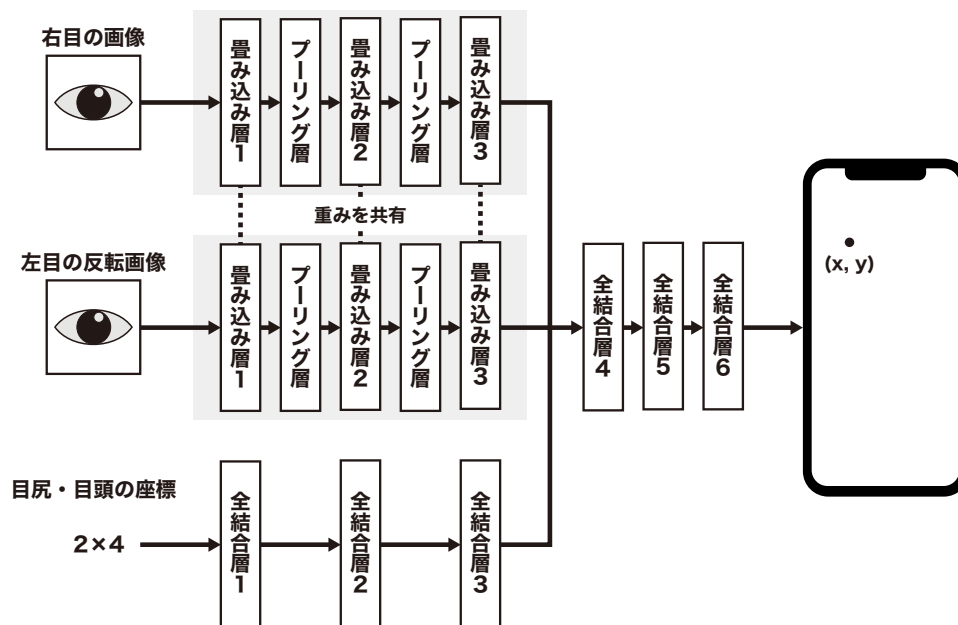


図 4.1: ベースモデルの構成. 右目の画像, 左目の反転画像, および目尻ならびに目頭の座標を入力として, 3つの畳み込み層および6つの全結合層によって処理された後, 画面上のユーザの凝視座標を出力する.

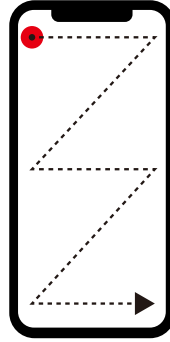


図 4.2: キャリブレーションの画面構成. ターゲットは画面の左上から右下へと 30 秒かけてジグザグに進む.

4.3 ベースモデルの構成および学習

図 4.1 にベースモデルの構成を示す. Valliappan ら [VDS⁺20] と同じネットワーク構成のベースモデルを作製した. このモデルはユーザの右目の画像, 左目の反転画像, ならびに目尻および目頭の座標を入力として, ユーザが凝視している画面上の x および y 座標を 0 から 1 に標準化した値にて出力する. 右目の画像および左目の反転画像はまず, 重みを共有した 3 つの畳み込み層によって処理された後平滑化される. 目尻および目頭の座標は 3 つの全結合層によって処理される. その後それらを結合したのち 3 つの全結合層によって処理されることにより最終的な出力が得られる.

ベースモデルはスマートフォンのフロントカメラから取得される画像およびそれに対応するユーザの凝視座標を含む大規模データセットである GazeCapture [KKK⁺16] を用いて学習された. まず, 学習のためのデータの前処理として GazeCapture の画像中の目尻および目頭の座標を抽出し, その座標をもとに目の領域をクロップした. 目尻および目頭の座標の抽出には画像中の顔の特徴点を抽出可能である Apple Vision フレームワークを利用した. その後, クロップした左目の座標を反転させた. これによりモデルの学習に必要な右目の画像, 左目の反転画像, および目尻ならびに目頭の座標を用意した. その後, これらのデータを用いてベースモデルを学習させた. 学習におけるハイパーパラメータは Valliappan ら [VDS⁺20] と同じである. 学習済みのベースモデルはスマートフォン上にて推論可能なモデル形式である TensorFlow Lite 形式に変換されたのち, スマートフォン上に保存された.

4.4 キャリブレーションおよびパーソナライゼーション

Valliappan ら [VDS⁺20] および Krafka ら [KKK⁺16] と同様に, ユーザごとにキャリブレーションを行い, キャリブレーション時に得られたデータを学習済みベースモデルに入力し, そ

れにより得られる推論結果を SVR の学習のための特徴量に用いることにより，ユーザごとにパーソナライゼーションしたモデルを作製した．

図 4.2 にキャリブレーションの画面構成を示す．キャリブレーションではユーザは画面の左上から右下へと 30 秒かけてジグザグに進むターゲットを凝視し続ける．ターゲットの大きさは 300 ミリ秒ごとに 10 pt-50 pt にアニメーションする．キャリブレーションの間，30 Hz の頻度にてフロントカメラからの画像が取得され，またそれと対応したターゲットの座標が保存される．キャリブレーションによって取得されたフロントカメラの画像から第 4.3 節と同様の手順にて，ベースモデルの入力となる右目の画像，左目の反転画像，ならびに目尻および目頭の座標を抽出し，それらを入力してベースモデルの出力を取得した．こうして取得されたベースモデルの出力およびそれに対応するターゲットの座標は，スマートフォンからサーバ上に送信された．その後，サーバ上にて受信されたベースモデルの出力を特徴量として，ターゲットの座標を正解データとして SVR を学習させることにより，ユーザごとにパーソナライゼーションされたモデルを作製した．なお，SVR の学習におけるハイパーパラメータは Valliappan ら [VDS⁺20] と同じである．その後，学習済みの SVR を CoreML Tools ライブラリを利用することにより，iPhone 上にて推論可能なモデル形式へ変換したのち，それをサーバからスマートフォン上に送信および保存した．

第5章 実験：Gaze Cursorの性能調査

親指の届きにくい領域に対する Gaze Cursor のポインティング性能およびユーザビリティを調査するために、既存のスマートフォンの片手ポインティング手法との比較実験を行った。本章では実験における実験参加者および実験機器、比較手法、タスク、変数および手順、および結果を述べる。

5.1 実験参加者および実験機器

表 5.1 に実験参加者の情報を示す。研究室内の 22 歳から 25 歳（平均 23.50 歳，標準偏差 1.04 歳）の 8 名の大学生および大学院生がボランティアとして実験に参加した。実験参加者は全員男性であった。また，実験参加者のうち 1 名がメガネを，2 名がコンタクトを着用しており，残りの 5 名が裸眼であった。実験参加者の手の大きさは 166.0 mm から 196.7 mm（平均 185.1 mm，標準偏差 10.7 mm），親指の長さは 57.6 mm から 69.8 mm（平均 64.1 mm，標準偏差 3.97 mm）であった。なお，手の大きさおよび親指の長さはそれぞれ [人工 21] における L1 および L9 の長さに対応しており，これらはデジタルノギスを用いて計測された。

実験におけるタスクの提示およびデータの取得には iPhone XS Max（幅：77.4 mm，高さ：157.5 mm，厚さ：7.7 mm，重量：208 g，画面サイズ：6.5 インチ）が用いられた。このスマートフォンは感圧タッチスクリーンを搭載しているため，UITouch クラスの force プロパティを通してタッチの強さを 0 から $\frac{400}{60} \simeq 6.67$ （約 4.0 N [Nel15]）までの範囲の 400 段階の値（つまり $\frac{1}{60}$ 間隔）にて取得できる。

5.2 比較手法

Gaze Cursor (GC) の性能を評価するための比較対象として通常のタッチ操作 (DT)，Li ら [LFZ16] の BezelCursor (BC)，および Voelker ら [VHCR20] の Head+Touch (HT) を用いた。Head+Touch は既存のスマートフォンの片手ポインティング手法の中で最も高速にポインティングできる手法であること，また，BezelCursor は Voelker らの実験にて比較に用いられた手法であることからこれらの手法を比較対象として選択した。以下では各手法の操作方法および本実験における実装を述べる。

表 5.1: 実験参加者の情報.

参加者	年齢	性別	メガネの有無	スマートフォン	手の大きさ	親指の大きさ
P1	23 歳	男性	裸眼	iPhone SE2	174.3 mm	61.4 mm
P2	23 歳	男性	メガネ	iPhone 11 Pro Max	196.7 mm	67.6 mm
P3	24 歳	男性	裸眼	iPhone X	185.7 mm	65.7 mm
P4	25 歳	男性	コンタクト	iPhone 11 Pro	181.8 mm	60.8 mm
P5	23 歳	男性	裸眼	iPhone 7	194.2 mm	65.7 mm
P6	22 歳	男性	コンタクト	iPhone XS	193.7 mm	69.8 mm
P7	22 歳	男性	裸眼	iPhone SE2	166.0 mm	57.6 mm
P8	24 歳	男性	裸眼	iPhone SE2	188.5 mm	64.5 mm

5.2.1 BezelCursor (BC)

BC において、実験参加者は画面端から内側にスワイプすることによりカーソルを起動できる。カーソル起動時、カーソルはスワイプした指の下に表示される。実験参加者はスワイプに続くドラッグによりカーソルを移動させることができる。カーソルはドラッグと同方向に指の移動量の 3 倍移動する。実験参加者はカーソルをターゲット上に移動したのち、画面から指を離すことにより選択を確定できる。

5.2.2 Head+Touch (HT)

HT において、実験参加者は画面を押し込むことによりカーソルが画面の中心に表示される。カーソル起動後、顔をターゲットの方向に向けることによりカーソルを移動させることができる。顔の向きによるカーソルの移動中、再度画面を強く押し込むことによりカーソルの位置を固定できる。その後ドラッグによりカーソルの位置を微調整することができる。微調整においてカーソルはドラッグと同方向に同距離移動する。カーソルをターゲット上に移動したのち、画面から指を離すことにより選択を確定できる。

顔の向きによるカーソルの移動は Voelker ら [VHCR20] の実装と同様に、Apple ARKit にて取得可能な顔の角度およびスマートフォンの中心と顔との距離から計算された。また、カーソルの起動およびカーソルの固定に必要なタッチの強さも Voelker らの実装と同様にそれぞれ 1.33 および 6.67 とした。

5.2.3 Gaze Cursor (GC)

GC ではフロントカメラから 30 Hz の頻度にて RGB 画像を取得している。ユーザが画面を押し込んだ際の画像をもとに第 4 章にて実装した視線追跡システムを用いてユーザの凝

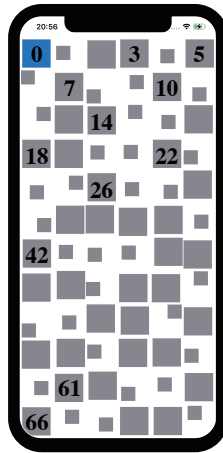


図 5.1: 実験における画面構成. 画面を 12×6 に分割したセル内に 12 個のターゲット候補（数字あり）および 60 個のダミー（数字なし）が配置された.

視座標を推定し，その座標にカーソルが起動する．カーソルの起動およびカーソルの再起動に必要なタッチの強さは HT と同様にそれぞれ 1.33 および 6.67 とした．

5.3 タスク

実験における画面構成を図 5.1 に示す．画面を 12×6 に分割したセル内に 12 個のターゲット候補（数字あり）および 60 個のダミー（数字なし）が配置された．なお，実際のタスク中には数字は表示されていない．ターゲット候補は各セルの中心に，ダミーは各セル内のランダムな位置に配置された．これは Karlson ら [KB07] の実験と同様にターゲットの均等な配置を避けるためである．

実験参加者はタスクとして画面に表示されるターゲット（青色）を選択する．ターゲットはターゲット候補の中からランダムに決定される．DT の場合は画面にタッチしてから離すまでの座標がターゲットの領域内にあった場合にタスク成功となる．BC，HT，および GC の場合は画面から指を離した際のカーソルの中心座標がターゲット領域内にあった場合にタスク失敗となる．実験参加者がターゲットの選択に成功した場合，成功を表す音がフィードバックされるとともに「WAIT」という文字が画面に表示される．その 1 秒後に「WAIT」の文字が消えたのち，次のターゲットが表示される．ターゲットの選択に失敗した場合，失敗を表す音がフィードバックされ，かつ同じターゲットが表示され続ける．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行う．

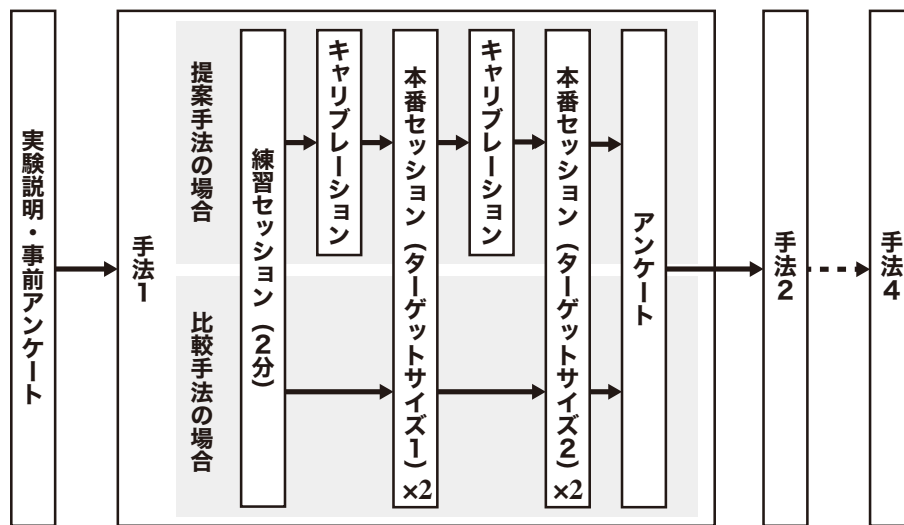


図 5.2: 実験手順. 実験参加者は実験説明および事前アンケートを受けた後, 各手法において練習セッションおよび4回の本番セッションを実施した. GC の場合のみ, 各本番セッションの前に視線追跡のためのキャリブレーションが行われた.

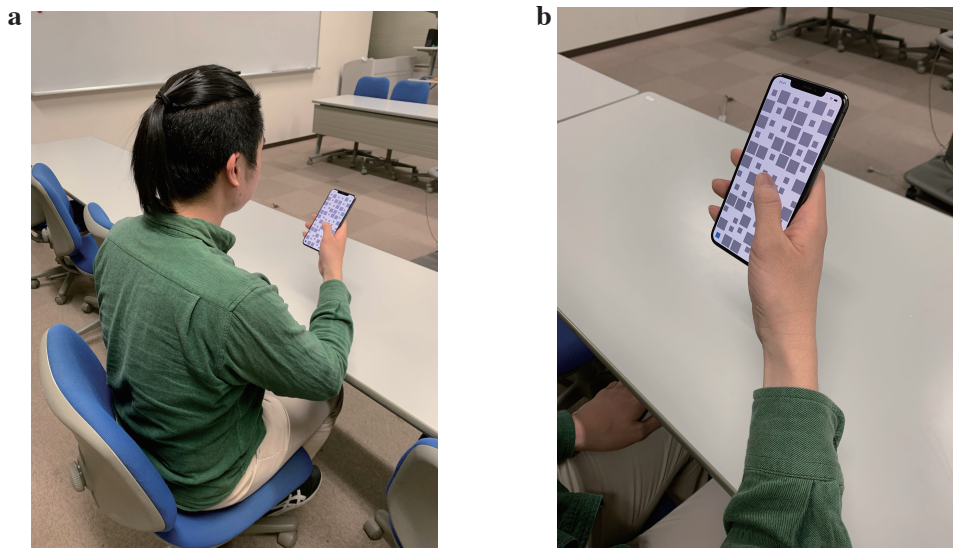


図 5.3: 実験の様子. 実験参加者は椅子に深く腰掛け (a), スマートフォンを片手で持ち, その手の親指を用いて (b) タスクを行った.

5.4 変数および手順

独立変数は手法 (DT, BC, HT, および GC), ターゲット位置, およびターゲットサイズ (大: 60 pt × 60 pt, 小: 30 pt × 30 pt) である. ターゲットサイズはそれぞれ iOS のホーム画面のアイコンのサイズおよびボタンのデフォルトの高さを元に決定された. 従属変数はターゲットのポインティングに成功するまでの時間 TIME, ポインティングの成功率 SUCCESS, およびデバイスの回転 ROTATION である. SUCCESS はポインティングをした回数に対する成功したポインティングの割合である. また, ROTATION は 1 回のポインティングにおけるデバイスの最大の回転角である. これは約 60 Hz の頻度にてスマートフォンの姿勢 (iOS の CMAAttitude プロパティ) を取得することにより計算された.

図 5.2 に実験手順を示す. 実験参加者はまず, 実験の説明を受けた後, 実験に関する事前アンケート (付録 A.1) に回答した. 図 5.3 に実験の様子を示す. 実験参加者は椅子に深く腰掛け, スマートフォンを片手で持ち, その手の親指を用いてタスクを行うように指示された. また, できる限り高速かつ正確にターゲットをポインティングするように指示された. 各手法において, 実験参加者は手法の操作方法の説明を受けた後, 手法の操作に慣れるための 2 分間の練習セッションを行った. 練習セッション終了後, 本番セッションに移行した. 本番セッションにおいて実験参加者は, ターゲット候補の中からランダムな順番に提示される 12 個のターゲットをポインティングする. あるターゲットサイズについて本番セッションを 2 回行ったのち, もう一方のターゲットサイズについて本番セッションを 2 回行った. ターゲットサイズの順序はランダムに決定された. 計 4 回の本番セッションを行った後, 実験参加者はその手法に関するアンケート (付録 A.2) に回答した. その後, 実験参加者は 2 分間休憩したのち, 次の手法に移行した. 手法の実施順序はラテン方格法を用いてカウンタバランスがとられた. GC の場合のみ, 各本番セッションの前に視線追跡のためのキャリブレーションが行われた. 実験参加者 1 人あたり 4 手法 × 12 個のターゲット × 2 つのターゲットサイズ × 2 セッション = 計 192 試行分のデータが取得された. 実験は全体で約 45 分かかった.

5.5 結果

本節では TIME, SUCCESS, ROTATION, および手法に関するアンケートの結果を順に示す.

5.5.1 TIME

図 5.4 に手法に対する TIME を示す. DT (1,022 ms), BC (1,366 ms), GC (1,448 ms), および HT (2,281 ms) の順に高速であった. 手法およびターゲットサイズを独立変数とした反復測定 2 元配置分散分析を実施した. その結果, 手法 ($F_{3,18} = 45.88$, $p < 0.05$) およびターゲットサイズ ($F_{1,7} = 38.80$, $p < 0.05$) の有意な主効果が存在した. ボンフェローニ補正を用いた事後多重比較の結果, BC および GC 間を除く全手法間に有意差があった ($p < 0.05$).

図 5.5 に手法およびターゲットサイズに対する TIME を示す. 全手法において, ターゲットサイズが大きい場合の方が高速であった. ターゲットサイズが大きい場合は DT (956 ms),

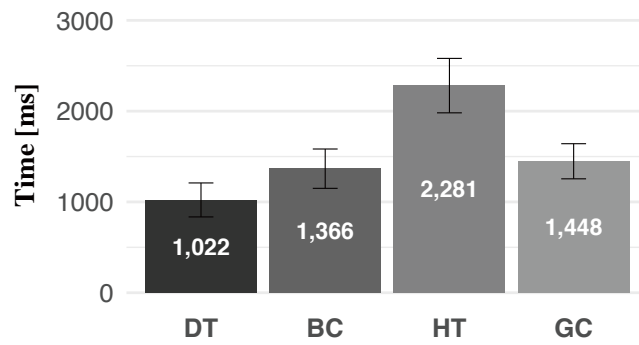


図 5.4: 各手法に対する TIME. エラーバーは 95%信頼区間を表す.

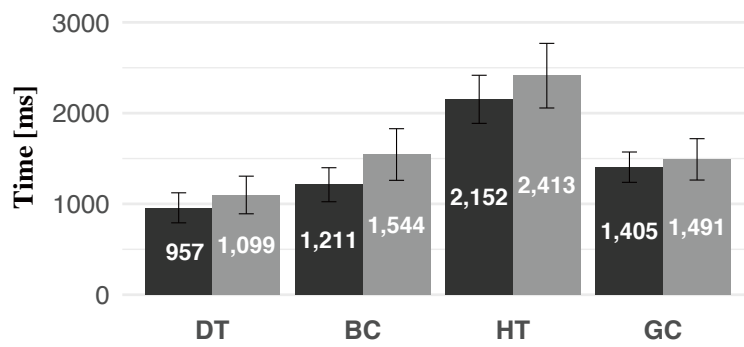


図 5.5: 各手法および各ターゲットサイズに対する TIME. エラーバーは 95%信頼区間を表す.

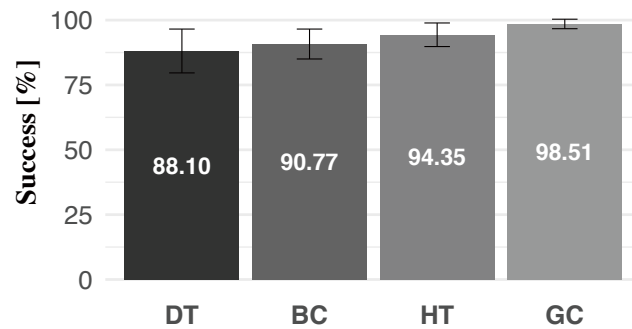


図 5.6: 各手法に対する SUCCESS. エラーバーは 95%信頼区間を表す.

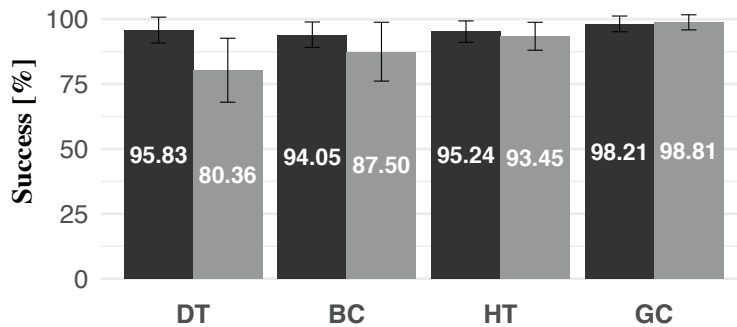


図 5.7: 各手法および各ターゲットサイズに対する SUCCESS. エラーバーは 95%信頼区間を表す.

BC (1,211 ms), GC (1,405 ms), および HT (2,152 ms) の順に高速であった一方で, ターゲットサイズが小さい場合には DT (1,099 ms), GC (1,491 ms), BC (1,544 ms), および HT (2,413 ms) の順に高速であった. 反復測定 2 元配置分散分析の結果, 手法およびターゲットサイズの有意な交互作用は存在しなかった ($F_{3,18} = 4.25, p > 0.05$).

5.5.2 SUCCESS

図 5.6 に各手法に対する SUCCESS を示す. GC (98.51%), HT (94.35%), BC (90.77%), および DT (88.10%) の順に成功率が高かった. 手法およびターゲットサイズを独立変数とした反復測定 2 元配置分散分析を実施した. その結果, 手法 ($F_{3,21} = 4.85, p < 0.05$) およびターゲットサイズ ($F_{1,7} = 14.99, p < 0.05$) の有意な主効果が存在した. ボンフェローニ補正を用いた事後多重比較の結果, BC および GC 間に有意差があった ($p < 0.05$).

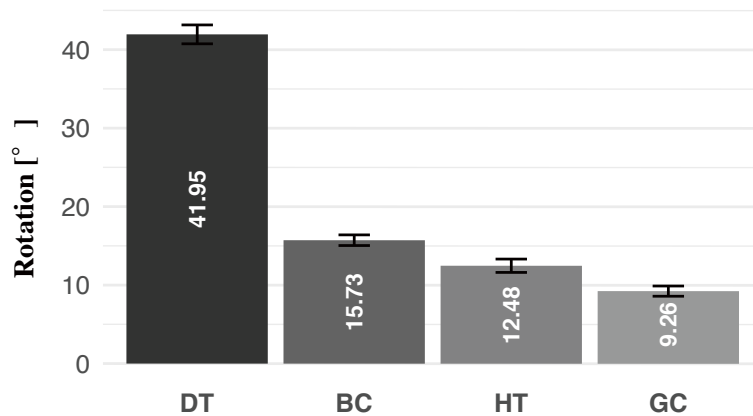


図 5.8: 各手法に対する ROTATION. エラーバーは 95%信頼区間を表す.

図 5.5 に手法およびターゲットサイズに対する SUCCESS を示す. GC を除く全手法において, ターゲットサイズが大きい場合の方が SUCCESS が高かった. ターゲットサイズが大きい場合は GC (98.81%), DT (95.83%), HT (95.24%), および BC (94.05%) の順に高かった一方で, ターゲットサイズが小さい場合には GC (98.81%), HT (93.45%), BC (87.50%), および DT (80.36%) の順に高かった. 反復測定 2 元配置分散分析の結果, 手法およびターゲットサイズの有意な交互作用は存在しなかった ($F_{3,18} = 4.25, p > 0.05$).

5.5.3 ROTATION

図 5.8 に手法に対する ROTATION を示す. GC (9.92°), HT (13.44°), BC (16.26°), および DT (42.10°) の順にデバイスの回転が小さかった. 図 5.9 に手法および各回転軸に対する ROTATION を示す. 各軸に対する ROTATION の場合も同様に, 全ての回転軸において GC が最も小さく, 続いて HT, BC, および DT の順に小さかった. 各回転軸に対して手法およびターゲットサイズを独立変数とした反復測定 2 元配置分散分析を実施した結果, x 軸 ($F_{3,21} = 79.348, p < 0.05$), y 軸 ($F_{3,21} = 178.615, p < 0.05$), z 軸 ($F_{3,21} = 41.725, p < 0.05$) に対して手法の有意な主効果が存在した. ボンフェローニ補正を用いた事後多重比較の結果, 全回転軸における全手法間に有意差があった ($p < 0.05$). なお, ターゲットサイズの主効果, 手法およびターゲットサイズの交互作用は存在しなかった.

5.5.4 手法に関するアンケート

図 5.10 に各手法に対するアンケートの評価を示す. 手法に関するアンケートでは実施した各手法に対して, 「この手法を容易に使用できた (容易さ)」, 「この手法を利用した後に疲労を感じなかった (疲労の少なさ)」, および 「デバイスを安定して持つことができた (安定性)」

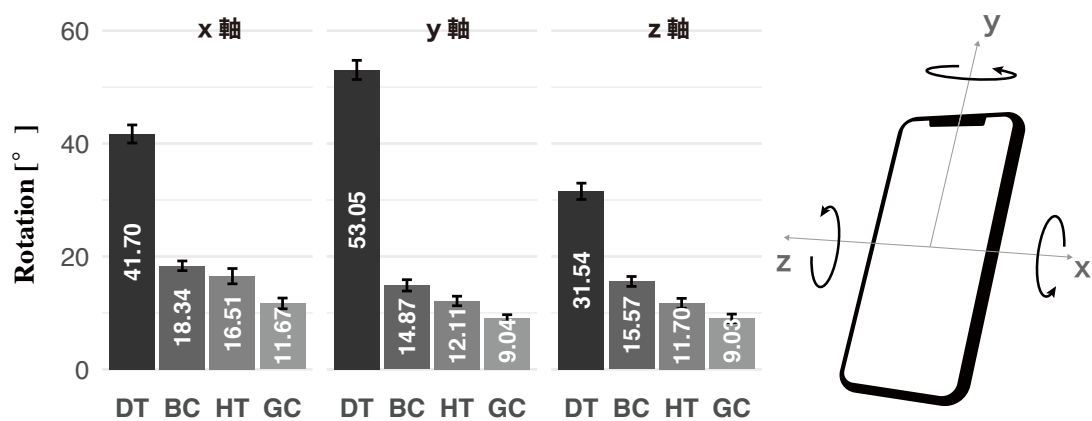


図 5.9: 各手法および各回転軸に対する ROTATION. エラーバーは 95%信頼区間を表す.

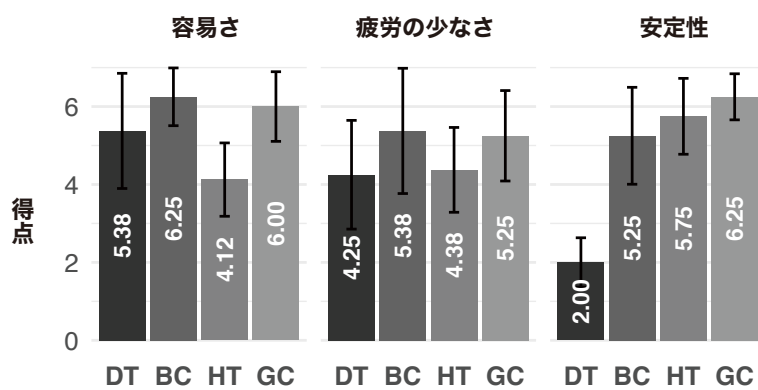


図 5.10: 各手法および各アンケート項目に対する評価. エラーバーは 95%信頼区間を表す.

の3つの項目に対して7段階のリッカート尺度（1：全くそうは思わない，7：非常にそう思う）にて評価してもらった。つまり，得点が高いほどユーザはその手法に対して良い評価をしていると言える。

容易さについて，BC（6.25），GC（6.00），DT（5.38），およびHT（4.12）の順に得点が高かった。フリードマン検定の結果，手法の有意な主効果が存在した（ $\chi^2(3) = 14.5, p < 0.05$ ）。ダービン・コノバー法による事後多重比較の結果，BCおよびHT間，およびHTおよびGC間において有意差があった（ $p < 0.001$ ）。

疲労の少なさについて，BC（5.38），GC（5.25），HT（4.38），およびDT（4.25）の順に得点が高かった。フリードマン検定の結果，手法の有意な主効果は存在しなかった（ $\chi^2(3) = 7.06, p > 0.05$ ）。

安定性について，GC（6.25），HT（5.75），BC（5.25），およびDT（2.00）の順に得点が高かった。この順番はROTATIONの結果とも一致している。フリードマン検定の結果，手法の有意な主効果が存在した（ $\chi^2(3) = 16.4, p < 0.05$ ）。ダービン・コノバー法による事後多重比較の結果，DTおよびBC間，DTおよびHT間，DTおよびGC間において有意差があった（ $p < 0.001$ ）。

第6章 実験結果のまとめおよび考察

本章では実実験にて調査した DT, BC, HT, および GC のそれぞれについて、実験結果から得られた各手法の特徴およびその考察を述べる。

6.1 DT

DT は最も高速にポインティング可能な手法だった一方で、ポインティングの成功率が最も低く、特に小さいターゲットのポインティングの精度が低かった。また、デバイスの回転が最も大きかった。これらの結果は Corsten ら [CLBV19] の実験結果と一致している。DT はその他の手法がカーソルを用いて間接的にポインティングするのとは異なり、対象に直接触れることによるポインティングであるため、ポインティングが高速だったと考えられる。また、ターゲットが小さい場合にはファットフィンガ問題が生じたことにより、カーソルを用いるその他の手法と比較してポインティングの成功率が低かったと考えられる。また、DT では親指から遠いターゲットに直接触れる必要があることからデバイスの持ち替えが生じ、それによりデバイスの回転が大きかったと考えられる。

6.2 BC

BC は DT に続いて GC と同程度に高速な手法だった一方で、小さいターゲットに対するポインティングの精度が低かった。この原因として、BC はカーソルの移動量が指の移動量の 3 倍であることから、実験参加者がターゲットのポインティングを確定するために親指を画面から離す際のタッチ位置のずれ [XLYS12] もより大きくなったためだと考えられる。また、デバイスの回転は DT に続いて大きかった。これはカーソルの起動のために画面端へと指を動かす動作によって指の移動量が大きくなったことが影響していると考えられる。

6.3 HT

HT は最もポインティングに時間がかかる手法だった一方で、成功率は GC に続いて高かった。またターゲットの大きさによらず成功率が高かった。また、デバイスの回転も GC に続いて小さかった。HT のポインティングにかかる時間 (2,281 ms) の結果は、Voelker ら [VHCR20] の結果 (1,544 ms) と異なっていた。この要因として、実験参加者の姿勢の違いおよび頭部の動きによるポインティングの慣れの違いが考えられる。本実験では、実験参加者は座位にてポ

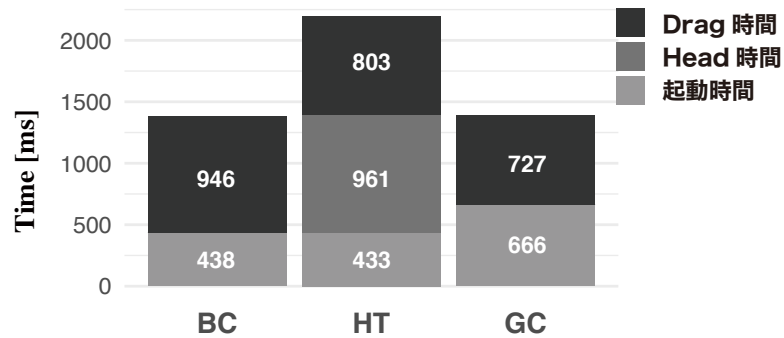


図 6.1: 手法に対する TIME の詳細. ターゲットが表示されて 1 回目のポインティングにおける各手法のカーソルを起動するまでの時間（起動時間），HT における頭部の向きを用いたカーソルの移動時間（Head 時間），およびドラッグによるカーソルの移動時間（Drag 時間）を示している.

インテュングした一方で，Voelker らの実験では立位にてポインティングした．また，Voelker らの実験では頭部の動きを利用した 3 つの手法を比較に用いていたため，本実験の実験参加者よりも頭部の動きによるポインティングに慣れていた可能性がある．HT の成功率が高かった要因として，HT では頭部の動きによりカーソルを移動できるため，BC のようにカーソルの移動量を親指の移動量よりも上げる必要がなく，それによりカーソルをより細かく調整できたことが考えられる．また，デバイスの回転が小さかったことは，頭部の動きによるカーソルの移動によって親指の動きが少なくなったことが原因だと考えられる．

6.4 GC

GC は DT に次いで高速であった BC と同程度の速さでポインティングでき，また成功率が最も高かった．また，ターゲットの大きさに依らず高い成功率であった．また，デバイスの動きが最も小さかった．

以上の結果から，第 3 章における設計指針のうち，ポインティングの高精度化および把持の安定化は達成されたと考えられる．一方でポインティングの時間は BC よりも遅く，ポインティングの高速化は未だ達成していないと考えられる．図 6.1 に DT 以外の手法の TIME の詳細を示す．これはターゲットが表示されて 1 回目のポインティングにおける各手法のカーソルを起動するまでの時間（起動時間），HT における頭部の向きを用いたカーソルの移動時間（Head 時間），およびドラッグによるカーソルの移動時間（Drag 時間）を示している．Drag 時間について，GC（727 ms）は BC（946 ms）と比較して短かった一方で，起動時間については BC（438 ms）および HT（433 ms）の方が GC（666 ms）よりも短かった．HT と GC の起動トリガが一緒であるにも関わらず，GCの方が起動に時間がかかった原因として，GCで

はその他の手法と比較して「対象を見る」ことをより意識したために起動に時間がかかったと考えられる。

第7章 議論および今後の課題

本章では Gaze Cursor の性能調査から得られた結果をもとに考えられる Gaze Cursor の改善, 実験では調査できなかったユーザの属性および姿勢の影響, 視線追跡に影響を与えると考えられる明るさの影響, およびポインティング以外のタッチジェスチャ実行の可能性を議論するとともに, 今後の課題を述べる.

7.1 Gaze Cursor の改善

GC に対する自由記述コメントにて, 2 名の参加者から「タップした時のカーソルがどこに現れるかが確実ではないため, カーソルを探す時間が発生し, 自分の動きが止まって遅くなっているような気がした.」および「カーソルがどこに現れるか予想がつかないのでタップしてからカーソルの位置を確認して, そこからスワイプをするので, 少し動作にラグがあった.」というコメントがあった. これらのコメントのように, 現状の設計ではカーソルが起動する場所をユーザが事前にわからないため, ユーザはまずカーソルを起動し, その後カーソルの位置を確認してカーソルを移動する方向を決めたのち, ドラッグによりカーソルを移動させる. したがって, カーソルの起動からカーソルの移動までの操作を滑らかに移行できない. カーソルの起動からカーソルの移動までを一連の操作で実行できるようにするためには, ユーザが事前にカーソルが起動する位置を分かっている必要がある.

この解決策として Voelker ら [VHCR20] の Head Area + Touch のように, カーソルの起動位置を画面を 4 分割した領域の中心のいずれかにする方法が考えられる. これによりユーザはカーソルを起動する前に, 選択したい対象とそれを含む領域の中心の位置関係からカーソルを移動すべき方向がわかるため, カーソルの起動からカーソルの移動までを一連の操作で実行できる可能性がある. しかし, この方法は現状の設計と比較してカーソルの起動位置と選択対象との距離が大きくなることにより, ポインティングの速度が低下する可能性がある. 現状の設計との比較実験を行うことにより, どちらの設計の方がポインティングの性能およびユーザの主観評価が良いか調査する必要がある.

7.2 視線追跡の精度の影響

Gaze Cursor では, カーソルの起動位置にユーザの凝視座標を用いていることから, 視線追跡の精度がポインティング性能に影響を与える可能性がある.

表 7.1: Gaze Cursor における各ターゲットの中心とカーソル起動座標の誤差. 丸括弧内は標準偏差を表す. 単位は pt である.

ターゲット番号	X 座標	Y 座標	ユークリッド距離
0	67.0 (47.0)	35.7 (42.0)	85.2 (49.4)
3	42.2 (35.3)	39.6 (46.9)	65.8 (49.3)
5	46.9 (39.3)	42.7 (52.5)	74.2 (52.6)
7	54.8 (39.0)	52.8 (37.9)	83.0 (42.8)
10	42.4 (29.8)	51.3 (38.2)	71.7 (40.1)
14	43.3 (33.2)	62.5 (59.4)	80.1 (63.1)
18	58.9 (31.7)	78.3 (84.8)	109.5 (75.6)
22	52.9 (38.3)	79.2 (56.7)	102.3 (57.0)
26	41.6 (28.2)	69.8 (51.7)	89.0 (45.7)
42	51.9 (30.1)	109.0 (73.4)	126.6 (69.2)
61	30.5 (20.0)	68.3 (47.0)	81.5 (39.0)
66	67.4 (38.0)	58.4 (48.8)	95.4 (51.5)

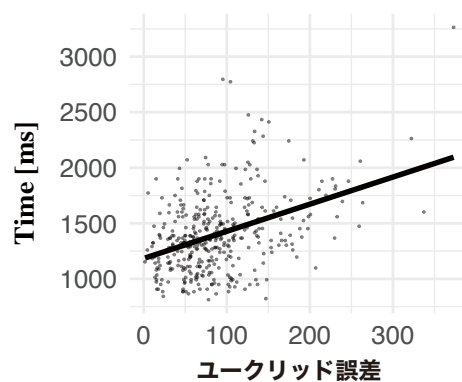


図 7.1: Gaze Cursor における各ターゲットの中心とカーソル起動座標のユークリッド誤差に対する TIME.

表 7.1 に Gaze Cursor における、各ターゲットの中心とカーソル起動座標との誤差を示す。全ターゲットにおける X 軸の誤差は 50.0 pt (標準偏差 35.9 pt)、Y 軸の誤差は 62.3 pt (標準偏差 57.7 pt) およびユークリッド距離は 88.7 pt (標準偏差 55.9 pt) であった。

また、図 7.1 に Gaze Cursor における各ターゲットの中心とカーソル起動座標のユークリッド誤差に対する TIME を示す。線形回帰分析の結果、 $R^2 = 0.157$ であり、ターゲットの中心とカーソル起動座標の誤差に相関は見られなかった。図 7.1 ではユークリッド距離が 200 pt を超える場合 TIME が高い傾向がある一方で、ユークリッド距離が 200 pt 未満の場合には誤差の大きさに関わらず分布していることがわかる。この結果から、本実験における視線追跡の誤差が Gaze Cursor の性能に与える影響は小さいと考えられる。

7.3 ユーザの属性および姿勢の影響

本実験では参加者が 22-25 歳と若く、またスマートフォンの操作に慣れていた。しかし、スマートフォンは子供から老人までさまざまな世代で使用されており、また、スマートフォンの個人保有率も増加傾向にある。そのため、スマートフォンの操作に対して初心者から熟練者まで様々なユーザが存在する。また、様々な世代に使用されることからユーザの手の大きさも様々である。こうしたユーザの属性はスマートフォンの操作に影響を与えることが示されている。例えば、親指の長さがスマートフォンでのポインティングの精度に影響を与えること [LJB⁺19]、若者と比較して老人のポインティングの性能が低下すること [XM14, XM16] が知られている。したがって、こうした様々な属性のユーザが Gaze Cursor を利用できるかを明らかにするためには、追加の実験を行う必要がある。

また、ユーザの属性の他に、スマートフォンを利用する際のユーザの姿勢がスマートフォンにおけるポインティングの性能に影響を与えることが示されている [ERGT18, IOES20]。本実験では座位のみにおける片手ポインティング手法の性能を調査を行い、その結果、Gaze Cursor がスマートフォンの把持を安定させながら高い成功率にてポインティングできることがわかった一方、立位、歩行時、および臥位などの他の姿勢において同様の結果が得られるかは定かでない。特に歩行時のようにスマートフォンの揺れが伴う環境では視線追跡の精度が低下する可能性があるため Gaze Cursor の性能に影響を与える可能性がある。したがって、こうした様々な姿勢および環境においても Gaze Cursor が利用できるかを調査する必要がある。

7.4 明るさの影響

本実験において、Gaze Cursor の視線追跡はフロントカメラから取得される RGB 画像を用いて深層学習を利用することにより実現されている。この実装は、本実験環境のような明るい部屋では機能する一方で、十分な明るさが確保されていない環境では機能しない。スマートフォンは夜道および就寝前の明かりを消した部屋などの暗い環境においても頻繁に使用される。したがって、Gaze Cursor が広く利用されるためにはこのような暗い環境においても視線追跡が機能する必要がある。

この問題の解決のために赤外線に基づく視線追跡の利用が考えられる。赤外線に基づく視線追跡では赤外線 LED を照射し、その反射を赤外線カメラを用いて取得することにより視線追跡を行う。この方法は暗い環境でも機能し、また様々な明るさの環境においても堅牢である。近年、iPhone X や pixel 4 などの市販のスマートフォンにも赤外線ビームを照射する機構および赤外線カメラが搭載されたことにより、暗い環境においてもユーザは顔認証を利用することができる。このことから、これらの機能を用いて赤外線に基づく視線追跡を実現することにより、暗い環境においても Gaze Cursor が利用できると考えられる。

7.5 シングルタッチジェスチャの実行可能性

現状の Gaze Cursor の設計において、ユーザは画面から親指を離すことによりカーソルの位置にある対象の選択を確定できる。つまり、これは通常のスマートフォン操作におけるタップと同じ操作である。しかし、この設計ではタップ以外の親指のみを用いて実行可能なタッチジェスチャであるシングルタッチジェスチャ（例えばダブルタップ、ロングタップ、およびスワイプ）をユーザは実行することができない。こうしたシングルタッチジェスチャはスマートフォン操作において頻繁に利用されている。例えばダブルタップによる地図アプリケーションの拡大および縮小ならびに動画の早送りおよび巻き戻し、ロングタップによる文字列選択およびコンテキストメニューの表示、スワイプによる通知バーの表示およびリストの削除のために利用される。こうした操作は親指が届きにくい領域においても必要であることから、ポインティングだけでなく、シングルタッチジェスチャをユーザができる手法を設計することが望ましい。

Gaze Cursor においてユーザがシングルタッチジェスチャを実行できるようにする方法として、八箇ら [八箇 20] の 2 つの手法を適用することが考えられる。1 つ目の手法は 2 段階の操作を用いる手法である。この手法ではユーザはカーソルを移動させたのち、画面から親指を離すことによりカーソルの位置を固定する。その後のタッチイベントをカーソルの位置に転送することにより、カーソルの位置に対してシングルタッチジェスチャを実行することができる。もう 1 つの手法は押下圧を用いる手法である。この手法では、ユーザは画面から親指を離すことなくシングルタッチジェスチャを実行できる。ある閾値よりも強く画面を押し込むことにより「画面に触れた」との同等の操作として認識させ、その後押し込みを弱めることにより「画面から指を離した」との同等の操作として認識させることにより、画面から指を離すことなくシングルタッチジェスチャの実行ができるようにした。今後、これらの手法を Gaze Cursor に適用した際の性能およびユーザビリティを調査する必要がある。

第8章 おわりに

本論文では、スマートフォン上の親指が届きにくい領域にある対象の片手ポインティングを容易にするために、ユーザの視線およびタッチを組み合わせたスマートフォンの片手ポインティング手法である Gaze Cursor を示した。また、Gaze Cursor のポインティング性能およびユーザビリティを調査するために、通常のタッチ操作 (DT) および既存の2つのスマートフォンの片手ポインティング手法である Bezel Cursor (BC) および Head+Touch (HT) との比較実験を行った。その結果、Gaze Cursor のポインティングにかかる時間は 1,448 ms と DT (1,022 ms) よりも遅く BC (1,366 ms) と同程度であった一方で、ポインティングの成功率は 98.51% と比較手法よりも高い結果となった。また、スマートフォンの把持の安定性を表すデバイスの回転について、Gaze Cursor は 9.26 度であり、他の手法と比較して最もデバイスの回転が小さかった。このことから、ユーザは Gaze Cursor を用いることにより高精度かつ安定した把持にて親指の届きにくい領域にある対象をポインティングできる。今後は実験で得られた結果から Gaze Cursor を改善するとともに、様々な属性のユーザおよび環境において Gaze Cursor のポインティング性能およびユーザビリティを調査する。

謝辞

本研究を進めるにあたり、志築文太郎先生、高橋伸先生には多くのご意見とご指導をいただきました。心から感謝いたします。特に、主旨導教員である志築文太郎先生には、研究の進め方や論文の執筆方法のみならず、研究に対する心構えなど多岐にわたるご指導をいただきました。本論文を執筆することができたのは、志築文太郎先生の懇切丁寧なご指導があったことです。重ねて感謝いたします。また、インタラクティブプログラミング研究室の先輩方、同期ならびに後輩たちには、3年間の研究生活において大変お世話になりました。なかでも WAVE チームの皆様には、チームゼミをはじめ研究生活での様々な場面にて、自身の研究がよりよいものとなるような多くの助言や意見、研究のアイデアをいただきました。深く感謝いたします。最後に、私を育て支えてくださった家族と大学院生活においてお世話になった全ての方々に心より感謝申し上げます。

参考文献

- [ALMP09] Martha Abednego, Joong-Ho Lee, Won Moon, and Ji-Hyung Park. I-Grabber: Expanding physical reach in a large-display tabletop environment through the use of a virtual grabber. In *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '09, pp. 61–64, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery.
- [App21a] Apple. Reach the top of the iphone screen with one hand - apple support, 2021. <https://support.apple.com/guide/iphone/reachability-iph145eba8e9/ios>. (参照 2021-11-27) .
- [App21b] Apple. 先進の face id テクノロジーについて. <https://support.apple.com/ja-jp/HT208108>. (参照 2021-12-15) , 2021.
- [BBGV11] Amartya Banerjee, Jesse Burstyn, Audrey Girouard, and Roel Vertegaal. Pointable: An in-air pointing technique to manipulate out-of-reach targets on tabletops. In *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '11, pp. 11–20, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [BCF⁺10] Hans-Joachim Bieg, Lewis L. Chuang, Roland W. Fleming, Harald Reiterer, and Heinrich H. Bühlhoff. Eye and pointer coordination in search and selection tasks. In *Proceedings of the 2010 Symposium on Eye-Tracking Research & Applications*, ETRA '10, pp. 89–92, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.
- [BCN20] BCN+R. スマホの平均画面サイズ、12年で1.6倍に タブレット化進む? https://www.bcnretail.com/market/detail/20201027_196676.html. (参照 2021-12-10) , 2020.
- [BLC⁺12] Sebastian Boring, David Ledo, Xiang 'Anthony' Chen, Nicolai Marquardt, Anthony Tang, and Saul Greenberg. The fat thumb: Using the thumb's contact size for single-handed mobile interaction. In *Proceedings of the 14th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '12, pp. 39–48, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [BLO14] Joanna Bergstrom-Lehtovirta and Antti Oulasvirta. Modeling the functional area of the thumb on mobile touchscreen surfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on*

Human Factors in Computing Systems, CHI '14, pp. 1991–2000, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.

- [CLBV19] Christian Corsten, Marcel Lahaye, Jan Borchers, and Simon Voelker. ForceRay: Extending thumb reach via force input stabilizes device grip for mobile touch input. 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.
- [CLKS15] Youli Chang, Sehi L'Yi, Kyle Koh, and Jinwook Seo. Understanding users' touch behavior on large mobile touch-screens and assisted targeting by tilting gesture. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 1499–1508, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [ERGT17] Rachel Eardley, Anne Roudaut, Steve Gill, and Stephen J. Thompson. Understanding grip shifts: How form factors impact hand movements on mobile phones. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 4680–4691, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [ERGT18] Rachel Eardley, Anne Roudaut, Steve Gill, and Stephen J. Thompson. Investigating how smartphone movement is affected by body posture. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, p. 1–8, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [EVBG15] Augusto Esteves, Eduardo Velloso, Andreas Bulling, and Hans Gellersen. Orbits: Gaze interaction for smart watches using smooth pursuit eye movements. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, UIST '15, pp. 457–466, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [Fit54] 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.
- [HBH16] Shiori Hidaka, Tetsuaki Baba, and Paul Haimes. IndexAccess: A GUI movement system by back-of-device interaction for one-handed operation on a large screen smartphone. *International Journal of Asia Digital Art and Design Association*, Vol. 20, No. 2, pp. 41–47, June 2016.
- [HRY19] Inseok Hwang, Eric Rozner, and Chungkuk Yoo. Telekinetic thumb summons out-of-reach touch interface beneath your thumbtip. In *Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, MobiSys '19, pp. 661–662, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.

- [IAST18] Toshiya Isomoto, Toshiyuki Ando, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. Dwell time reduction technique using Fitts' law for gaze-based target acquisition. In *Proceedings of the 2018 ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, ETRA '18, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [IOES20] Kaori Ikematsu, Haruna Oshima, Rachel Eardley, and Itiro Siio. Investigating how smartphone movement is affected by lying down body posture. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, Vol. 4, No. ISS, November 2020.
- [Jac90] 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.
- [Jac91] Robert J. K. Jacob. The use of eye movements in human-computer interaction techniques: What you look at is what you get. *ACM Transactions on Information Systems*, Vol. 9, No. 2, pp. 152–169, April 1991.
- [KB07] Amy K. Karlson and Benjamin B. Bederson. ThumbSpace: Generalized one-handed input for touchscreen-based mobile devices. In *Proceedings of the 11th IFIP TC 13 International Conference on Human-Computer Interaction*, INTERACT '07, pp. 324–338, Berlin, Heidelberg, 2007. Springer-Verlag.
- [KKK⁺16] Kyle Krafka, Aditya Khosla, Petr Kellnhofer, Harini Kannan, Suchendra Bhandarkar, Wojciech Matusik, and Antonio Torralba. Eye tracking for everyone. In *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, CVPR '16, pp. 2176–2184. IEEE, 2016.
- [KYL12] Sunjun Kim, Jihyun Yu, and Geehyuk Lee. Interaction techniques for unreachable objects on the touchscreen. In *Proceedings of the 24th Australian Computer-Human Interaction Conference*, OzCHI '12, pp. 295–298, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [LBKH16] Huy Viet Le, Patrick Bader, Thomas Kosch, and Niels Henze. Investigating screen shifting techniques to improve one-handed smartphone usage. In *Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction*, NordiCHI '16, pp. 1–10, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [LFZ16] Wing Ho Andy Li, Hongbo Fu, and Kening Zhu. BezelCursor: Bezel-initiated cursor for one-handed target acquisition on mobile touch screens. *Int. J. MHCI*, Vol. 8, No. 1, pp. 1–22, January 2016.

- [LHG13] Markus Löchtefeld, Christoph Hirtz, and Sven Gehring. Evaluation of hybrid front- and back-of-device interaction on mobile devices. In *Proceedings of the 12th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, MUM '13, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [LJB⁺19] Joachim Normann Larsen, Tórir Højgaard Jacobsen, Sebastian Boring, Joanna Bergström, and Henning Pohl. The influence of hand size on touch accuracy. In *Proceedings of the 21st International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '19, pp. 1–11, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [LK18] Florian Lehmann and Michael Kipp. How to hold your phone when tapping: A comparative study of performance, precision, and errors. In *Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '18, pp. 115–127, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [LMBH18] Huy Viet Le, Sven Mayer, Patrick Bader, and Niels Henze. Fingers' range and comfortable area for one-handed smartphone interaction beyond the touchscreen. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 1–12, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [LZ15] Jianwei Lai and Dongsong Zhang. ExtendedThumb: A target acquisition approach for one-handed interaction with touch-screen mobile phones. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, Vol. 45, No. 3, pp. 362–370, June 2015.
- [MLFH19] Sven Mayer, Huy Viet Le, Markus Funk, and Niels Henze. Finding the sweet spot: Analyzing unrestricted touchscreen interaction in-the-wild. In *Proceedings of the 2019 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '19, pp. 171–179, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [NDA⁺17] Aanand Nayyar, Utkarsh Dwivedi, Karan Ahuja, Nitendra Rajput, Seema Nagar, and Kuntal Dey. OptiDwell: Intelligent adjustment of dwell click time. In *Proceedings of the 22nd International Conference on Intelligent User Interfaces*, IUI '17, pp. 193–204, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [Nel15] R. Kevin Nelson. Exploring Apple's 3D touch. <https://medium.com/@rknl/exploring-apple-s-3d-touch-f5980ef45af5> (参照 2020-10-20), 2015.
- [NVCV16] Joshua Newn, Eduardo Velloso, Marcus Carter, and Frank Vetere. Multimodal segmentation on a large interactive tabletop: Extending interaction on horizontal surfaces with gaze. In *Proceedings of the 2016 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '16, pp. 251–260, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.

- [NYS10] Takashi Nagamatsu, Michiya Yamamoto, and Hiroshi Sato. MobiGaze: Development of a gaze interface for handheld mobile devices. In *CHI '10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '10, pp. 3349–3354, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.
- [PG16] Ken Pfeuffer and Hans Gellersen. Gaze and touch interaction on tablets. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pp. 301–311, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [PLW12] Abdul Moiz Penkar, Christof Lutteroth, and Gerald Weber. Designing for the eye: Design parameters for dwell in gaze interaction. In *Proceedings of the 24th Australian Computer-Human Interaction Conference*, OzCHI '12, pp. 479–488, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [PMI05] J. Karen Parker, Regan L. Mandryk, and Kori M. Inkpen. TractorBeam: Seamless integration of local and remote pointing for tabletop displays. In *Proceedings of Graphics Interface 2005*, GI '05, pp. 33–40, Waterloo, CAN, 2005. Canadian Human-Computer Communications Society.
- [RHL08] Anne Roudaut, Stéphane Huot, and Eric Lecolinet. TapTap and MagStick: Improving one-handed target acquisition on small touch-screens. In *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, AVI '08, pp. 146–153, New York, NY, USA, 2008. Association for Computing Machinery.
- [RT09] Volker Roth and Thea Turner. Bezel Swipe: Conflict-free scrolling and multiple selection on mobile touch screen devices. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '09, pp. 1523–1526, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery.
- [Sam19] Samsung. Using one handed mode on my samsung phone — samsung australia, 2019. <https://www.samsung.com/au/support/mobile-devices/using-one-handed-mode/>. (参照 2021-11-27) .
- [SCZ⁺20] Ludwig Sidenmark, Christopher Clarke, Xuesong Zhang, Jenny Phu, and Hans Gellersen. *Outline Pursuits: Gaze-Assisted Selection of Occluded Objects in Virtual Reality*, pp. 1–13. CHI '20. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2020.
- [SD12] Sophie Stellmach and Raimund Dachsel. Look & Touch: Gaze-supported target acquisition. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pp. 2981–2990, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.

- [SD13] Sophie Stellmach and Raimund Dachsel. Still Looking: Investigating seamless gaze-supported selection, positioning, and manipulation of distant targets. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, pp. 285–294, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [SRC05] Katie A. Siek, Yvonne Rogers, and Kay H. Connelly. Fat finger worries: How older and younger users physically interact with PDAs. In *Proceedings of the 2005 IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction*, INTERACT '05, pp. 267–280, Berlin, Heidelberg, 2005. Springer-Verlag.
- [TABG15] Jayson Turner, Jason Alexander, Andreas Bulling, and Hans Gellersen. Gaze+RST: Integrating gaze and multitouch for remote rotate-scale-translate tasks. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 4179–4188, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [THH⁺16] Hsin-Ruey Tsai, Da-Yuan Huang, Chen-Hsin Hsieh, Lee-Ting Huang, and Yi-Ping Hung. MovingScreen: Selecting hard-to-reach targets with automatic comfort zone calibration on mobile devices. In *Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services Adjunct*, MobileHCI '16, pp. 651–658, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [TSK16] Naoya Tochihara, Toshiki Sato, and Hideki Koike. A remote pointing method with dynamic C-D ratio during a pinching gesture for large tabletop systems. CHI EA '16, pp. 553–559, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [VDS⁺20] Nachiappan Valliappan, Na Dai, Ethan Steinberg, Junfeng He, Kantwon Rogers, Venky Ramachandran, Pingmei Xu, Mina Shojaeizadeh, Li Guo, Kai Kohlhoff, and Vidhya Navalpakkam. Accelerating eye movement research via accurate and affordable smart-phone eye tracking. *Nature Communications*, Vol. 11, No. 1, 2020.
- [VHCR20] Simon Voelker, Sebastian Hueber, Christian Corsten, and Christian Remy. HeadReach: Using head tracking to increase reachability on mobile touch devices. 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.
- [VPBG13] Mélodie Vidal, Ken Pfeuffer, Andreas Bulling, and Hans W. Gellersen. Pursuits: Eye-based interaction with moving targets. In *CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '13, pp. 3147–3150, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [XLYS12] Wenchang Xu, Jie Liu, Chun Yu, and Yuanchun Shi. Digging unintentional displacement for one-handed thumb use on touchscreen-based mobile devices. In *Proceedings*

of the 14th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, MobileHCI '12, pp. 261–270, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.

- [XM14] Jinghong Xiong and Satoshi Muraki. An ergonomics study of thumb movements on smartphone touch screen. *Ergonomics*, Vol. 57, No. 6, pp. 943–955, April 2014.
- [XM16] Jinghong Xiong and Satoshi Muraki. Thumb performance of elderly users on smartphone touchscreen. *SpringerPlus*, Vol. 5, No. 1, July 2016.
- [YHHH13] Neng-Hao Yu, Da-Yuan Huang, Jia-Jyun Hsu, and Yi-Ping Hung. Rapid selection of hard-to-access targets by thumb on mobile touch-screens. In *Proceedings of the 15th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '13, pp. 400–403, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [YST12] Takuto Yoshikawa, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. HandyWidgets: Local widgets pulled-out from hands. In *Proceedings of the 2012 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '12, pp. 197–200, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [栗原 14] 栗原拓郎, 三田裕策, 大西主紗, 吉川拓人, 志築文太郎, 田中二郎. HandyScope: 引き出しジェスチャによる遠隔地操作手法. コンピュータソフトウェア, Vol. 31, No. 3, pp. 284–293, August 2014.
- [人工 21] 人工知能研究センター. Aist 日本人の手の寸法データ-寸法項目一覧 — 研究チーム — 人工知能研究センター, 2021. <https://www.airc.aist.go.jp/dhrt/hand/data/list.html>. (参照 2021-11-29) .
- [総務 21] 総務省. 令和 3 年版 情報通信白書. <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r03/html/nd1111100.html>. (参照 2021-12-4) , 2021.
- [大西 16] 大西主紗, 志築文太郎, 田中二郎. 大画面を備える携帯情報端末を安定して操作するための片手親指操作手法. コンピュータ ソフトウェア, Vol. 33, No. 1, pp. 78–90, 2016.
- [土佐 13] 土佐伸一郎, 田中二郎. LoopTouch: 画面ループを用いたモバイル端末片手操作手法. インタラクション 2013 論文集, pp. 175–182. 情報処理学会, 2013.
- [八箇 20] 八箇恭平, 磯本俊弥, 志築文太郎. シングルタッチジェスチャに対する大型スマートフォン向けの片手操作手法の性能調査. インタラクション 2020 論文集, pp. 48–57. 情報処理学会, 2020.

- [磯本 20] 磯本俊弥, 山中祥太, 志築文太郎. 時間および範囲をもとに認識する凝視に基づく操作手法. 第28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 (WISS 2020) 予稿集, pp. 85–90. ソフトウェア科学会, 2020.

著者論文リスト

本論文に関する論文および発表

なし

その他の論文

- 査読あり国際会議論文

1. Rio Hirai, Ryo Ikeda, and Buntarou Shizuki “Preliminary Investigation of Text Entry Method with Haptic Feedback from Real Object Surfaces Estimated Using Hand Tracking on HMD”, CHI 2021 symposia on Asian CHI Symposium: HCI Research from Asia and on Asian Contexts and Cultures, May 2021, pp. 129-131.
2. Ryo Ikeda, Kyohei Hakka, and Buntarou Shizuki “Hover-Based Reachability Technique for Executing Single-Touch Gesture on Smartphone”, CHI 2021 symposia on Asian CHI Symposium: HCI Research from Asia and on Asian Contexts and Cultures, May 2021, pp. 9-15.
3. Ryo Ikeda, Yuta Urushiyama, and Buntarou Shizuki. “Preliminary Investigation of Tapping Force on Pressure-Sensitive Touchscreen for Expanding Input Vocabulary on Smartphone”, CHI 2020 symposia on Asian CHI Symposium: HCI Research from Asia and on Asian Contexts and Cultures, April 2020, 4 pages.
4. Keita Saito, Takuto Nakamura, Kazushi Kamezawa, Ryo Ikeda, Yuki Hashimoto, and Buntarou Shizuki. “Japanese Patterns as NFC Antennas for Interactive Urushi-ware”, In Proceedings of the Fourteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI 2020), Sydney, NSW, Australia, February 2020, pp. 443-451, ACM

- 査読なし国内会議論文

1. 池田 凌, 漆山 裕太, 志築 文太郎 スマートフォンにおける押下圧によるタップの拡張のための予備調査情報処理学会研究報告, Vol.2019-HCI-185, 情報処理学会, 2019年12月, 7 pages.

付 録 A 実験に用いた各種書類

本研究の実験にて用いた実験に関する事前アンケート及び手法に関するアンケートを以下に示す。

A.1 実験に関する事前アンケート

実験に関する事前アンケート

文責：池田 凌

* Required

1. 名前 *

フルネームで入力してください。

2. 年齢 *

3. 性別 *

Mark on vlayl .one o

- ☐ 男性
- ☐ 女性
- ☐ その他
- ☐ 回答しない

4. メガネの有無 *

Mark on vlayl .one o

- ☐ 裸眼
- ☐ メガネ
- ☐ コンタクト

5. 普段使用しているスマートフォン *

回答例. Phone 12 Pixel4A Galaxy S21など, 使用していない場合は「なし」と回答してください.

6. 手の大きさ *

実験者が計測します.

7. 親指の長さ *

実験者が計測します.

8. D *

実験者が記入します.

This content not certified by Google

Google Forms

A.2 手法に関するアンケート

手法に関するアンケート

文責：池田 凌

* Required

1. ID *

実験者が記入します。

2. 実施した手法 *

Mark only one oval.

- ☐ Direct Touch (DT)
- ☐ BezelCursor (BC)
- ☐ Head + Touch (HT)
- ☐ Gaze Cursor (GC)

3. この手法を容易に使用できた *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	6	7	
全くそうは思わない	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	非常にそう思う

4. デバイスを安定して持つことができた *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	6	7	
全くそうは思わない	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	非常にそう思う

5. この手法を利用した後に疲労を感じなかった *

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	6	7	
全くそうは思わない	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	非常にそう思う

6. 自由記述コメント

この手法に関して思ったことがあれば自由に記述してください。

This content is not for sale on Google Play.

Google Forms

付 録 B 実験におけるアンケートの回答

実験における各手法に関するアンケートの自由記述コメントの回答を以下に示す。

B.1 自由記述コメント

表 B.1, B.2, B.3 および B.4 にそれぞれ DT, BC, HT, 及び GC に対する自由記述コメントを示す。

表 B.1: DT に対する自由記述コメントの回答

参加者	コメント
P1	なし
P2	右下のターゲットを選択するのが難しかった。
P3	連続したタップは疲労がたまる。画面端が難しい。
P4	手の届かない範囲のボタンを押すときにスマホが不安定になっていた。
P5	指が下はじに届かず変な持ち方をするようになった。
P6	左下の小さいターゲットは大きく持ち方を変えないと指が届かなかった。持ち替えが多く手の疲労が大きかった。
P7	指が届く範囲であればすごくはやくタッチが可能だった。また、指でボタンが隠れてしまうため、小さなボタンがうまく押せない時があった。最後にとても不安定な持ち方をしないと押せない位置のボタンは押すのに、とても苦労した。
P8	誤ってダブルタップをしてしまうことがあった。

表 B.2: BC に対する自由記述コメントの回答

参加者	コメント
P1	タップよりもターゲットを選択しやすく、速度が上がったと思う
P2	なし
P3	画面から指を離す瞬間にどうしてもターゲットから動いてしまうことがあった。
P4	なし
P5	親指の近く以外を選択する分には持ち方を変える必要がなく、同じ動作で選択を行う事ができた。
P6	手法の開始のタイミング（端から伸ばすところ）が操作しにくいと感じた。
P7	慣れるとどれくらい指を動かせばどれくらいカーソルが伸びるのかを感覚で把握できるので、ターゲットへのタップ速度が速かった。ただ、ベゼルから指を伸ばすので持ち方がつまみ持ち風になり、若干不安定だった。
P8	なし

表 B.3: HT に対する自由記述コメントの回答

参加者	コメント
P1	2 段階の押し込み操作が難しかった。画面を見ながら顔を動かすのは少し練習が必要だと思った。
P2	頭を動かすと一緒に手が動いてしまった。
P3	押し込む→強く押し込む→離すの 3 段階移動でスマートフォンが手のポジションから動いてしまった。
P4	顔の向きだけでターゲットにポインタを近づけるのは少し大変だった
P5	必要な工程が多く、コツ（頭で大雑把に合わせて指で調整する、画面端にぶつけて調整する）を見つけるまで難しかった。
P6	頭の固定を意識するので疲労を感じた。上下の首の動きをよくやり、なるべく左右の首の動きはしたくなかった。弱い押し込みと強い押し込みの力の加減をたまに間違えた。親指の位置がほとんど動かないのが良かった。
P7	タップ開始時に頭をある程度正面に戻す必要があり、大変だった。手をの位置を変えずにほとんどをタップできたのは良かった。
P8	上下方向には動かしやすいと思った。そのため、まずは上下に移動したのちに、指を左右に動かすことでターゲットを選択する方法を使った

表 B.4: GC に対する自由記述コメントの回答

参加者	コメント
P1	見ている場所にカーソルが表示されるため、かなり速く選択できたように感じた。
P2	タップするタイミングが早すぎてカーソルが遠いところに出てしまう事があった。
P3	タッチするまで視線の位置が分からないのでタッチした画面の位置によってはスクロールが難しいことがあった。
P4	視線追跡精度がイマイチだと操作がしづらそう
P5	キャリブレーションで目が渴いた。視線で良い位置からカーソルを伸ばせるので指を過剰に動かす必要がない分離した時のブレも少なく選択しやすかった。
P6	タップした時のカーソルがどこに現れるかが確実ではないため、カーソルを探す時間が発生し、自分の動きが止まって遅くなってるような気がした。操作に対する疲労は感じなかった。
P7	視線のみなので、ターゲットを見るという自然な動作から、スワイプなので動作が混ざらなくて使いやすかった。ただ、カーソルがどこに現れるか予想がつかないのでタップしてからカーソルの位置を確認して、そこからスワイプをするので、少し動作にラグがあった
P8	誤ってダブルタップをしてしまうことがあった。