

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

シングルタッチジェスチャのための
スマートフォン向け片手操作手法の設計と調査

八箇 恭平

修士（工学）

（コンピュータサイエンス専攻）

指導教員 志築 文太郎

2021年3月

概要

大型のスマートフォンに対して、ユーザが把持姿勢を変えることなく画面上の親指の届かない領域に対する操作を可能にするために、これまでに多くの片手操作手法が提案されている。また、提案されてきた片手操作手法の評価は親指の届かないターゲットを選択（つまり、ターゲットをタップ）することのみを対象として行われている。そのため、親指の届かない領域に対するタップ（つまりタッチダウンイベントを発生させた後、タッチアップイベントを発生させるシングルタッチジェスチャ）以外のシングルタッチジェスチャ（ダブルタップ、スワイプ、ドラッグ等）に対する性能は明らかにされていない。さらに、多くの手法においてはタップ以外の全てのシングルタッチジェスチャの実行ができない。

本研究においては、スマートフォンの片手操作時において、シングルタッチジェスチャの実行を容易にするために、カーソルを用いた2つの片手操作手法を設計した。1つは、カーソルと押下圧を利用してタッチイベント（つまり、タッチダウンイベント、タッチアップイベント、およびタッチアップイベント）をカーソルの位置に発生させることが可能な手法（Force Cursor：FC）であり、もう1つは、カーソルを用いてタッチイベント発生位置の決定とジェスチャの実行を2段階の操作に分けた手法（Event Forward Cursor：EFC）である。さらに、表示を縮小する手法（全てのシングルタッチジェスチャの実行が可能であると考えられる）と、設計した2つの手法を用いてシングルタッチジェスチャ性能の調査を行った。その結果、実行するシングルタッチジェスチャやターゲットのサイズによって片手操作手法の性能が変化することが分かった。表示を縮小する手法は、ジェスチャ実行速度が速く、タップの成功率が高いものの、ターゲットが小さい場合にはダブルタップ、スワイプ、およびドラッグの成功率が低くなった。FCは、他の手法と比べて、把持を安定させたまま操作が可能であったが、ダブルタップとドラッグの成功率は低くなった。EFCは、実行するジェスチャに依らず高い成功率で実行が可能であったが、ジェスチャ実行時間が遅かった。また、実験の結果から、表示を縮小させる手法はターゲットが大きく、またスマートフォンの動きがある程度許容できるような場合に、対してFCはスマートフォンの動きを抑えたい場合に、EFCは操作に成功率が要求される場合や、タップ以外のジェスチャを頻繁に用いる場合に有効な手法であることを示した。

目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	本研究の目的とアプローチ	2
1.3	本研究の貢献	3
1.4	本論文の構成	4
第2章	関連研究	5
2.1	表示を変化させる手法	5
2.2	代替領域を利用する手法	6
2.3	カーソルを利用した手法	6
第3章	提案手法の設計	8
3.1	Force Cursor	8
3.1.1	押下圧の視覚的フィードバック	9
3.1.2	ダブルタップの実行	9
3.1.3	ドラッグの実行	12
3.2	Event Forward Cursor	12
第4章	実験：シングルタッチジェスチャ性能の調査	13
4.1	実験参加者	13
4.2	実験機器および実験環境	13
4.3	手法	14
4.3.1	FC	14
4.3.2	EFC	15
4.3.3	OM	15
4.4	ターゲット	15
4.5	シングルタッチジェスチャセッション	16
4.5.1	タップセッション	16
4.5.2	ダブルタップセッション	17
4.5.3	スワイプセッション	17
4.5.4	ドラッグセッション	17
4.6	手順	18

4.7	結果	18
4.7.1	ジェスチャ実行時間	19
	検定の結果	19
	参加者毎の結果	20
	ターゲット毎の結果	21
4.7.2	成功率	21
	検定の結果	21
	参加者毎の結果	24
	ターゲット毎の結果	24
4.7.3	加加速度	25
	検定の結果	25
	参加者毎の結果	28
	ターゲット毎の結果	30
4.7.4	角加速度	30
	検定の結果	30
	参加者毎の結果	31
	ターゲット毎の結果	31
4.7.5	SUS の得点	32
第 5 章	議論	35
5.1	片手操作手法におけるシングルタッチジェスチャ性能調査の必要性	35
5.2	各手法の特徴と最適な片手操作手法の選択	35
5.2.1	OM の特徴	35
5.2.2	FC の特徴	36
5.2.3	EFC の特徴	36
5.2.4	最適な片手操作手法の選択	36
5.3	エラーの原因と改善方法	37
5.3.1	DT と OM	37
5.3.2	FC	37
5.3.3	EFC	38
5.4	各手法のトリガの実行回数による影響	38
第 6 章	実験結果の考察限界	44
6.1	実験参加者の属性の偏りと実験参加者数	44
6.2	異なる状態でのスマートフォンの利用	44
6.3	片手操作手法の熟練度	45
6.4	実アプリケーションによる利用	45
6.5	カーソルの移動方法	45

第7章 結論	46
謝辞	47
参考文献	48
著者論文リスト	55
付録A 実験の際に用いた各種書類	57
A.1 実験同意書	58
A.2 回答済み事前アンケート	61
A.3 日本語に翻訳された System Usability Scale	69
A.4 System Usability Scale の回答	70

図目次

- 1.1 2つの提案手法. (上) Force Cursor. a: ベゼルからのスワイプによってカーソルモードに切り替わる. b: 指をドラッグすることによってカーソルは指の移動方向に, 指の移動距離 $\times$ Control-Display 比 だけ移動する. c: 押下圧を事前に決められた「タッチイベントを切り替える閾値」以上に高めることによってカーソルの位置にタッチダウンイベントが発生する. d: その後押下圧を閾値以下に低めることによってカーソルの位置にタッチアップイベントが発生する. なお, タッチダウンイベントが発生してからタッチアップイベントが発生するまでは, カーソルの位置にタッチムーブイベントが発生する. e: 画面から指を離すことによってカーソルモードは終了し, カーソルは画面から消える. Force Cursor においては, カーソルの付近に押下圧の高さを示すための円形バーが置かれており, 押下圧が変化すると円形バーも変化する. 円形バーは押下圧が閾値未満の時には青色, 閾値以上の時には赤色となる. (下) Event Forward Cursor. f, g は Force Cursor の a, b と同じである. h: カーソルモード中に指を画面から離すことによって, タッチイベント転送モードに切り替わる. i: タッチイベント転送モードにて発生したタッチイベント (タッチダウンイベント, タッチムーブイベント, およびタッチアップイベント) をカーソルの位置に転送する. j: 再び指を離すことによってタッチイベント転送モードは終了する. なお, タップを行った後, ダブルタップの待機時間 (0.25 秒間) 以内に再び画面にタッチすると, タッチイベント転送モードは継続する. 3
- 3.1 Force Cursor において, カーソルの周囲に表示される円形のバー. 円形のバーはユーザが現在加えている押下圧の高さを表しており, 押下圧が低いほど円形のバーは短く (a) なり, 高いほど長く (b) なる. なお, 円形のバーは, タッチイベントが切り替わる押下圧の閾値より, 現在加えられている押下圧が高いと赤色で表示され, 低いと青色で表示される. 9
- 3.2 Force Cursor において, ダブルタップを実行する時の押下圧の変化. 赤い円は押下圧が閾値を跨いだ点である. a: これまでの Force Cursor にてダブルタップを実行するために必要な押下圧の変化の例. b: これまでの Force Cursor にてダブルタップの実行が失敗した時のエラーが発生した時の押下圧の変化の例. c: 追加したダブルタップの補助機能により成功となる押下圧の変化の例. 参加者は1度目のタップのタッチダウンイベントを生成する時と2度目のタップのタッチアップイベントを生成する時のみ閾値を跨げば良い. 10

3.3	Force Cursor において、ドラッグを実行する時の押下圧の変化。赤い円は押下圧が閾値を跨いだ点である。a:これまでの Force Cursor にてドラッグを実行するために必要な押下圧の変化の例。ドラッグ実行中は常に閾値以上の押下圧を維持する必要があった。b:これまでの Force Cursor にて失敗となる押下圧の変化の例。c:追加したドラッグの補助機能を利用した時の押下圧の変化。ユーザは押下圧を低めた状態のままドラッグの実行が可能になる。	11
4.1	OM を使用した時の表示の変化。a:OM を使用していない時の表示。b:OM を使用している時の表示。OM を使用している時には表示が元の 2/3 のサイズに縮小される。	15
4.2	実験において配置したターゲット。a:15×7のグリッドとターゲットとなる18個のグリッド(赤色)。実験においてはグリッド間の線は表示されない。b:タップ、ダブルタップセッションにおけるターゲット(ターゲットサイズは Large)。c:スワイプセッションにおけるターゲット(ターゲットサイズは Small, 矢印は下向き)。参加者はターゲットに表示された矢印の方向にターゲットをスワイプした。d:ドラッグセッションにおけるターゲット(ターゲットサイズは Large)。参加者は1と表示されたターゲットを2と表示されたターゲットまでドラッグした。	16
4.3	各参加者の実験のタスク。各参加者は、1,152回ジェスチャ実行を行った。	17
4.4	手法、ジェスチャ毎のジェスチャ実行時間。エラーバーは95%信頼区間を表している。同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している。	20
4.5	参加者毎の全ジェスチャの平均ジェスチャ実行時間。エラーバーは95%信頼区間を表している。	21
4.6	手法、ジェスチャ、ターゲット毎のジェスチャ実行時間。上段が OM と DT との時間差、中段が FC と DT との時間差、下段が EFC と DT との時間差である。ターゲットに書かれた数字は DT におけるそのターゲットに対するジェスチャ実行時間との差である。ターゲットが赤いほどその手法が DT よりも遅いことを表し、青いほどその手法が DT よりも速いことを表している。	22
4.7	手法、ジェスチャ毎の成功率。エラーバーは95%信頼区間を表している。同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している。	23
4.8	各参加者、各手法の全ジェスチャの平均成功率。エラーバーは95%信頼区間を表している。	25
4.9	手法、ジェスチャ、ターゲット毎の成功率。上段が OM と DT との成功率の差、中段が FC と DT との成功率の差、下段が EFC と DT との成功率の差である。ターゲットに書かれた数字は DT におけるそのターゲットに対する成功率との差である。ターゲットが赤いほどその手法が DT よりも成功率が高いことを表し、青いほどその手法が DT よりも成功率が低いことを表している。	26
4.10	手法、ジェスチャ毎の加加速度。エラーバーは95%信頼区間を表している。同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している。	27

4.11	各参加者, 各手法の加加速度. エラーバーは 95%信頼区間を表している. . .	28
4.12	手のサイズと加加速度の相関図.	28
4.13	手法, ジェスチャ, ターゲット毎の加加速度. 上段が OM と DT との加加速度の差, 中段が FC と DT との加加速度の差, 下段が EFC と DT との加加速度の差である. ターゲットに書かれた数字は DT におけるそのターゲットに対する加加速度との差である. ターゲットが赤いほどその手法が DT に比べて加加速度が高いことを表し, 青いほどその手法が DT よりも加加速度が低いことを表している.	29
4.14	手法, ジェスチャ毎の角加速度. エラーバーは 95%信頼区間を表している. 同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している.	31
4.15	参加者毎の角加速度. エラーバーは 95%信頼区間を表す.	32
4.16	手法, ジェスチャ, ターゲット毎の角加速度. 上段が OM と DT との角加速度の差, 中段が FC と DT との角加速度の差, 下段が EFC と DT との角加速度の差である. ターゲットに書かれた数字は DT におけるそのターゲットに対する角加速度との差である. ターゲットが赤いほどその手法が DT に比べて角加速度が高いことを表し, 青いほどその手法が DT よりも加加速度が低いことを表している.	33
4.17	各手法の SUS の得点. エラーバーは 95%信頼区間を表す.	34
5.1	トリガが 1 度以上実行された試行のジェスチャ実行時間. エラーバーは 95%信頼区間を表す. 同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在する.	39
5.2	トリガが 1 度以上実行された試行の成功率. エラーバーは参加者間の 95%信頼区間を表す. 同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在する.	40
5.3	トリガが 1 度以上実行された試行の加加速度. エラーバーは 95%信頼区間を表す. 同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在する.	41
5.4	トリガが 1 度以上実行された試行の角加速度. エラーバーは 95%信頼区間を表す. 同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在する.	43

表 目 次

4.1	実験参加者の情報.	14
4.2	独立変数毎のジェスチャ実行時間の結果. CIは95%信頼区間である. Groupは独立変数内の有意差の有無を示しており, Groupに同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している. TECHNIQUEにおいては, OMとFC間にて $p<.05$, DTとFC間にて $p<.01$, 他の組み合わせにおいては $p<.001$ であった. TECHNIQUE $\times$ GESTUREにおいては, OMのDTapとOMのSwipe, OMのDragとFCのDTap, FCのDTapとEFCのDTap, およびEFCのTapとEFCのSwipeの間にて $p<.05$, DTのTapとDTのSwipe, DTのTapとOMのSwipe, DTのSwipeとOMのDTap, DTのDragとFCのSwipe, DTのDragとFCのSwipe, DTのDragとEFCのDTap, OMのTapとOMのSwipe, およびFCのDTapとFCのSwipeの間にて $p<.01$, 他の組み合わせにて $p<.001$ であった. TECHNIQUE $\times$ SIZEにおいては, DTのSmallとOMのSmallにて $p<.01$, 他の組み合わせにて $p<.001$ であった.	19
4.3	独立変数毎の成功率の結果. CIは95%信頼区間である. Groupに同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している. TECHNIQUEにおいては, OMとFCの間にて $p<.05$, DTとFCの間にて $p<.01$, およびFCとEFCの間にて $p<.001$ であった. TECHNIQUE $\times$ GESTUREにおいては, DTのDTapとOMのDTap, DTのSwipeとFCのDTap, DTのDragとFCのTap, OMのTapとFCのDTap, OMのTapとFCのDrag, OMのDTapとEFCのTap, OMのDTapとEFCのSwipe, OMのSwipeとFCのTap, FCのDTapとFCのSwipe, FCのSwipeとFCのDrag, およびFCのDragとEFCのDragの間にて $p<.05$ であった. また, DTのTapとDTのDrag, DTのTapとOMのSwipe, DTのDTapとFCのDrag, DTのSwipeとOMのDrag, DTのDragとEFCのDTap, OMのDTapとFCのTap, OMのSwipeとEFCのDTap, FCのDTapとEFCのDrag, FCのDTapとEFCのDrag, FCのDTapとEFCのSwipe, FCのDragとEFCのSwipe, FCのDragとEFCのTapであった. また, 他の組み合わせにおいては $p<.001$ であった. TECHNIQUE $\times$ SIZEにおいては, DTのSmallとFCのLarge, DTのLargeとEFCのSmall, OMのLargeとEFCのSmall, FCのLargeとEFCのLargeの間にて $p<.05$ であった. FCのSmallとEFCのSmall, EFCのSmallとEFCのLargeの間にて $p<.01$ であった. 他の組み合わせにおいては $p<.001$ であった.	23

4.4	独立変数毎の加加速度の結果. CIは95%信頼区間である. Groupに同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している. TECHNIQUEにおいては, FCとEFC間にて $p<.05$, 他の組み合わせにて $p<.001$ であった. TECHNIQUE $\times$ GESTUREにおいては, OMのDTapとOMのSwipe, FCのDTapとEFCのTapの間にて $p<.05$, FCのDragとEFCのSwipe, EFCのSwipeとEFCのDTapの間にて $p<.01$, 他の組み合わせにて $p<.001$ であった.	27
4.5	独立変数毎の角加速度の結果. CIは95%信頼区間である. Groupに同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している. TECHNIQUEにおいては, FCとEFC間にて $p<.05$, 他の組み合わせにて $p<.001$ であった. TECHNIQUE $\times$ GESTUREにおいては, DTのDTapとDTのSwipe, FCのSwipeとEFCのSwipe間にて $p<.05$ であった. OMのDTapとOMのDrag, FCのDTapとEFCのSwipe, EFCのTapとEFCのDrag, EFCのDTapとEFCのSwipe間にて $p<.01$ であった. 他の組み合わせにおいては $p<.001$ であった. TECHNIQUE $\times$ SIZEにおいては, FCのLargeとEFCのSmall, EFCのSmallとEFCのLargeの間にて $p<.01$ であった. 他の組み合わせにおいては $p<.001$ であった. . .	30
4.6	押下圧の熟練度を調査するためのアンケートの結果.	34
5.1	トリガが1度以上実行された試行数とその試行の平均順番 (1-18).	39
5.2	トリガが一度以上実行された試行における独立変数毎のジェスチャ実行時間の結果. CIは95%信頼区間である. Groupに同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している. TECHNIQUEにおいては, OMとEFCの間にて $p<.01$ であった. TECHNIQUE $\times$ GESTUREにおいては, OMのTapとFCのSwipe, OMのDTapとFCのTap, OMのSwipeとEFCのTap, EFCのTapとEFCのSwipeの間にて $p<.05$ であった. FCのTapとEFCのDragの間にて $p<.01$ であった. その他の組み合わせにおいては $p<.001$ であった. TECHNIQUE $\times$ SIZEにおいては, OMのSmallとFCのSmall, OMのLargeとFCのLarge, FCのLargeとEFCのSmallの間にて $p<.05$ であった. OMのSmallとOMのLargeの間にて $p<.01$ であった. その他の組み合わせにおいては $p<.001$ であった.	40

- 5.3 トリガが一度以上実行された試行における独立変数毎の成功率の結果。CIは95%信頼区間である。Groupに同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している。TECHNIQUEにおいては、FCとEFCの間においては $p<.05$ であった。OMとEFCの間においては $p<.01$ であった。TECHNIQUE × GESTUREにおいては、OMのTapとFCのDTap、OMのDTapとEFCのDrag、OMのSwipeとFCのDTap、OMのDTapとEFCのSwipe、FCのSwipeとEFCのDrag、FCのDragとEFCのSwipe、FCのDragとEFCのTap間にて $p<.05$ であった。OMのDTapとEFCのTap、OMのDTapとEFCのDTap、OMのDragとEFCのTap、OMのDragとEFCのSwipe、OMのDragとEFCのDrag、FCのSwipeとEFCのDTap、FCのSwipeとEFCのDTap、FCのSwipeとEFCのSwipe、FCのSwipeとEFCのTap、FCのDragとEFCのDTap間にて $p<.01$ であった。その他の組み合わせでは、 $p<.001$ であった。TECHNIQUE × SIZEにおいては、OMのSmallとEFCのSmall、OMのSmallとEFCのLarge、OMのLargeとEFCのSmall、OMのLargeとEFCのLargeの間にて $p<.01$ であった。その他の組み合わせにおいては $p<.001$ であった。 41
- 5.4 トリガが一度以上実行された試行における独立変数毎の加加速度の結果。CIは参加者間の95%信頼区間である。Groupに同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している。TECHNIQUEにおいては、FCとEFCの間にて $p<.05$ であった。OMとFC、OMとEFCの間にて $p<.001$ であった。TECHNIQUE × GESTUREにおいては、OMのDTapとOMのDrag、FCのSwipeとFCのDragの間にて $p<.05$ であった。FCのDragとEFCのDragの間にて $p<.01$ であった。その他の組み合わせにおいては $p<.001$ であった。TECHNIQUE × SIZEにおいては、FCのLargeとEFCのLargeの間にて $p<.05$ であった。その他の組み合わせにおいては $p<.001$ であった。 42
- 5.5 トリガが一度以上実行された試行における独立変数毎の角加速度の結果。CIは95%信頼区間である。Groupに同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している。TECHNIQUEにおいては、全ての組み合わせにおいて $p<.001$ であった。TECHNIQUE × GESTUREにおいては、OMのDTapとOMのDrag、OMのSwipeとOMのDragの間にて $p<.05$ であった。FCのDragとEFCのSwipe、EFCのTapとEFCのSwipeの間にて $p<.01$ であった。その他の組み合わせにおいては $p<.001$ であった。TECHNIQUE × SIZEにおいては、全ての組み合わせにおいて $p<.001$ であった。 42

第1章 序論

スマートフォンは、近年最も普及した携帯端末の1つである。ユーザは、スマートフォンを幅広い用途で利用しており、従来の携帯電話としての通話やメールの用途に加えて、ウェブブラウジング、ゲーム、動画視聴、さらには健康管理などにもスマートフォンを利用する。このように多くの用途で利用されるため、スマートフォンは、椅子に座っている時や立ち止まっている時に加えて、歩行中や電車に乗っている時にも利用されている。また、状況によってはユーザは片手のみを用いてスマートフォンを操作することがある。例えば、片手に傘やバッグなどの荷物を持っている場合には、ユーザは片手のみを用いてスマートフォンの操作を行う。本研究においては、このように幅広い用途、状況にて利用されているスマートフォンについて、ユーザが片手のみを用いてスマートフォンを操作する場合の問題および、その問題を解決するために行われた既存研究の問題を解決するための手法を示す。

本章においては、はじめにスマートフォンを片手のみを用いて操作する場合の問題を述べ、さらにその問題を解決するために行われた既存研究の問題を述べる。次に本研究の目的とアプローチを述べる。その後、本研究の貢献を示し、本論文の構成を述べる。

1.1 背景

多くのユーザは、片手のみを用いてスマートフォンを操作、すなわち片手にスマートフォンを把持して、親指のみを用いてスマートフォンの操作を行う傾向がある [KB06, NBW14]。スマートフォンを片手操作する際には、ユーザがスマートフォンの把持姿勢（つまり、持ち方）を変えることなく操作可能な領域は限られているため [BLO14, LMBH18]、ユーザは把持姿勢を必要に応じて変更しながら片手操作を行う必要がある。把持姿勢の変更は、親指の届かない領域を操作する際に必要となるため、スマートフォンが大きいほど把持姿勢を変更する頻度は高くなる。ただし、頻繁な把持姿勢の変更はスマートフォンの把持を不安定にするため、ユーザの快適な操作を妨げ [ERGT17, ERGT18, IOES20]、さらにはスマートフォンの落下の原因となる。近年では、大きな画面を備えたスマートフォンが普及しており、親指の届かない領域はより広がっていると考えられる。

この問題は HCI (Human Computer Interaction) の研究分野においては、よく知られており、把持姿勢を変更することなく、スマートフォンの片手操作を可能にするための手法（片手操作手法）がいくつも提案されてきた（例：[KYL12, CLKS15, CLB19]）。しかし、これらの手法の多くは、ユーザがスマートフォンの片手操作時に親指の届かないターゲットを選択（つまり、タップ）するために設計された手法である。そのため、親指の届かないターゲットに

対する選択性能が、片手操作手法を使用していない時と比べて向上していることが示されている一方で、タップ以外のシングルタッチジェスチャ（例えば、ダブルタップ、スワイプ、およびドラッグ）の性能は調査されていない。さらに、多くの手法では、タップ以外のシングルタッチジェスチャを実行することは考慮されておらず、実行することができない。ただし、ユーザがスマートフォンを操作する時には、タップ以外のシングルタッチジェスチャも利用される [App20b]。例えば、ダブルタップは動画視聴アプリにおけるスキップ機能、スワイプは通知センターやホーム画面への遷移、ドラッグはホーム画面上のアイコンの移動や画像の複数選択などに用いられている。それ故、スマートフォンの片手操作手法の設計において、シングルタッチジェスチャの実行を可能にすること、およびシングルタッチジェスチャの性能を調査することは重要であると考えられる。

1.2 本研究の目的とアプローチ

本研究の目的は、全てのシングルタッチジェスチャの実行が可能な片手操作手法を示し、その性能を明らかにすることである。そのために、本研究ではまず、全てのシングルタッチジェスチャの実行が可能な2つの片手操作手法、*Force Cursor*（図 1.1 上）および *Event Forward Cursor*（図 1.1 下）を設計した。*Force Cursor* は、ユーザが画面を押す力（押下圧）を変化させることによってタッチイベント（タッチダウンイベント、タッチムーブイベント、およびタッチアップイベント）をカーソルの位置に発生させる手法（図 1.1 上）であり、*Event Forward Cursor* はタッチイベントを発生させる位置の決定とジェスチャの実行を二段階の操作に分けた手法（図 1.1 下）である。いずれの手法においても、ユーザは指の届かないターゲットに対してカーソルを用いてシングルタッチジェスチャを実行することによって、スマートフォンの把持を安定させたまま片手操作することが可能となる。

本研究にて設計した手法は、いずれもカーソルも用いて間接的にターゲットに対してシングルタッチジェスチャを実行する手法であるが、このようなカーソルを用いてターゲットを選択する手法は、親指を用いてターゲットを直接選択する手法と比べてスマートフォンの把持を安定させたまま操作が可能である [CLBV19]。これまでに、多くのカーソルを利用した片手操作手法 [CLKS15, LFK16, KYL12, LZ15, RT09, YHHH13, SAX⁺16, CLBV19, VHCR20] が提案されてきた。しかし、これらの手法は全て、カーソルの操作中にユーザが指を画面から離れた時にカーソルの位置にタップイベント（タッチダウンイベントを発生させた後にタッチアップイベント）が発生するように設計されている。そのため、カーソルを用いてタップ以外のシングルタッチジェスチャを実行することができなかった。一方で、本研究にて設計した2つの片手操作手法は、いずれもカーソルの位置に任意のタッチイベント（タッチダウンイベント、タッチムーブイベント、タッチアップイベント）を発生させることが可能であるため、ユーザはカーソルを用いて任意のシングルタッチジェスチャの実行が可能である。

また、本研究においては、設計した2つの片手操作手法（*Force Cursor* と *Event Forward Cursor*）、および既存の片手操作手法のうち、全てのシングルタッチジェスチャの実行が可能であると考えられる画面を縮小する手法 [Sam19, CLKS15] のシングルタッチジェスチャの性

能を調査するための実験を行った。この実験の結果から、各片手操作手法のシングルタッチジェスチャの性能について議論する。

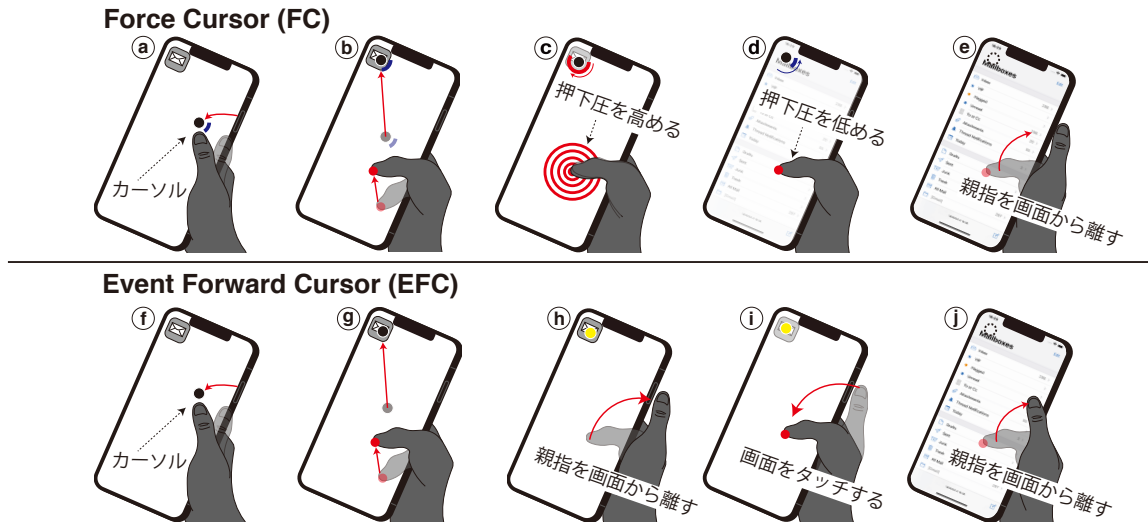


図 1.1: 2つの提案手法. (上) Force Cursor. a: ベゼルからのスワイプによってカーソルモードに切り替わる. b: 指をドラッグすることによってカーソルは指の移動方向に、指の移動距離×Control-Display 比だけ移動する. c: 押下圧を事前に決められた「タッチイベントを切り替える閾値」以上に高めることによってカーソルの位置にタッチダウンイベントが発生する. d: その後押下圧を閾値以下に低めることによってカーソルの位置にタッチアップイベントが発生する. なお、タッチダウンイベントが発生してからタッチアップイベントが発生するまでは、カーソルの位置にタッチムーブイベントが発生する. e: 画面から指を離すことによってカーソルモードは終了し、カーソルは画面から消える. Force Cursor においては、カーソルの付近に押下圧の高さを示すための円形バーが置かれており、押下圧が変化すると円形バーも変化する. 円形バーは押下圧が閾値未満の時には青色、閾値以上の時には赤色となる. (下) Event Forward Cursor. f, g は Force Cursor の a, b と同じである. h: カーソルモード中に指を画面から離すことによって、タッチイベント転送モードに切り替わる. i: タッチイベント転送モードにて発生したタッチイベント（タッチダウンイベント、タッチムーブイベント、およびタッチアップイベント）をカーソルの位置に転送する. j: 再び指を離すことによってタッチイベント転送モードは終了する. なお、タップを行った後、ダブルタップの待機時間（0.25 秒間）以内に再び画面にタッチすると、タッチイベント転送モードは継続する。

1.3 本研究の貢献

本研究の貢献は、以下の通りである。

- 全てのシングルタッチジェスチャの実行が可能な片手操作手法の設計
- 片手操作手法のシングルタッチジェスチャ性能の調査

- 各片手操作手法の特徴から状況に応じた適切な片手操作手法の提示

1.4 本論文の構成

第1章において、本論文の背景および研究目的とアプローチを述べる。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2つの片手操作手法（Force Cursor と Event Forward Cursor）について設計を述べる。第4章では、各片手操作手法のシングルタッチジェスチャ性能を調査するための実験について述べる。第5章では、本研究に関する議論を示し、第6章では、本研究にて行った実験の考察限界について示す。そして、第7章にて、本研究のまとめを述べる。

第2章 関連研究

スマートフォン等のモバイル端末の片手操作を容易にするために、これまでに多くの片手操作手法が提案されてきた。本章では、これらの手法を、表示を変化させる手法、代替領域を利用する手法、およびカーソルを利用した手法の3つに分類して述べる。

2.1 表示を変化させる手法

表示を変化させる手法とは、スマートフォンの表示そのものを移動、縮小、もしくはその両方をさせることによって、親指の届かないターゲットに対する操作を可能にする手法である。

iPhone 6以降のiPhoneにおいては、Reachability [App14] という機能が提供されており、ユーザはホームボタンをダブルタップ、もしくはスクリーン下側のベゼルから下にスワイプすることによって表示を半分下げることが可能である。また、PalmTouch [LKB⁺18] は、ユーザがスマートフォンを把持している手の掌を画面につけると表示を半分下げる。Telekinetic Thumb [HRY19] は、ホバージェスチャを用いた手法であり、ユーザは画面上空で親指を曲げるジェスチャを行う事によって表示を画面右下に移動させることができる。Sliding Screen [KYL12] は、端末のベゼルからのスワイプ、もしくは接触面積の大きなタッチをトリガとして起動し、ユーザが親指をドラッグさせると、親指の移動方向と点対称に表示が移動する。MovingScreen [THH⁺16] も同様に親指の移動方向と点対称に表示を移動させる手法であるが、ベゼルからのスワイプをトリガとして起動する際に、ユーザがベゼル上で指をドラッグした長さに応じて表示の移動速度が変化する点で異なる。TiltSlide [CLKS15] も同様に、ユーザが親指をドラッグした距離に応じて、表示を移動させる手法であるが、事前に決められた角度以上に端末を傾けることをトリガとする点で異なる。IndexAccess [HBH16]、およびLeら [LBKH16] の提案する手法においては、スマートフォンの背面にタッチパッドを取り付け、そのタッチパッド上における人差し指の動きによって表示を移動させる。これらの表示を移動させる手法 [App14, LKB⁺18, KYL12, THH⁺16, CLKS15, HBH16, LBKH16] においては、表示を移動させた際に、表示の一部分が画面外に隠れるため、親指の届かない領域から隠れた領域までのドラッグには対応していない。

Galaxy に搭載されている One-handed Mode [Sam19] は、ホームボタンのトリプルタップ、もしくはスクリーンの4隅からのスワイプをトリガとして起動し、表示を親指の近くに縮小する。また、TiltReduction [CLKS15] も同様に、表示を縮小する手法であり、この手法のトリガはスマートフォンを傾けることである。これらの表示を縮小する手法は、シングルタッチジェスチャの実行が可能であると考えられるが、これまでにタップ以外のシングルタッチジェ

スチャの性能の調査は行われていない。そのため、本論文にて調査する。

2.2 代替領域を利用する手法

代替領域を利用する手法とは、ユーザの親指の届かない領域を操作するために、画面内に別の領域を代替領域として設ける手法である。

TouchOver [大西 14] は、端末を強く振ることをトリガとして起動し、画面の下半分を上半分の代替領域として用いる手法である。この手法においては、画面下半分にて発生したタッチイベントを全て、上半分に転送する。ただし、この手法においては画面の上半分と下半分を跨いだシングルタッチジェスチャの実行はできない。一方で、本研究にて設計した2つの手法はターゲットの場所に依らずシングルタッチジェスチャの実行が可能である。ThumbSpace [KB06] は、指を画面上でドラッグさせることをトリガとして起動し、ドラッグにて指定された大きさの領域に画面全体が縮小されたポップアップを表示する。この手法は表示全体を大きく縮小するため、ターゲットが小さくなり、これにともなって Fat Finger 問題 [SRC05] が発生する可能性がある。Hasan らは、空中を代替領域として利用して、ユーザの親指の3次元的な動きを用いた操作手法を提案している [HKAI16]。ただし、指の届かないターゲットに対するタップ以外のシングルタッチジェスチャの実行については言及されていない。また Lochtefeld らは、スマートフォン背面にタッチパッドを取り付けて、端末の背面を代替領域として利用し、親指の届かない領域の操作を端末の背面からのタッチにて行う手法 [LHG13] を提案している。なお Yoo ら [YYJ15] は、スマートフォンの背面にて人差し指を用いることによって、片手操作時の操作可能な領域を 15% 拡張することが可能であることを示している。ただし、画面下側の指の届かない領域に対しては、人差し指を用いて操作することはできない。

これらの手法とは異なり、本研究にて設計した2つの手法は、ターゲットの位置に依らず、全てのシングルタッチジェスチャの実行が可能のように設計されている。

2.3 カーソルを利用した手法

カーソルを利用した手法は、ユーザがターゲットを直接タッチする代わりにカーソルを用いてターゲットに対する操作を行う手法である。これまでに提案されてきたカーソルを利用した手法の多くは、ユーザがトリガとして決められたジェスチャを行うとカーソルを操作するためのモード（カーソルモード）に切り替わり、指の下にカーソルが出現し、また、ユーザはカーソルモード中に指をドラッグすることによって、カーソルを指の移動距離に応じて移動させる。TiltCursor [CLKS15] は端末を傾けることを、BezelCursor [LFK16] はベゼルからのスワイプを、Extendible Cursor [KYL12] はベゼルからのスワイプもしくは接触面積の大きなタッチを、Extended Thumb [LZ15] はダブルタップを、MagStick [RHL08] は画面をタッチすることをトリガとしてカーソルモードに切り替わる。なお、Extendible Cursor [KYL12] において接触面積の大きなタッチをトリガとした時には、カーソルは指の移動方向と点対称に移動し、その他の手法は指の移動方向と同方向に移動する。

CornerSpace および BezelSpace [YHHH13] は、指の下以外の場所にカーソルを出現させる手法である。CornerSpace は、ベゼルからのスワイプによって画面全体を縮小したポップアップが表示される。ユーザはそのポップアップをタッチすることによって、画面上のタッチした位置に対応する位置にカーソルを出現させることができる。一方で、BezelSpace は、ユーザのベゼルからのスワイプをトリガとして表示の四隅、および中央を表すボタンを表示する。その後、ユーザは表示されたボタンを選択することによって対応した位置にカーソルを出現させる。これらは、ユーザがターゲットの近くにカーソルを表示できるため、カーソルを移動させる距離（つまり、親指をドラッグする距離）を短くすることが可能である。一方で、カーソルの出現位置を決定するためのジェスチャ実行が必要となっている。

2D-Dragger [SAX⁺16], ForceRay [CLBV19], HeadReach [VHCR20] はカーソルの移動方法を変更した手法である。2D-Dragger は、画面のいずれかの部分をタッチすることによって起動し、ユーザが指を移動させた時に、その移動方向に存在する最も近いターゲットまでカーソルを移動する。ForceRay は、ユーザが押下圧を高めることによって起動し、押下圧を高めるとカーソルが指から離れる方向に、押下圧を低めるとカーソルが指の方向に移動する。HeadReach は、顔の向きと指のドラッグを組み合わせたカーソルの移動方法を3種類提案している。これらの手法は、指の移動距離をより少なくすることが可能である。

これまでに提案されているカーソルを利用した手法は、起動するためのトリガ、カーソルの出現位置、カーソルの移動方法が異なるものの、タッチイベントを発生させるための方法はいずれも同じである。すなわち、カーソル操作中に指が画面から離れると、カーソルの位置のターゲットの選択（タップ）が行われる。このような、指を画面から離した時に、その時のカーソルの位置のターゲットを選択する手法は、よく利用されており、また高い選択精度となることが知られている [SS91]。一方で、カーソルを用いたタップ以外のシングルタッチジェスチャの実行ができないという問題をともなう。本研究にて設計した Force Cursor はタッチイベントを発生させる方法として押下圧を利用すること、また Event Forward Cursor は二段階の操作を利用することにより、カーソルを用いて、タップ以外のシングルタッチジェスチャの実行を可能とする。

第3章 提案手法の設計

本章においては、設計した2つの片手操作手法である Force Cursor と Event Forward Cursor について説明する。いずれの手法も、全てのシングルタッチジェスチャの実行をカーソルを用いて可能にした手法である。

なお、先行研究 [KYL12, CLKS15, CLBV19] にてベゼルからのスワイプを、カーソルを操作するためのモード（カーソルモード）へ切り替えるためのトリガとした手法の性能が高いことが示されている。そのため、いずれの手法においてもカーソルモードに切り替えるためのトリガとして、ベゼルからのスワイプを採用した。また、[CLKS15, LFK16] の手法の設計と同様に、両手法とも共通してカーソルは、親指の移動方向と同方向に移動し、カーソルの移動距離 = 親指の移動距離 $\times$ Control-Display (CD) 比として計算される。

3.1 Force Cursor

Force Cursor においては、ベゼルからのスワイプによってカーソルモードに切り替わる（図 1.1a）。ユーザがカーソルモード中に指をドラッグすると、カーソルは指と同方向に移動する（図 1.1b）。カーソルモード中に押下圧が、事前に決定した「タッチイベントを発生させるための押下圧の閾値」以上に高められると、タッチダウンイベントがカーソルの位置に発生（図 1.1c）する。押下圧を高めた状態にてカーソルを移動させるとタッチムーブイベントがカーソルの位置に発生する。その後押下圧が閾値以下に低められるとタッチアップイベントがカーソルの位置に発生する（図 1.1d）。また、カーソルモードは、ユーザが指を画面から離すまで継続する（図 1.1e）ため、連続してカーソルを用いた操作を行うことができる。なお、カーソルモード中には、ユーザは自由にタッチイベントを発生させられるため、カーソルモード中にシングルタッチジェスチャを実行できる。例えば、タップやロングタップは押下圧を閾値以上に高めてから閾値以下に低めること（すなわち、押下圧を用いてクリックを行うこと [YLP⁺17]）によって、ダブルタップは素早く2回押下圧を用いたクリックを繰り返すことによって、スワイプ、ドラッグは押下圧を高めた状態にて指を移動させることによって実行可能となる。

しかし、[HIS19] の発表にて、Force Cursor のデモを行った際に、デモの参加者から以下のようなコメントが得られた。

- フィードバックがないため、現在加えている押下圧の高さを把握できなかった。
- カーソルを用いたダブルタップの実行が難しかった。

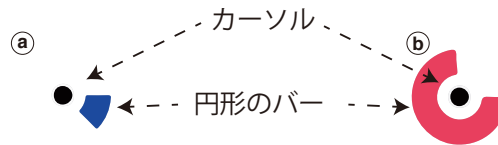


図 3.1: Force Cursor において，カーソルの周囲に表示される円形のバー．円形のバーはユーザが現在加えている押下圧の高さを表しており，押下圧が低いほど円形のバーは短く (a) なり，高いほど長く (b) なる．なお，円形のバーは，タッチイベントが切り替わる押下圧の閾値より，現在加えられている押下圧が高いと赤色で表示され，低いと青色で表示される．

- 押下圧を高めた状態で指を大きく移動させること（つまり，カーソルを用いた長い距離のドラッグ）が難しかった．

それ故，これらの問題を解決するための機能を追加した．

3.1.1 押下圧の視覚的フィードバック

Force Cursor にて，タッチイベントを発生させるには，ユーザは現在加えている押下圧と，Force Cursor におけるタッチイベントが切り替わる押下圧の閾値との差を把握する必要がある．そこで，ユーザが現在加えている押下圧の高さを常に把握できるようにカーソルの周囲に，ユーザが現在加えている押下圧の高さを示すための円形のバーを配置した (図 3.1)．押下圧を用いた操作手法においては，継続的な視覚的フィードバックが有効であることが知られている [CIS07, WSB10, MTKJ+05] ため，Force Cursor にも継続的な視覚的フィードバックを追加した．カーソルの周囲の円形のバーは，スマートフォンにて取得可能な押下圧の最大値に対するユーザが現在加えている押下圧の割合によって長さが変化する．また，現在加えている押下圧が閾値より低い場合には青色，高い場合には赤色となる．

3.1.2 ダブルタップの実行

Force Cursor において，カーソルを用いたダブルタップを実行するためには，1 度目のタップのタッチダウンイベントとタッチアップイベント，2 度目のタップのタッチダウンイベントとタッチアップイベントを発生させる時の計 4 回押下圧の閾値を跨ぐ必要がある (図 3.2a)．しかし，デモにおいて，参加者はダブルタップを実行する際に，加えている押下圧が閾値を跨ぐ前に押下圧を変化させていたため頻繁に実行を失敗していた．つまり，図 3.2b に示すように，1 度目のタップのタッチアップイベントが発生する前に 2 度目のタップのタッチダウンイベントを発生させようとしていたため，ダブルタップの実行ができなかった．

この問題を解決するために，押下圧の閾値を考慮せずにダブルタップの実行を可能とする機能を実装した．この機能においては，ユーザは 1 度目のタップのタッチダウンイベントを発生させる時，および 2 度目のタップのタッチアップイベントを発生させる時にのみ閾値を跨げば良い (図 3.2c)．

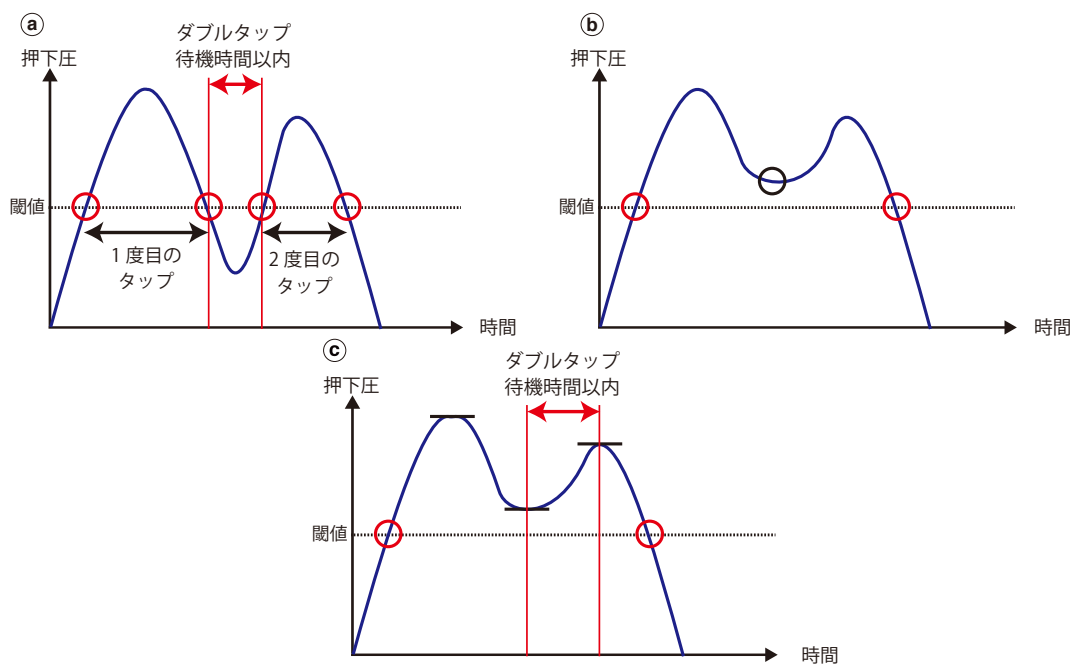


図 3.2: Force Cursor において、ダブルタップを実行する時の押下圧の変化。赤い円は押下圧が閾値を跨いだ点である。a: これまでの Force Cursor にてダブルタップを実行するために必要な押下圧の変化の例。b: これまでの Force Cursor にてダブルタップの実行が失敗した時のエラーが発生した時の押下圧の変化の例。c: 追加したダブルタップの補助機能により成功となる押下圧の変化の例。参加者は1度目のタップのタッチダウンイベントを生成する時と2度目のタップのタッチアップイベントを生成する時のみ閾値を跨げば良い。

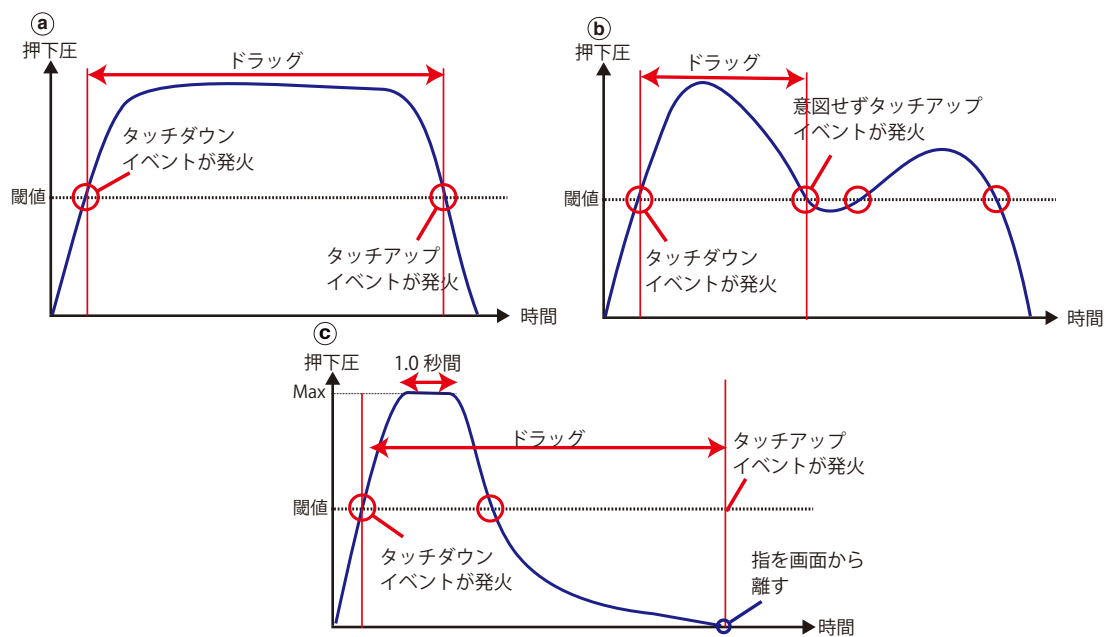


図 3.3: Force Cursor において、ドラッグを実行する時の押下圧の変化．赤い円は押下圧が閾値を跨いだ点である． a：これまでの Force Cursor にてドラッグを実行するために必要な押下圧の変化の例．ドラッグ実行中は常に閾値以上の押下圧を維持する必要があった． b：これまでの Force Cursor にて失敗となる押下圧の変化の例． c：追加したドラッグの補助機能を利用した時の押下圧の変化．ユーザは押下圧を低めた状態のままドラッグの実行が可能になる．

3.1.3 ドラッグの実行

Force Cursor において、カーソルを用いたドラッグを行うためには、押下圧を閾値以上に高めた状態にて指を移動させる必要がある（図 3.3a）。しかし、押下圧を高めた状態での指の移動は、指と画面の間の摩擦力が高くなるため [HL11, HL12]、特に長い距離のドラッグを行う場合に、途中で押下圧が低くなってしまい、ユーザが意図していない場所にタッチアップイベントが発生してしまうエラーが発生していた（図 3.3b）。

そのため、押下圧を低めた状態にてカーソルを用いたドラッグを可能とする機能を追加した。この機能においては、ユーザは押下圧を測定可能な最大値まで高めた状態を 1.0 秒間維持すると、押下圧の高さに依らず、画面から指を離すまでタッチムーブイベントがカーソルの位置に発生し続ける。それ故、図 3.3c に示すように、ユーザは押下圧を低めた状態にてカーソルを用いたドラッグの実行が可能である。なお、押下圧を最大まで高めた状態を維持することで、モードを固定する機能は Heo らの Force Lock [HL12] と同じである。

3.2 Event Forward Cursor

Event Forward Cursor においても、Force Cursor と同様に、ベゼルからのスワイプによってカーソルモードに切り替わり（図 1.1f）、ユーザが指をドラッグすると、カーソルは指と同方向に移動する（図 1.1g）。カーソルモード中に指が画面から離れると、カーソルモードからタッチイベント転送モードに切り替わる。タッチイベント転送モード中にはカーソルは黄色に塗りつぶされ（図 1.1h）、ユーザが指にて発生させたタッチイベントが全てカーソルの位置に転送される。そのため、指が画面に触れた時にはカーソルの位置にタッチダウンイベントが、その後指をドラッグさせると、カーソルの位置にタッチムーブイベントが、指を画面から離すとカーソルの位置にタッチアップイベントが発生する。すなわち、タッチイベント転送モード中に画面上のいずれかの位置にてタップを行うとカーソルの位置にてタップを実行（図 1.1h-j）、また指をドラッグするとカーソルを用いたドラッグが可能となる。タッチイベントを転送し始める位置は、カーソルモードを終了した位置となるが、この決定方法は既存のカーソル手法と同じであり、ユーザが視覚的フィードバックを受けながらイベント発生位置を決定できるため、選択精度が高いことが知られている [SS91]。なお、タッチイベント転送モードは、画面から指が離れると終了する（図 1.1j）が、タップを転送してから、ダブルタップの待機時間である 0.25 秒以内に再び画面をタッチするとタッチイベント転送モードは継続するため、ダブルタップやタップ&ホールド等のタッチアップイベントを組み合わせたシングルタッチジェスチャの入力が可能である。また、1つのタッチジェスチャを転送し終えた後、再びカーソルを用いる際には、もう一度ベゼルからのスワイプを実行する必要がある。

第4章 実験：シングルタッチジェスチャ性能の調査

設計した2つの片手操作手法である Force Cursor (FC) と Event Forward Cursor (EFC), および既存の片手操作手法のうち全てのシングルタッチジェスチャの実行が可能な手法である画面を縮小する手法として One-handed Mode [Sam19] (OM) のシングルタッチジェスチャの性能を調査するために, 実験を行った. なお, 本実験はビデオ通話を用いて遠隔で行った.

4.1 実験参加者

実験参加者は, 21 歳から 24 歳まで (平均 22.38 歳, $SD = 1.06$ 歳) の, 押下圧の検出が可能な iPhone を使用しており, 普段右手にてスマートフォンを操作している大学生, および大学院生 8 名である. 参加者のうち 7 名が男性であり, 1 名が女性であった. 手のサイズは平均 6.24 cm ($SD = 0.61$ cm) であり, 親指の長さは平均 6.24 cm ($SD = 0.49$ cm) であった.

参加者の情報をまとめた表を, 表 4.1 に示す.

4.2 実験機器および実験環境

実験に使用したスマートフォンは, 参加者自身のスマートフォンであり, iPhone XS (177 g) が 3 台, iPhone X (174 g) が 1 台, iPhone 8 (148 g) が 1 台, iPhone 7 (138 g) が 2 台, および iPhone 6s (143 g) が 1 台であった. なお, 画面の大きさは, iPhone XS と iPhone X においては 103.94 mm $\times$ 58.44 mm であり, その他においては 103.94 mm $\times$ 58.44 mm である. iPhone の押下圧の感度の設定は「中」とした.

実験は, 参加者の自宅にて, 椅子に座った状態で行われた.

実験アプリケーションの実装には, 「pt」という長さの単位が用いられており, pt の実世界での長さは iPhone によって多少変化するため, 本章における長さの単位としては pt を用いる. なお, iPhone XS および iPhone X においては, 1 pt $\simeq$ 0.17 mm であり, iPhone 8, iPhone 7 および iPhone 6s においては 1 pt $\simeq$ 0.16 mm である.

表 4.1: 実験参加者の情報.

参加者	性別	年齢	スマートフォン	手の大きさ [cm]	親指の長さ [cm]
p1	男性	21	iPhone XS	19.5	7.0
p2	男性	22	iPhone XS	18.5	6.0
p3	女性	21	iPhone 7	17.7	5.7
p4	男性	24	iPhone X	19.2	6.7
p5	男性	22	iPhone 6s	18.1	6.0
p6	男性	23	iPhone XS	19.2	5.6
p7	男性	23	iPhone 8	18.5	6.5
p8	男性	23	iPhone 7	18.6	6.4

4.3 手法

実験で用いた手法は、全てのシングルタッチジェスチャの実行が可能な片手操作手法として、FC、EFC、画面を縮小する手法（OM [Sam19]）およびベースラインとして片手操作手法を使用しない直接タッチ（Direct Touch：DT）の4手法である．他の片手操作手法（例えば Apple の Reachability [App14] やカーソル手法 [KYL12, LFK16]）は、全てのシングルタッチジェスチャが実行できないため除いた．なお、各手法を起動するためのジェスチャ（トリガ）が性能に与える影響を除くために、FC、EFC、OM のトリガはベゼルからのスワイプに統一した．

4.3.1 FC

FC のカーソルのサイズは 9pt であり、カーソルの移動距離は親指の移動距離の 3 倍に設定した．これらは、著者および研究室内の 2 人が、操作中にカーソルの位置を見失わないように、かつ把持姿勢を変更することなく画面全体の操作が可能となるように決定した．

FC における押下圧の取得には、iPhone の 3D Touch [App20a] に用いられている押下圧の取得が可能なタッチスクリーンを利用した．Apple 社によると、iPhone の押下圧の感度が「中」に設定されている状態においては、押下圧は 0 から $\frac{480}{72}$ ($\simeq 4.0$ N [Nel15]) までの単位の無い値として取得可能である [App19]．なお、1.0 周辺の値 ($\simeq 0.60$ N [Nel15]) は、日常のタッチにて発生する押下圧である．押下圧の閾値の決定のために、同じ研究室にて 2 人の協力者を募り、カーソルの操作中に意図せず押下圧の閾値を跨がないように、押下圧の閾値を 3.0 に調整した．

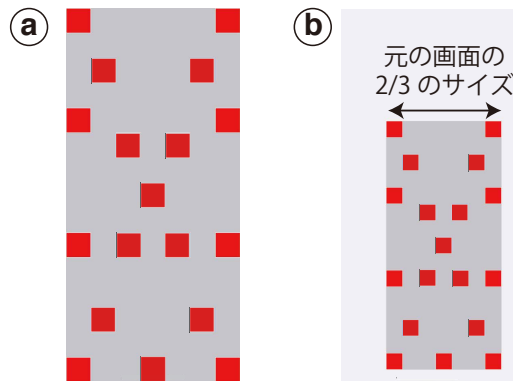


図 4.1: OM を使用した時の表示の変化. a : OM を使用していない時の表示. b : OM を使用している時の表示. OM を使用している時には表示が元の 2/3 のサイズに縮小される.

4.3.2 EFC

EFC においても, FC と同様にカーソルのサイズは 9pt であり, カーソルの移動距離は親指の移動距離の 3 倍に設定した. EFC においては, カーソルモード中にはカーソルが黒色に, タッチイベント転送モード中にはカーソルが黄色に表示される.

4.3.3 OM

OM においては, ユーザがベゼルからのスワイプを行うと表示が縮小し, 図 4.1 に示すように, 縮小された表示は画面右下に移動する. なお, 再びベゼルからのスワイプを行うと元のサイズに拡大される (図 4.1a). 本実験においては, One-Handed Mode (OM) [Sam19] の標準設定と同様に, 表示は元のサイズの 2/3 に縮小された (図 4.1b).

4.4 ターゲット

まず, 画面全体を 15×7 のグリッドに分割した. グリッドのサイズはスマートフォンによって異なる. 実験におけるシングルタッチジェスチャを実行するターゲットは, 図 4.2a に示すように, グリッドのうち 18 箇所配置された. ターゲットの位置は, Corsten ら [CLBV19] の実験を参考に, 画面の端と中央に同数となるように配置した. ただし, 本実験は参加者毎に使用するスマートフォンのサイズが異なり, Le らの研究によってスマートフォンのサイズによって片手操作時の把持位置や指の届かない領域が変化する [LMBH18] ことがわかっているため, 本実験においては, Corsten らと異なり, 画面全体にターゲットを配置した.

ターゲットのサイズは 2 種類とした. 一方が, $60 \text{ pt} \times 60 \text{ pt}$ (*Large*) であり, もう一方が $30 \text{ pt} \times 30 \text{ pt}$ (*Small*) である. $60 \text{ pt} \times 60 \text{ pt}$ のサイズは, ホーム画面のアイコンと同じサイズであり, $30 \text{ pt} \times 30 \text{ pt}$ のサイズは, 画面上に配置されるボタン (例えば, ブラウザの左上の戻るボタンや画面下部のブックマークボタン) のサイズである.

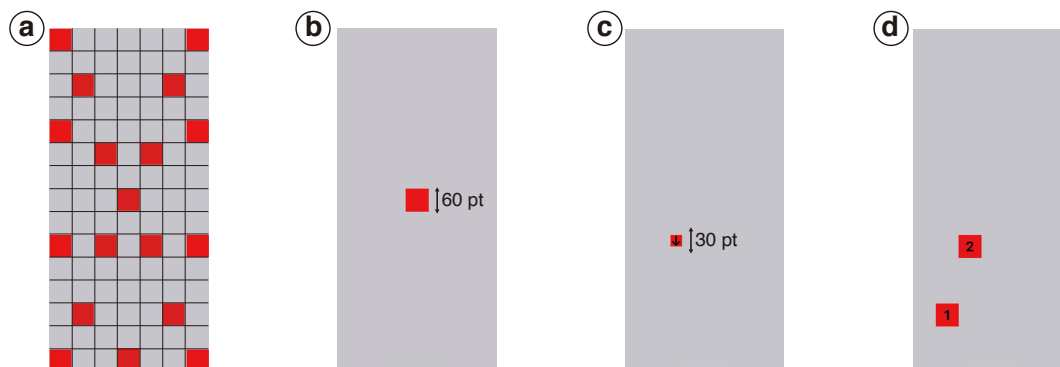


図 4.2: 実験において配置したターゲット． a：15×7 のグリッドとターゲットとなる 18 個のグリッド（赤色）． 実験においてはグリッド間の線は表示されない． b：タップ，ダブルタップセッションにおけるターゲット（ターゲットサイズは Large）． c：スワイプセッションにおけるターゲット（ターゲットサイズは Small，矢印は下向き）． 参加者はターゲットに表示された矢印の方向にターゲットをスワイプした． d：ドラッグセッションにおけるターゲット（ターゲットサイズは Large）． 参加者は 1 と表示されたターゲットを 2 と表示されたターゲットまでドラッグした．

ターゲットは，グリッドの左上の角を始点として配置される． 配置された後，ターゲットが画面の外にはみ出した場合にははみ出した分だけ画面中央方向に移動する． なお，実験中は現在のターゲットのみが赤色となって表示され，他のターゲットは表示されない．

4.5 シングルタッチジェスチャセッション

実験対象としたシングルタッチジェスチャは，タップ（*Tap*），ダブルタップ（*DTap*），スワイプ（*Swipe*），ドラッグ（*Drag*）の 4 種類である． 本実験においては，各シングルタッチジェスチャにそれぞれ異なるセッション（ジェスチャセッション）を設けた． 本節では，それぞれのジェスチャセッションについて説明する．

4.5.1 タップセッション

タップセッションにおいては，1 つのターゲットが赤色で表示される（図 4.2b）． 参加者は，ターゲットに対して，指定された手法で Tap（つまり，タッチダウンイベントを発生した後，タッチアップイベントを発生させること）を実行する． 本実験においては，iPhone の仕様と同様に，タッチダウンイベントとタッチアップイベントが同一のターゲット内にて発生した時に Tap と認識する．

$$\begin{array}{c}
 \boxed{\begin{array}{c} 4 \text{ 手法} \\ DT, OM, FC, EFC \end{array}} \times \boxed{\begin{array}{c} 4 \text{ ジェスチャ} \\ \text{Tap, DTap, Swipe, Drag} \end{array}} \times \boxed{18 \text{ ターゲット}} \times \boxed{\begin{array}{c} 2 \text{ ターゲットサイズ} \\ \text{Large, Small} \end{array}} \times \boxed{2 \text{ 繰り返し}} \\
 = 1,152 \text{ 試行}
 \end{array}$$

図 4.3: 各参加者の実験のタスク. 各参加者は, 1,152 回ジェスチャ実行を行った.

4.5.2 ダブルタップセッション

ダブルタップセッションにおいては, 1つのターゲットが赤色で表示される (図 4.2b). 参加者は, ターゲットに対して指定された手法で DTap を実行する. なお, DTap はあるターゲットに対して 1 度 Tap を行った後, DTap の待機時間以内に再びそのターゲットに対してタッチダウンイベントが発生し, その後そのターゲット内にてタッチアップイベントが発生したときに実行される. 本実験においては, iPhone の標準設定と同様に, DTap の待機時間として 0.25 秒を採用した.

4.5.3 スワイプセッション

スワイプセッションにおいては, 1つのターゲットが赤色で表示され, そのターゲットに黒い文字で矢印が表示される (図 4.2c). 参加者は, ターゲットに対して, 表示された矢印の方向に, 指定された手法で Swipe を実行する. 矢印の方向は上下左右のうちいずれかがランダムで選択される. ただし, 上下左右の端に接するターゲットについては, 実行されたジェスチャが Tap か Swipe であるか判定できないため, 端方向への矢印は表示されなかった. つまり, 左上端のターゲットにおいては, 右, あるいは下方向の矢印が表示され, 右端のターゲットにおいては, 上, 左, あるいは下の矢印が表示された. なお, 本実験においては, あるターゲットに対してタッチダウンイベントが発生した後, いずれかの方向にタッチムーブイベントが 30 pt 以上移動した場合に Swipe と認識する. 移動させる距離は, 参加者が Tap を実行しようとした時に, 意図せず Swipe が実行されないように実験的に決定した.

4.5.4 ドラッグセッション

ドラッグセッションにおいては, 2つのターゲットが設定される (図 4.2d). 1つは Drag を開始するターゲット (ターゲット 1) であり, もう 1つは Drag を終了するターゲット (ターゲット 2) である. なお, 図 4.2d に示すように, ターゲット 1 には黒い文字で 1 と表示され, ターゲット 2 には 2 と表示された. 参加者は, まずターゲット 1 の位置にてタッチダウンイベントを発生させた後, ターゲット 2 の位置まで指, あるいはカーソルを移動させ, ターゲット 2 の位置にてタッチアップイベントを発生させる.

4.6 手順

実験を開始する前に、実験実施者と実験参加者にてビデオ通話を開始し、実験中は実験実施者と実験参加者が常に会話が可能な状態とした。その後、参加者に対して、自身の iPhone に、TestFlight [App20c] を通して、実験アプリをインストールしてもらうように指示した。その後、実験の同意書（付録 A.1）、および普段のスマートフォンの利用に関するアンケート（付録 A.2）に回答してもらった。参加者には、実験中は椅子に深く腰掛けて、右手に実験端末を把持し、右手の親指のみを用いて操作を行うように指示した。実験全体の流れを説明した後、最初の手法の最初のジェスチャのセッションを行った。

18 個のターゲットに対して、ジェスチャを実行することを 1 セットとして、参加者は、各手法、各ジェスチャ、各ターゲットサイズにてそれぞれ 2 セットずつ行った。そのため、各参加者につき、図 4.3 に示すように 1,152 回のジェスチャ実行のデータを記録した。ただし、各手法の各ジェスチャの最初のセットの前に、1 セット分の練習を行った。参加者はある手法、あるジェスチャ、あるターゲットサイズにて練習として 1 セットを行ったあと、本番として 2 セットを繰り返した。そのサイズの本番の 2 セットが終わった後、もう一方のサイズにて本番の 2 セットを行った。2 つのサイズにて 2 セットずつ終わった後、参加者には次のジェスチャセッションが提示され、そのジェスチャの練習を開始した。ある手法で全てのジェスチャの全てのセットが終わった後、参加者には次の手法が提示された。なお、参加者は各セットが終わった後、手の疲れが取れるまで休憩をとった。

手法とジェスチャの順番については、ラテン方格法を用いてカウンターバランスをとった。ターゲットは、ランダムな順番で選択された。また、ターゲットサイズも同様にランダムな順番で選択されたが、手法 × ジェスチャの 16 通り中 8 通りが小さなターゲット (30pt × 30pt) から、残りの 8 通りが大きなターゲット (60pt × 60pt) から始まった。

参加者は、各手法の全てのジェスチャのセットを終えた後、その手法のユーザビリティに関する主観調査を行うために、付録 A.3 に示すような日本語に翻訳された System Usability Scale [Bro96] (SUS) を用いたアンケートを行った。なお、SUS の回答は付録 A.4 に示す。実験時間は約 2 時間であり、参加者は、実験を終了した後、謝金として 3,440 円を受け取った。

4.7 結果

本実験の独立変数は手法 (TECHNIQUE)、ジェスチャー (GESTURE)、サイズ (SIZE) である。従属変数は、ジェスチャ実行時間、成功率、加加速度、角加速度、および SUS の得点である。加加速度は、円滑な動きの評価に用いられる指標であり [LCR07]、角加速度は、振動状態を評価する指標 [ZF13] である。本実験においては、これらの値を、片手操作時のスマートフォンの安定度を評価するために用いた。

SUS の得点を除く説明変数の分析には、TECHNIQUE、GESTURE、SIZE を説明変数とした反復測定 3 元配置分散分析を用いて、SUS の得点の分析には手法のみを説明変数とした反復測定 1 元配置分散分析を用いた。また、事後検定としては Tukey の HSD 検定を用いた。いずれの検定についても、有意水準は 5%、1%、0.1% を用いた。なお、本実験の目的は手法によ

表 4.2: 独立変数毎のジェスチャ実行時間の結果. CI は 95%信頼区間である. Group は独立変数内の有意差の有無を示しており, Group に同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している. TECHNIQUE においては, OM と FC 間にて $p < .05$, DT と FC 間にて $p < .01$, 他の組み合わせにおいては $p < .001$ であった. TECHNIQUE $\times$ GESTURE においては, OM の DTap と OM の Swipe, OM の Drag と FC の DTap, FC の DTap と EFC の DTap, および EFC の Tap と EFC の Swipe の間にて $p < .05$, DT の Tap と DT の Swipe, DT の Tap と OM の Swipe, DT の Swipe と OM の DTap, DT の Drag と FC の Swipe, DT の Drag と FC の Swipe, DT の Drag と EFC の DTap, OM の Tap と OM の Swipe, および FC の DTap と FC の Swipe の間にて $p < .01$, 他の組み合わせにて $p < .001$ であった. TECHNIQUE $\times$ SIZE においては, DT の Small と OM の Small にて $p < .01$, 他の組み合わせにて $p < .001$ であった.

	DT			OM			FC			EFC		
	Mean	CI	Group	Mean	CI	Group	Mean	CI	Group	Mean	CI	Group
	1.45	± 0.19	A	1.56	± 0.27	A	2.36	± 0.23	B	2.29	± 0.20	B
GESTURE												
Tap	1.38	± 0.12	B	1.41	± 0.09	B	2.08	± 0.32	C,D,E	2.28	± 0.30	E,F
DTap	1.20	± 0.22	A,B	1.34	± 0.10	B	2.13	± 0.58	D,E	1.84	± 0.31	C
Swipe	0.99	± 0.10	A	1.01	± 0.13	A	1.83	± 0.36	C	1.95	± 0.37	C,D
Drag	2.22	± 0.38	D,F	2.51	± 0.85	F	3.34	± 0.63	G	3.10	± 0.61	G
SIZE												
Small	1.71	± 0.27	B	1.94	± 0.46	C	2.70	± 0.38	D	2.60	± 0.32	D
Large	1.19	± 0.14	A	1.16	± 0.11	A	2.00	± 0.23	C	1.99	± 0.19	C

る性能の差を調査することであるため, 手法に関する主効果, および交互作用についてのみを結果として述べる.

4.7.1 ジェスチャ実行時間

ジェスチャ実行時間に関する検定の結果, 参加者毎の結果, ターゲット毎の結果をそれぞれ示す. なお, ジェスチャ実行時間はターゲットが表示されてから, 正しいシングルタッチジェスチャが実行されるまでの時間である.

検定の結果

独立変数毎のジェスチャ実行時間を表 4.2 に示す. また, 手法, ジェスチャ毎のジェスチャ実行時間の棒グラフを図 4.4 に示す. なお, Tap が DTap や Swipe の結果と比べて遅くなっているのは, 実行されたジェスチャが Tap か DTap であるかを判定するために, Tap の実行後に 0.25 秒間の待機時間が設けられているからである. つまり, Tap においては, ユーザが Tap を実行した後, 0.25 秒間の待機時間が発生し, その後 Tap の入力が確定される. 一方で DTap に

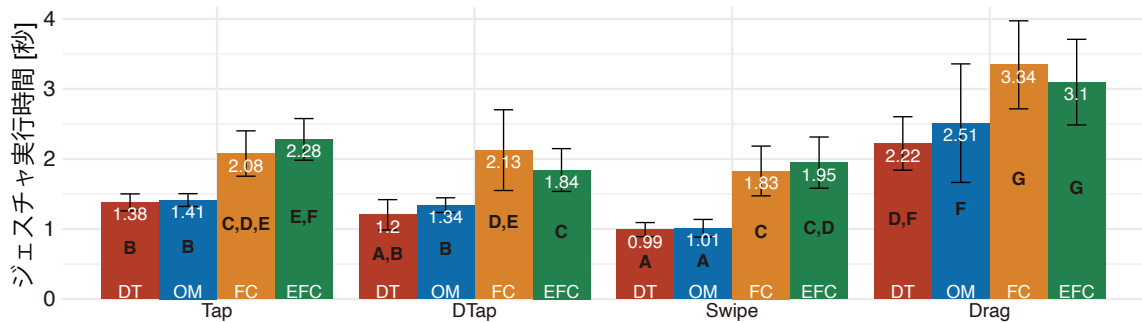


図 4.4: 手法，ジェスチャ毎のジェスチャ実行時間．エラーバーは 95%信頼区間を表している．同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している．

においては，ユーザがその DTap の 2 度目のタップを実行した瞬間に，DTap の入力が確定される．一般に，DTap の実行にかかる時間は，Tap の実行にかかる時間よりも短い [ITY20]．

TECHNIQUE は，ジェスチャ実行時間に対して有意な主効果が存在した ($F_{3,9425} = 25.05, p < .001$)．また，Tukey の HSD 検定の結果も有意であり，DT と EFC，OM と EFC の間にて $p < .001$ ，DT と FC の間にて $p < .01$ ，および OM と FC の間にて $p < .05$ であった．

TECHNIQUE $\times$ GESTURE の有意な交互作用も存在した ($F_{9,9425} = 3.26, p < .001$)．図 4.4 に示すように，いずれのシングルタッチジェスチャの実行時間も，ジェスチャ実行時間は，DT $\simeq$ OM $<$ EFC $\leq$ FC という結果になった．FC と EFC 間においては，DTap のみに有意な差が存在したが，他のジェスチャにおいては有意な差が存在しなかった．これらの結果から，ターゲットに対して直接指で操作を行う手法 (DT および OM) は，カーソルを用いてターゲットに対して間接的に操作を行う手法 (FC および EFC) に比べてジェスチャの実行が速いことを示唆している．なお，この結果は，Chang ら [CLKS15] がターゲットの選択 (タップ) のみを対象として行った実験の結果と同じである．そのため，実行するジェスチャに依らず，ターゲットに対して直接指で操作を行う手法は，カーソルを用いてターゲットに対して間接的に操作を行う手法よりも速いと考えられる．

また，TECHNIQUE $\times$ SIZE の有意な交互作用も存在した ($F_{3,9425} = 3.52, p < .01$)．全ての手法において，大きなターゲットサイズに対するジェスチャ実行は，小さなターゲットサイズに対するジェスチャ実行に比べて速かった．

参加者毎の結果

各参加者，各手法の全ジェスチャの平均ジェスチャ実行時間の結果を図 4.5 に示す．図 4.5 に示すように，手法毎に参加者のジェスチャ実行時間は大きく変化した．特に FC においては，参加者毎のジェスチャ実行時間の差が非常に大きいという結果となった．p3 および p5 は，FC の操作時に，爪が長く指の腹でしか操作ができないため，押下圧を変化させながらカーソルを移動させることが難しいと述べていた．このことから，FC の性能は，ユーザが普段どの

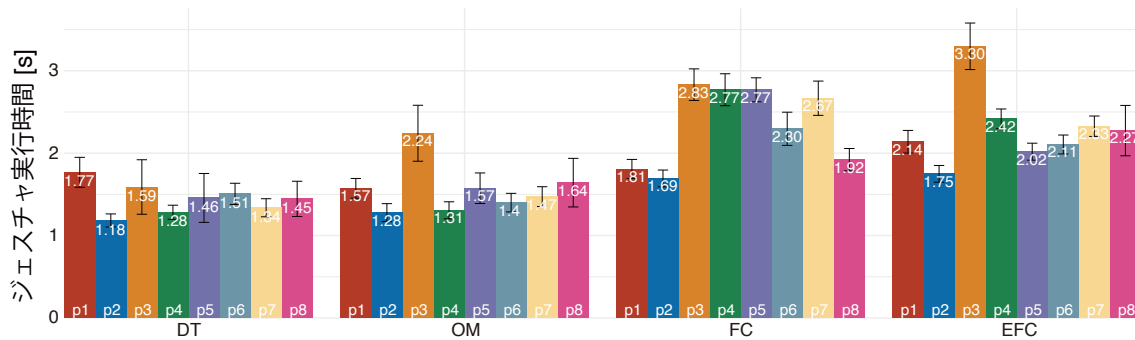


図 4.5: 参加者毎の全ジェスチャの平均ジェスチャ実行時間. エラーバーは 95%信頼区間を表している.

ような指の角度でスマートフォンの操作を行っているかに影響を受ける可能性が考えられる. Xu ら [XLYS12] は, 指の角度によってジェスチャ実行時の成功率に影響があることを述べており, FC においては, 押下圧の変化もともなうジェスチャ実行が必要になるため, より指の角度が操作性に影響した可能性がある.

ターゲット毎の結果

各手法の各ジェスチャにおける, ターゲット毎の DT とのジェスチャ実行時間の差を図 4.6 に示す. 図 4.6 からわかるように, ターゲットの位置は, ジェスチャ実行時間に対して大きな影響を与えることはなかった. ただし, FC と EFC においては, 右端の下から 2 番目のターゲットにてジェスチャ実行時間が大きくなった. 本実験においては, 全ての参加者が右手にてスマートフォンを把持していたため, カーソルを画面右側に移動させた際に, 親指によってカーソルとターゲットが隠れてしまったことが原因として考えられる.

4.7.2 成功率

成功率に関する検定の結果, 参加者毎の結果, ターゲット毎の結果をそれぞれ示す. なお, 成功率は 1 セッション (18 回のジェスチャ実行) のうち, 1 度もエラー (ターゲット以外の場所に対するシングルタッチジェスチャの実行, あるいは異なるシングルタッチジェスチャの実行) を発生させずにジェスチャを成功した割合である.

検定の結果

独立変数毎の成功率を表 4.3 に示す. また, 手法, ジェスチャ毎の成功率の棒グラフを図 4.7 に示す.

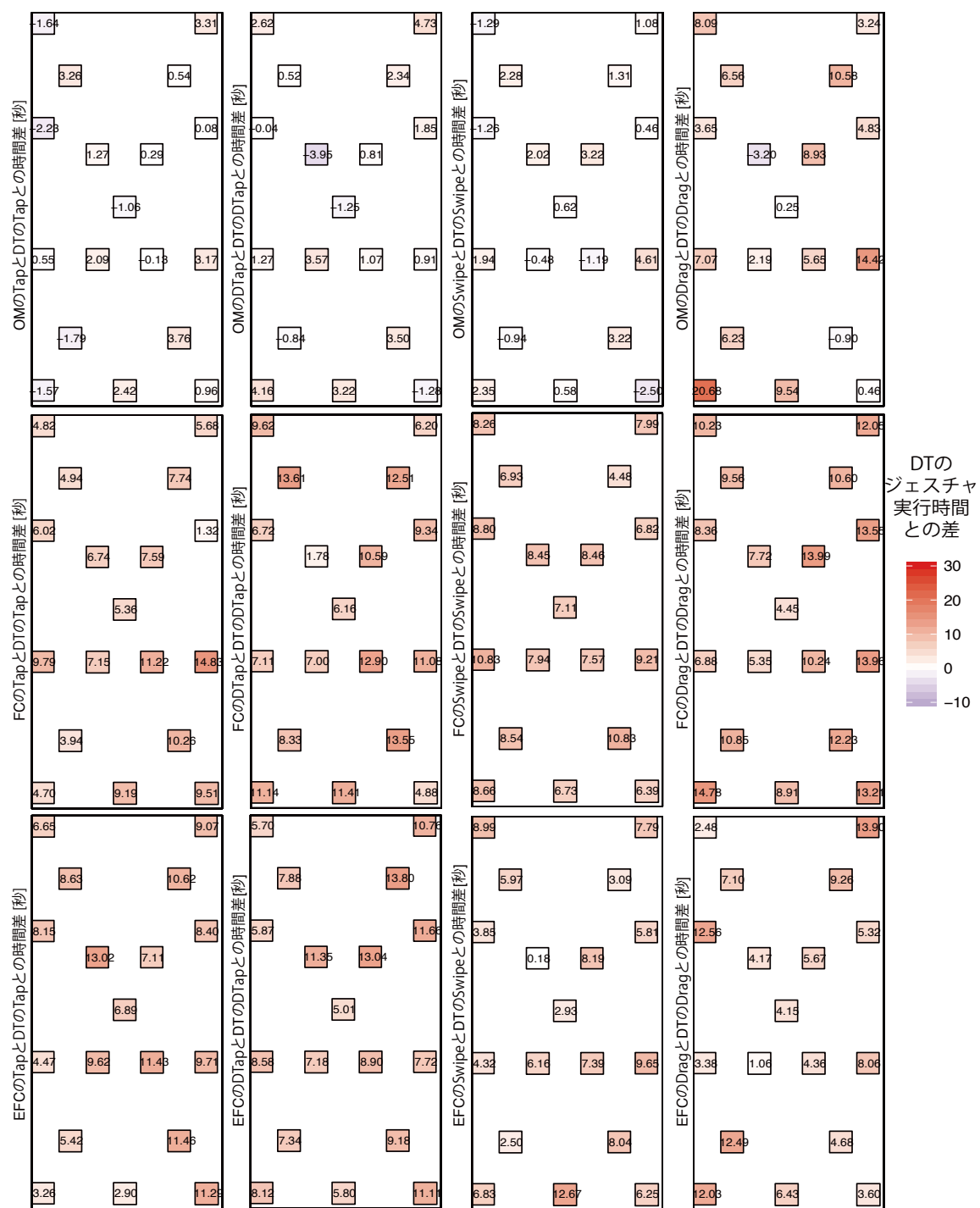


図 4.6: 手法, ジェスチャ, ターゲット毎のジェスチャ実行時間. 上段が OM と DT との時間差, 中段が FC と DT との時間差, 下段が EFC と DT との時間差である. ターゲットに書かれた数字は DT におけるそのターゲットに対するジェスチャ実行時間との差である. ターゲットが赤いほどその手法が DT よりも遅いことを表し, 青いほどその手法が DT よりも速いことを表している.

表 4.3: 独立変数毎の成功率の結果. CI は 95%信頼区間である. Group に同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している. TECHNIQUE においては, OM と FC の間にて $p < .05$, DT と FC の間にて $p < .01$, および FC と EFC の間にて $p < .001$ であった. TECHNIQUE $\times$ GESTURE においては, DT の DTap と OM の DTap, DT の Swipe と FC の DTap, DT の Drag と FC の Tap, OM の Tap と FC の DTap, OM の Tap と FC の Drag, OM の DTap と EFC の Tap, OM の DTap と EFC の Swipe, OM の Swipe と FC の Tap, FC の DTap と FC の Swipe, FC の Swipe と FC の Drag, および FC の Drag と EFC の Drag の間にて $p < .05$ であった. また, DT の Tap と DT の Drag, DT の Tap と OM の Swipe, DT の DTap と FC の Drag, DT の Swipe と OM の Drag, DT の Drag と EFC の DTap, OM の DTap と FC の Tap, OM の Swipe と EFC の DTap, FC の DTap と EFC の Drag, FC の DTap と EFC の Drag, FC の DTap と EFC の Swipe, FC の Drag と EFC の Swipe, FC の Drag と EFC の Tap であった. また, 他の組み合わせにおいては $p < .001$ であった. TECHNIQUE $\times$ SIZE においては, DT の Small と FC の Large, DT の Large と EFC の Small, OM の Large と EFC の Small, FC の Large と EFC の Large の間にて $p < .05$ であった. FC の Small と EFC の Small, EFC の Small と EFC の Large の間にて $p < .01$ であった. 他の組み合わせにおいては $p < .001$ であった.

	DT			OM			FC			EFC		
	Mean	CI	Group	Mean	CI	Group	Mean	CI	Group	Mean	CI	Group
	90.28	± 2.24	A	83.94	± 3.54	A	86.63	± 2.58	B	92.53	± 1.59	A
GESTURE												
Tap	94.79	± 3.10	E	90.62	± 5.46	C,E	93.92	± 3.34	E	92.53	± 3.61	D,E
DTap	92.01	± 3.70	D,E	82.64	± 7.54	A,C	80.56	± 5.82	A	94.62	± 2.78	E
Swipe	90.10	± 4.98	B,C,E	83.68	± 8.73	A,C,D	90.63	± 3.74	C,E	92.01	± 3.62	D,E
Drag	84.20	± 5.40	A,C,D	78.82	± 7.37	A	81.42	± 5.23	A,B	90.97	± 3.52	C,E
SIZE												
Small	85.42	± 3.23	B,C	73.35	± 4.28	A	82.81	± 4.13	B	89.50	± 2.59	C,D
Large	95.14	± 2.10	E,F	94.53	± 2.14	E,F	90.45	± 2.67	D,E	95.57	± 1.24	F

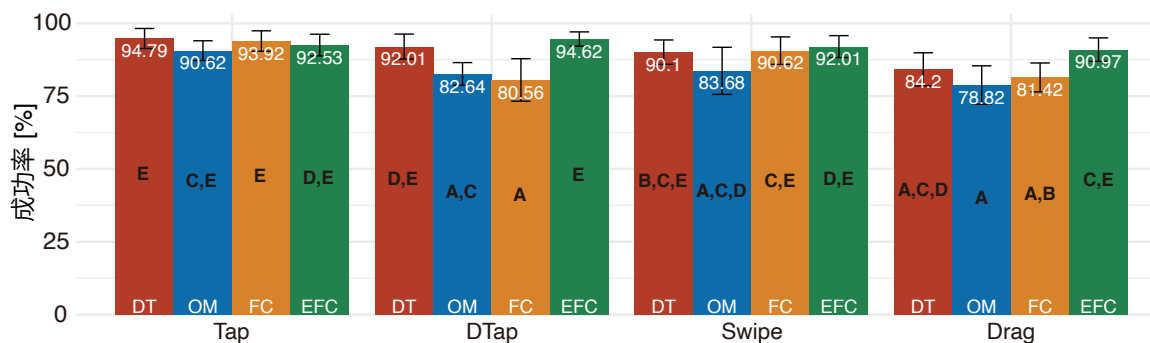


図 4.7: 手法, ジェスチャ毎の成功率. エラーバーは 95%信頼区間を表している. 同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している.

TECHNIQUE は、成功率に対する有意な主効果が存在した ($F_{3,473} = 8.24, p < .001$)。Tukey の HSD 検定も有意であり、FC と EFC の間にて $p < .001$ 、DT と FC の間にて $p < .01$ 、および OM と FC の間にて $p < .05$ であった。

TECHNIQUE $\times$ GESTURE の有意な交互作用も存在した ($F_{9,473} = 5.92, p < .001$)。図 4.7 に示すように、Tap においては、いずれの手法においても有意な差が存在しなかった。しかし、他のシングルタッチジェスチャにおいては手法間に有意な差が存在した。EFC は、いずれのジェスチャを実行するときでも、高い成功率となった。一方で、OM と FC は実行するジェスチャによって成功率に差が生じた。最も成功率が高かった EFC と比べると、OM と FC のいずれにおいても、DTap および Drag に有意な差が存在した。なお、片手操作手法を使用しなかった DT と比べると、OM と FC のいずれも DTap において有意な差が存在した。

TECHNIQUE $\times$ SIZE の有意な交互作用も存在した ($F_{3,473} = 24.62, p < .001$)。いずれの手法においても、ターゲットサイズが小さい時は、ターゲットサイズが大きい時に比べて成功率が低くなった。カーソルを用いた手法 (FC と EFC) においては、ターゲットサイズ間の成功率の差が、FC においては 7.64%、EFC においては 6.07% であった。一方で、ターゲットを直接指で触れる手法 (DT と OM) においては、ターゲットサイズ間の成功率の差が、DT においては 9.72%、OM においては 21.18% と大きくなった。この結果は、ターゲットを直接指で触れる手法が、カーソル手法と比べて fat finger 問題 [SRC05] やオクルージョンの影響を強く受けることが原因であると考えられる。

参加者毎の結果

各参加者、各手法の全ジェスチャの平均成功率の結果を図 4.8 に示す。図 4.8 に示すように、成功率の結果からも、参加者毎に手法の得意不得意が存在することがわかる。特に OM と FC は、参加者毎の成功率の差が大きくなった。4.7.1 節にて述べたように、p3 と p5 は爪が長かったため FC の操作が難しかったことを述べており、その影響で FC の成功率が低下したと考えられる。また、爪が長い場合には、指の腹に近い位置で画面をタッチする必要がある。その場合には、ユーザが意図したタッチ点と、実際にタッチ点が発生する位置間に差がでることが [XLYS12] にて示されており、それによって OM の成功率が低下したことが考えられる。

ターゲット毎の結果

各手法の各ジェスチャにおける、ターゲット毎の DT との成功率の差を図 4.9 に示す。

左下の角のターゲットに対する Drag においては、全ての手法で DT よりも成功率が高かったが、これは DT の左下のターゲットに対する成功率 (43.75%) が低かったことが原因である。FC と EFC においては、全てのジェスチャにて左下の角の成功率は DT よりも高くなった。このことから、左下の角のターゲットに対しては片手操作手法を使用しない場合にはジェスチャの実行が難しいことが示唆される。また、OM においては Tap と DTap において、左下の角のターゲットへの成功率が DT よりも低くなっていることから、親指を用いた直接選択を左下の角のターゲットに行う場合には、成功率が低くなる可能性がある。

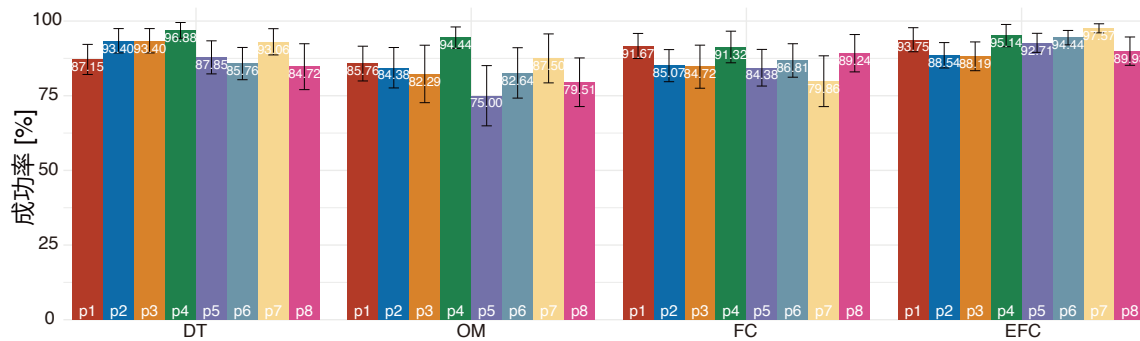


図 4.8: 各参加者，各手法の全ジェスチャの平均成功率．エラーバーは 95%信頼区間を表している．

OM の Tap, DTap, および FC の DTap においては殆どのターゲットにて，DT の成功率より低くなっている．そのため，OM や FC はターゲットに依らず成功率が低かったことがわかる．

4.7.3 加加速度

加加速度に関する検定の結果，参加者毎の結果，ターゲット毎の結果をそれぞれ示す．なお，加加速度はターゲットが表示されてから正しいジェスチャが実行されるまでの加速度から算出した．加加速度が大きいことは，実験中のスマートフォンの急激な動きが多かったことを表している．

検定の結果

独立変数毎の加加速度を表 4.4 に，手法，ジェスチャ毎の棒グラフを図 4.10 に示す．

TECHNIQUE は，加加速度に対する有意な主効果が存在した ($F_{3,9425} = 64.06, p < .001$)．Tukey の HSD 検定も OM と EFC を除く全ての手法間で有意であり，FC と EFC の間にて $p < .05$ ，他の手法間にて $p < .001$ となった．

また，TECHNIQUE $\times$ GESTURE の有意な交互作用も存在した ($F_{9,9425} = 51.91, p < .001$)．加加速度においては，Tap, DTap, Swipe にて $FC < EFC < OM < DT$ ，Drag にて $FC \simeq EFC < OM < DT$ という結果になった．

TECHNIQUE $\times$ SIZE の有意な交互作用も存在した ($F_{3,9425} = 13.44, p < .001$)．全ての手法にて，大きいサイズに対してシングルタッチジェスチャを実行した時には，小さいターゲットと比べて加加速度が小さくなるという結果になった．

FC は他の手法と比べて，実行するシングルタッチジェスチャやターゲットのサイズに依らず加加速度が小さい状態にて操作が可能であり，続いて EFC, OM, DT の順となった．この理由としては，カーソルを用いた手法は，親指が画面に触れている時間が長いことが考えら

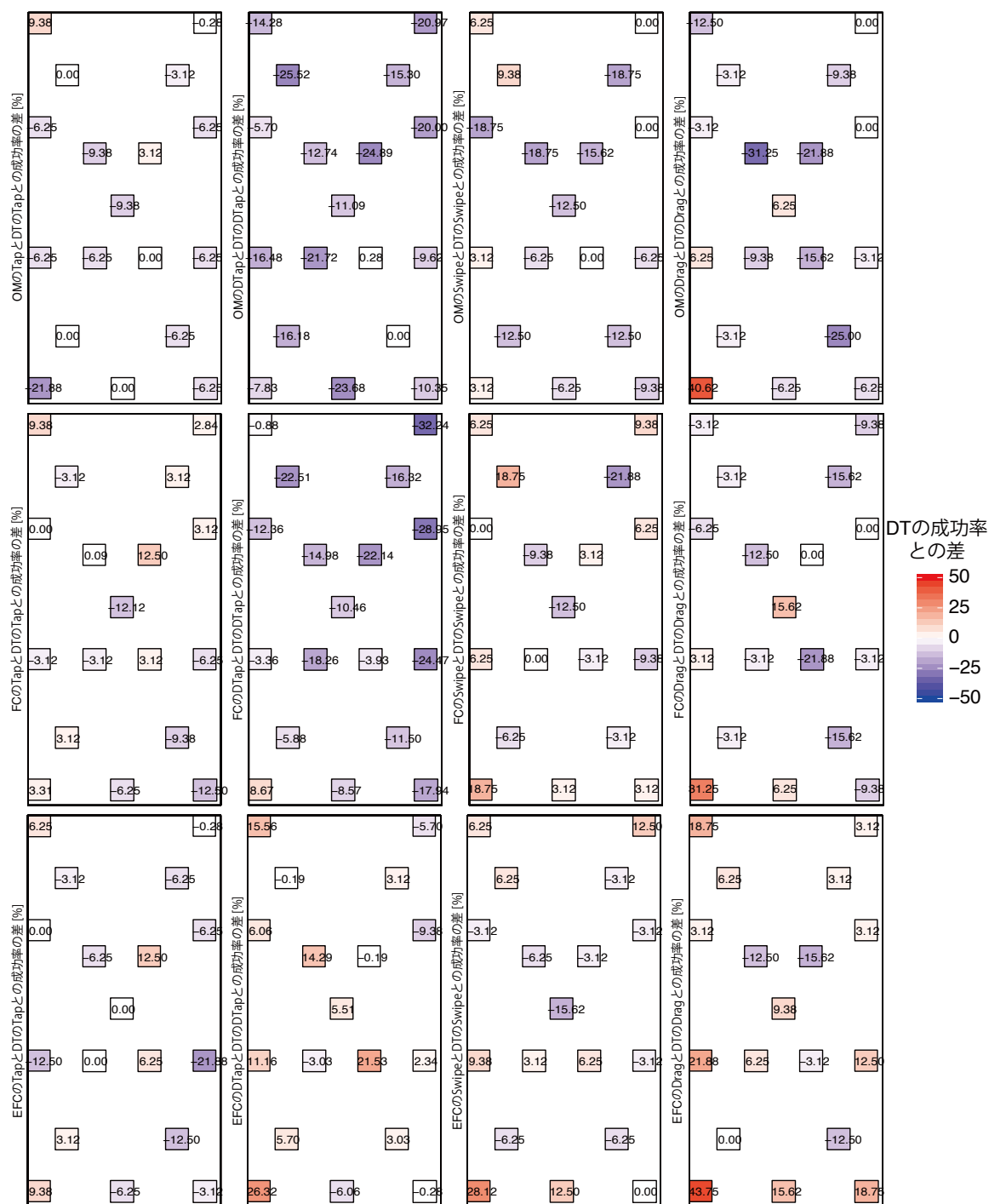


図 4.9: 手法, ジェスチャ, ターゲット毎の成功率. 上段が OM と DT との成功率の差, 中段が FC と DT との成功率の差, 下段が EFC と DT との成功率の差である. ターゲットに書かれた数字は DT におけるそのターゲットに対する成功率との差である. ターゲットが赤いほどその手法が DT よりも成功率が高いことを表し, 青いほどその手法が DT よりも成功率が低いことを表している.

表 4.4: 独立変数毎の加加速度の結果. CI は 95% 信頼区間である. Group に同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している. TECHNIQUE においては, FC と EFC 間にて $p < .05$, 他の組み合わせにて $p < .001$ であった. TECHNIQUE $\times$ GESTURE においては, OM の DTap と OM の Swipe, FC の DTap と EFC の Tap の間にて $p < .05$, FC の Drag と EFC の Swipe, EFC の Swipe と EFC の DTap の間にて $p < .01$, 他の組み合わせにて $p < .001$ であった. TECHNIQUE $\times$ SIZE においては, FC の Large と EFC の Small, EFC の Small と EFC の Large の間にて $p < .01$, 他の組み合わせにて $p < .001$ であった.

	DT			OM			FC			EFC		
	Mean	CI	Group	Mean	CI	Group	Mean	CI	Group	Mean	CI	Group
	0.46	± 0.04	C	0.29	± 0.03	B	0.17	± 0.01	A	0.21	± 0.02	B
GESTURE												
Tap	0.36	± 0.07	I	0.23	± 0.06	E, F	0.13	± 0.03	A	0.19	± 0.06	C, D
DTap	0.51	± 0.11	K	0.32	± 0.09	H	0.17	± 0.04	B	0.24	± 0.05	F
Swipe	0.53	± 0.12	K	0.34	± 0.09	I	0.18	± 0.05	B, C	0.21	± 0.06	D, E
Drag	0.45	± 0.10	J	0.27	± 0.08	G	0.19	± 0.05	B, C	0.18	± 0.06	B, C
SIZE												
Small	0.44	± 0.04	G	0.27	± 0.04	E	0.15	± 0.02	A	0.20	± 0.02	C
Large	0.49	± 0.06	H	0.32	± 0.06	F	0.18	± 0.02	B	0.22	± 0.03	D

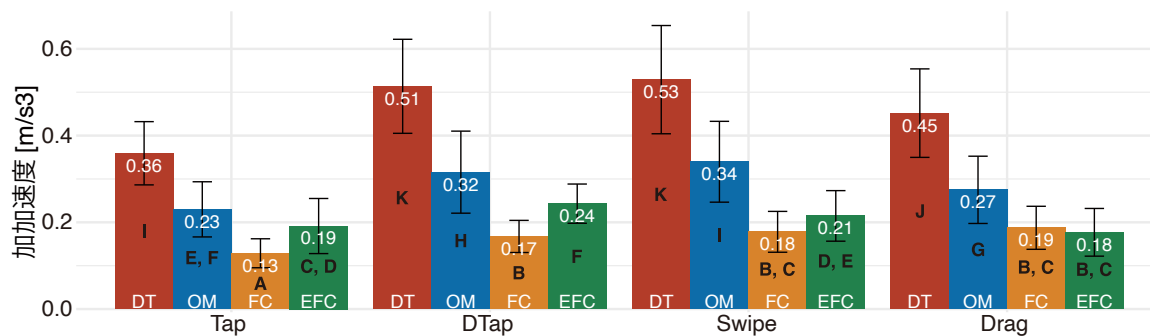


図 4.10: 手法, ジェスチャ毎の加加速度. エラーバーは 95% 信頼区間を表している. 同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している.

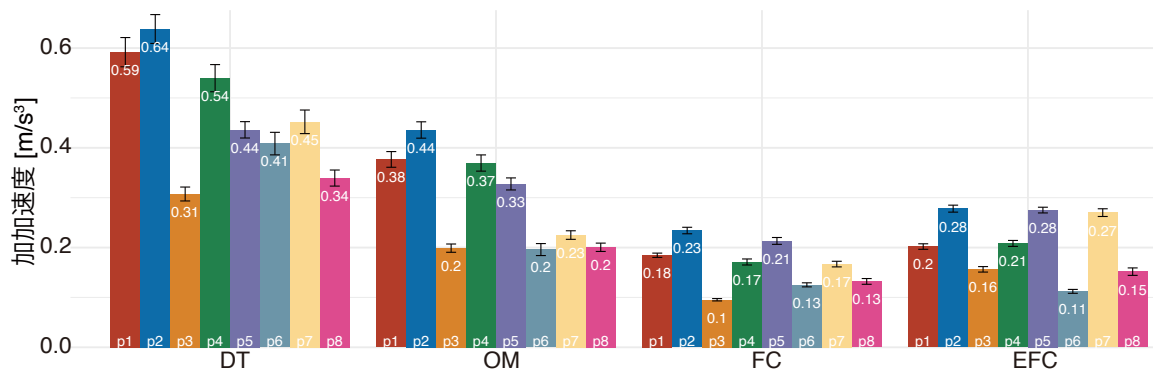


図 4.11: 各参加者, 各手法の加加速度. エラーバーは 95%信頼区間を表している.

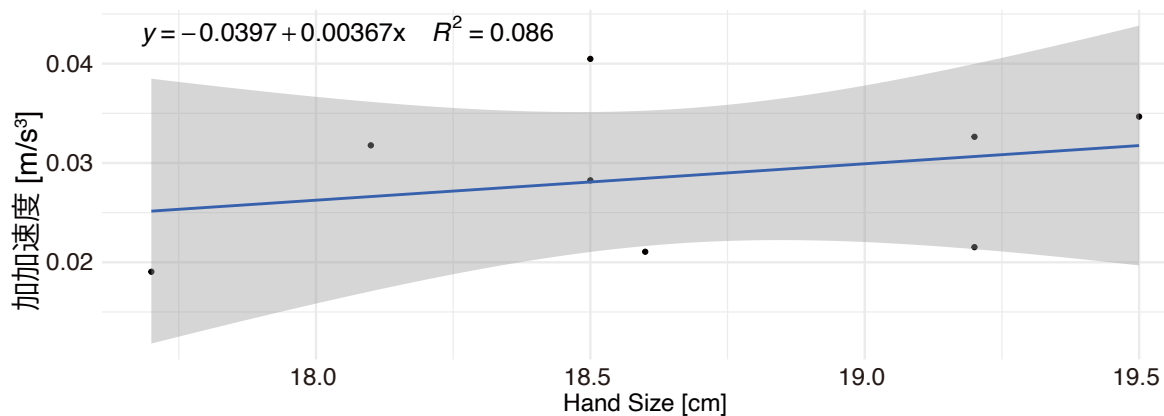


図 4.12: 手のサイズと加加速度の相関図.

れる. 特に FC においては, 常に親指を画面に触れた状態で操作が可能であるため, スマートフォンの動きが小さくなったと考えられる.

参加者毎の結果

各参加者, 各手法の結果を図 4.11 に示す. 図 4.11 に示すように, 加加速度においても参加者毎の差は大きかった. 特に p3 は, 加加速度の値が他の参加者と比べて小さかった.

p3 は唯一の女性参加者であり, また他の参加者と比べて手が小さい. 手のサイズと加加速度の相関図を図 4.12 に示す. 図 4.12 からわかるように, $R^2 = 0.086$ と, 低い値になっており, 手のサイズと加加速度の相関は無いと考えられる.

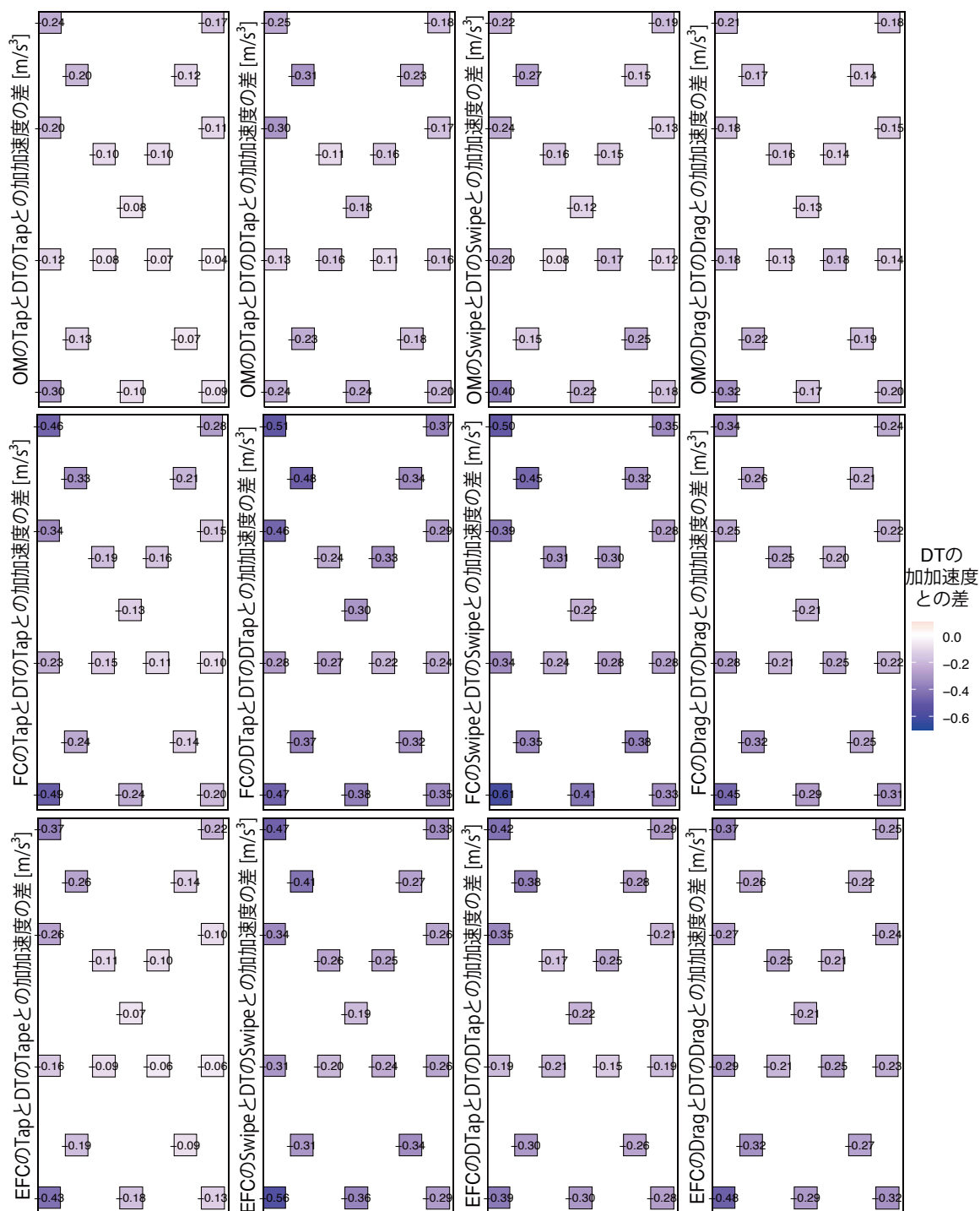


図 4.13: 手法, ジェスチャ, ターゲット毎の加加速度. 上段が OM と DT との加加速度の差, 中段が FC と DT との加加速度の差, 下段が EFC と DT との加加速度の差である. ターゲットに書かれた数字は DT におけるそのターゲットに対する加加速度との差である. ターゲットが赤いほどその手法が DT に比べて加加速度が高いことを表し, 青いほどその手法が DT よりも加加速度が低いことを表している.

表 4.5: 独立変数毎の角加速度の結果. CI は 95% 信頼区間である. Group に同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している. TECHNIQUE においては, FC と EFC 間にて $p < .05$, 他の組み合わせにて $p < .001$ であった. TECHNIQUE $\times$ GESTURE においては, DT の DTap と DT の Swipe, FC の Swipe と EFC の Swipe 間にて $p < .05$ であった. OM の DTap と OM の Drag, FC の DTap と EFC の Swipe, EFC の Tap と EFC の Drag, EFC の DTap と EFC の Swipe 間にて $p < .01$ であった. 他の組み合わせにおいては $p < .001$ であった. TECHNIQUE $\times$ SIZE においては, FC の Large と EFC の Small, EFC の Small と EFC の Large の間にて $p < .01$ であった. 他の組み合わせにおいては $p < .001$ であった.

	DT			OM			FC			EFC		
	Mean	CI	Group	Mean	CI	Group	Mean	CI	Group	Mean	CI	Group
	0.23	± 0.01	C	0.14	± 0.01	B	0.07	± 0.00	A	0.09	± 0.01	B
GESTURE												
Tap	0.18	± 0.03	I	0.11	± 0.01	E	0.06	± 0.01	A	0.08	± 0.03	C,D
DTap	0.25	± 0.04	K	0.14	± 0.03	G	0.08	± 0.01	B,C	0.10	± 0.02	E
Swipe	0.26	± 0.05	L	0.16	± 0.03	H	0.08	± 0.02	B,C	0.09	± 0.02	D
Drag	0.22	± 0.04	J	0.13	± 0.03	F	0.08	± 0.01	B,D	0.07	± 0.02	B
SIZE												
Small	0.21	± 0.02	F	0.13	± 0.01	D	0.07	± 0.01	A	0.08	± 0.01	B,C
Large	0.24	± 0.02	G	0.15	± 0.01	E	0.08	± 0.01	B	0.09	± 0.01	C

ターゲット毎の結果

各手法の各ジェスチャにおける, ターゲット毎の DT との加加速度の差を図 4.13 に示す. 図 4.13 からわかるように, 全ての手法において, ターゲットに依らず DT の加加速度より小さくなった. つまり, 片手操作手法は操作する領域に依らず, 加加速度を小さくするために有効であった. また, FC と EFC においては, 他の場所のターゲットと比べて, 左上隅と左下隅のターゲットの加加速度が DT より低くなっている. このことから, カーソルを用いた手法は, 手元から離れたターゲットを操作する場合に端末の動きを抑えることができたことがわかる.

4.7.4 角加速度

角加速度に関する検定の結果, 参加者毎の結果, ターゲット毎の結果をそれぞれ示す. なお, 角加速度はターゲットが表示されてから正しいジェスチャが実行されるまでの角加速度から算出した. 角加速度が大きいことは, スマートフォン, あるいはスマートフォンを持つ手の急激な回転が多かったことを表している.

検定の結果

独立変数ごとの角加速度を表 4.5 に, 手法, ジェスチャ毎の棒グラフを図 4.14 に示す.

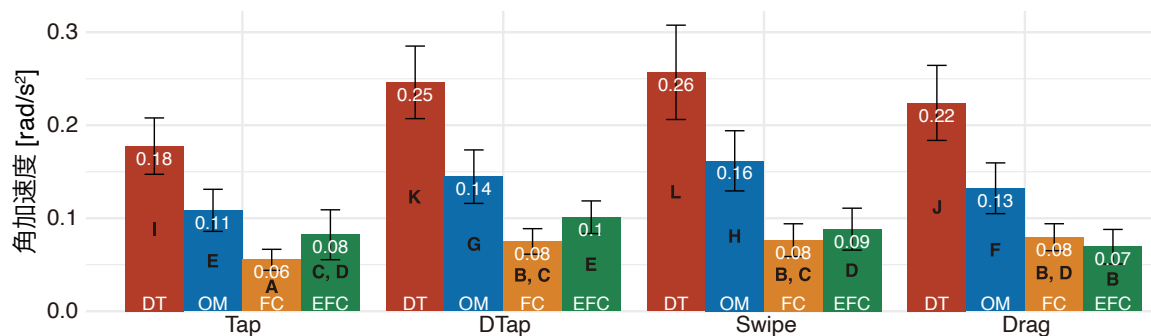


図 4.14: 手法, ジェスチャ毎の角加速度. エラーバーは 95%信頼区間を表している. 同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している.

TECHNIQUE は, 角加速度に対しても有意な主効果が存在した ($F_{3,9425} = 37.46, p < .001$). Tukey の HSD 検定も OM と EFC の間を除く手法間にて有意であり, FC と EFC 間で $p < .05$, その他の手法間で $p < .001$ であった.

TECHNIQUE $\times$ GESTURE の有意な交互作用も存在した ($F_{9,9425} = 56.12, p < .001$). 加加速度と同様に, 角加速度においても, Tap, DTap, Swipe にて $FC < EFC < OM < DT$, Drag にて $FC \approx EFC < OM < DT$ という結果になった.

TECHNIQUE $\times$ SIZE にも有意な交互作用が存在し ($F_{3,9425} = 23.79, p < .001$), 全ての手法にて, 大きいサイズに対してシングルタッチジェスチャを実行した時には, 小さいターゲットと比べて角加速度が小さくなるという結果になった.

角加速度においては, Drag を除いて $FC < EFC < OM < DT$ となり, Drag においては $EFC < FC < OM < DT$ となった. カーソルを用いた手法は, 加加速度と同様に, 角加速度も小さくなった. FC の Drag においては, ジェスチャ実行時間と成功率の結果が悪かったことから, 安定した操作ができなかったことが考えられ, その影響で EFC よりも角加速度が大きくなったと考えられる.

参加者毎の結果

各参加者, 各手法の結果を図 4.15 に示す. 図 4.11, 図 4.15 から分かるように, 加加速度が小さかった参加者は角加速度も小さくなっており, 加加速度が大きかった参加者は角加速度も大きくなった. このことは, スマートフォンを操作する際の安定度が参加者によって大きく異なることを示唆している.

ターゲット毎の結果

各手法の各ジェスチャにおける, ターゲット毎の DT との角加速度の差を図 4.16 に示す. 図 4.16 からわかるように, 角加速度においても, 全てのターゲットにおいていずれの片手操作

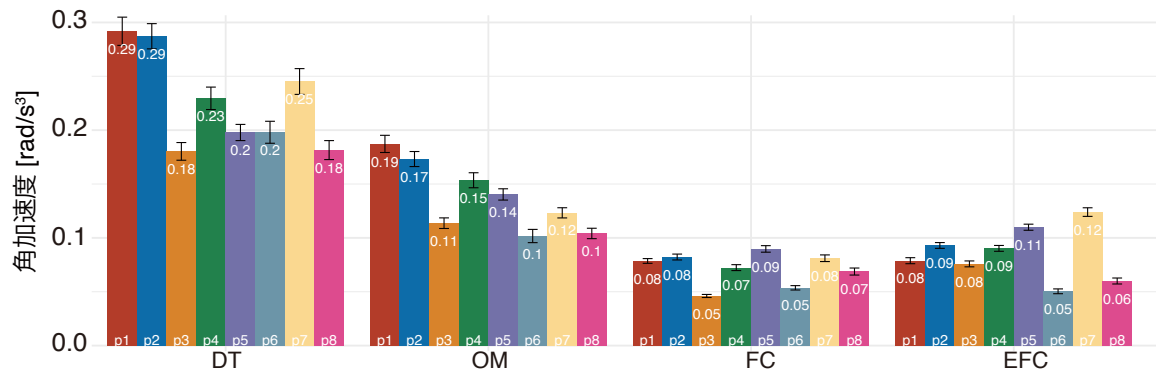


図 4.15: 参加者毎の角加速度. エラーバーは 95%信頼区間を表す.

手法を使用した場合においても、DT の角加速度より小さくなった。つまり、片手操作手法は操作する領域に依らず、角加速度を小さくするために有効であった。

また、片手操作手法を使用した場合には、他のターゲットと比べて左端のターゲットにて角加速度が小さくなっている。これは、左端のターゲットに対してジェスチャを実行する時には、DT においては手首を軸にスマートフォンを回転させながらジェスチャの実行を行う必要があるが、片手操作手法を用いるとスマートフォンを動かさずにジェスチャの実行が可能であることが影響していると考えられる。

4.7.5 SUS の得点

SUS の得点を図 4.17 に示す。ANOVA によると、TECHNIQUE は SUS の得点に対して有意な主効果が存在しなかった。

ただし、平均値では、DT が最も高く、次いで EFC, OM, FC の順になった。OM の平均値が最も高くなった理由としては、SUS の得点は慣れ親しんだ手法において高くなること [Sau11] が影響していると考えられる。DT は参加者が普段スマートフォンを利用している時の操作と同じであり、さらに本実験においては、参加者の実験端末を用いているため、平均点が高くなったと考えられる。一方、FC の SUS の得点が低くなった理由としては、参加者が押下圧を用いた操作に慣れていなかったこと、および参加者によっては FC の操作が上手くできず、ジェスチャ実行時間や成功率が低くなってしまったことが原因として考えられる。参加者の押下圧の熟練度を調査するために、4 段階リッカート尺度のアンケートを行った。質問は、「Q1: 普段押下圧を用いた操作をよく使う」「Q2: FC の押下圧の操作を慣れていると感じた」の 2 つであり、回答は 4 段階で行われた（4: 非常に同意できる, 3: 同意できる, 2: 同意できない, 1: 全く同意できない）。それぞれの参加者の回答を表 4.6 に示す。この結果から、参加者の半分は普段から押下圧の操作を用いており、彼らの全員が実験後に FC の押下圧の操作も慣れていると感じていた。ただし、FC の押下圧の操作の慣れについて、4 と回答した参加者は一人もいなかったため、長期の実験によって性能が上がる可能性が高い。一方でこの結果

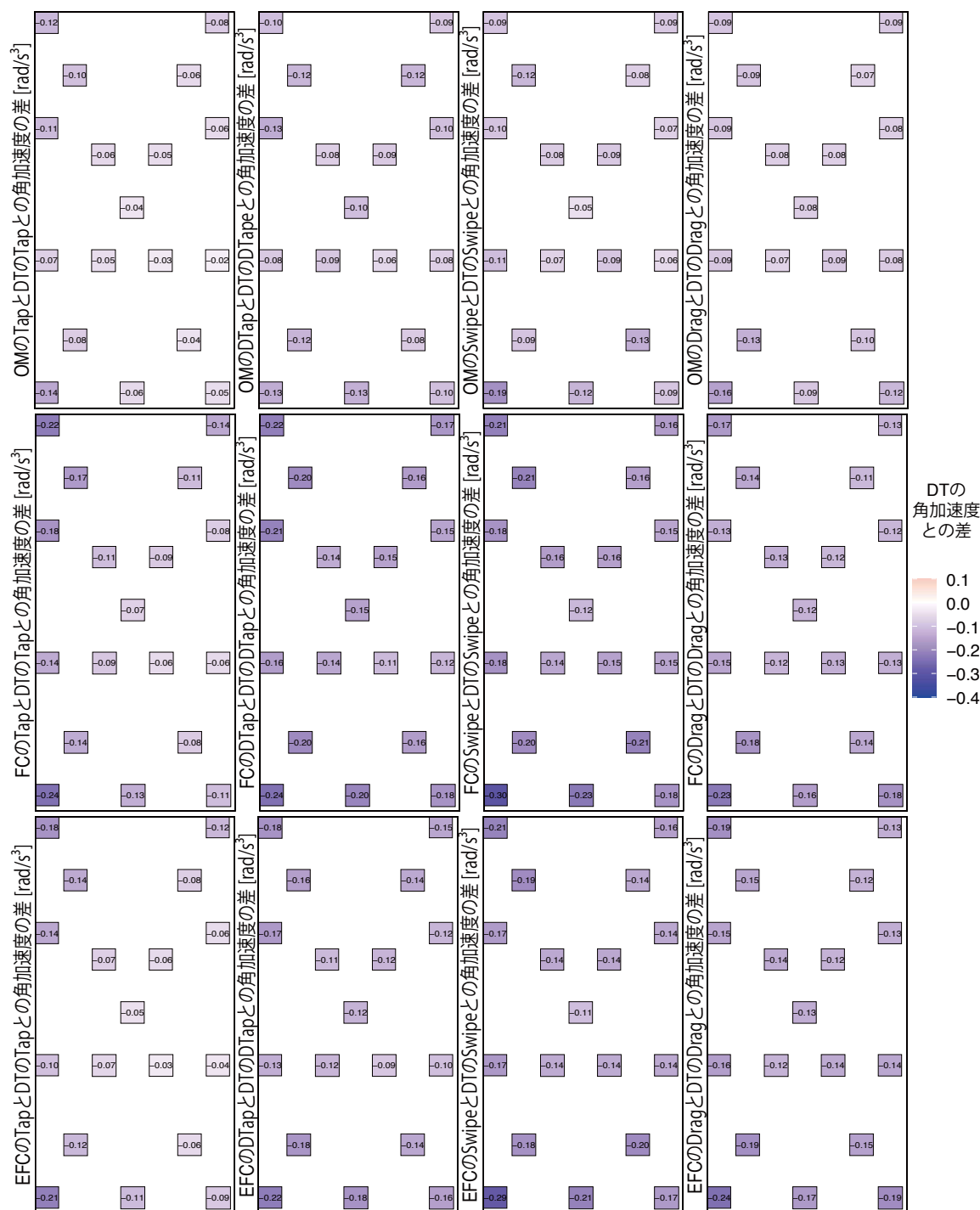


図 4.16: 手法, ジェスチャ, ターゲット毎の角加速度. 上段が OM と DT との角加速度の差, 中段が FC と DT との角加速度の差, 下段が EFC と DT との角加速度の差である. ターゲットに書かれた数字は DT におけるそのターゲットに対する角加速度との差である. ターゲットが赤いほどその手法が DT に比べて角加速度が高いことを表し, 青いほどその手法が DT よりも角加速度が低いことを表している.

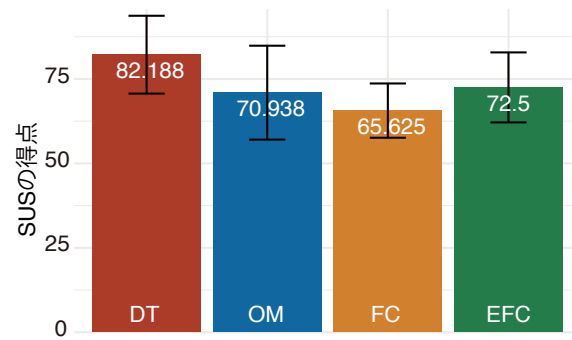


図 4.17: 各手法の SUS の得点. エラーバーは 95%信頼区間を表す.

表 4.6: 押下圧の熟練度を調査するためのアンケートの結果.

質問	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8
Q1：普段押下圧を用いた操作をよく使う	3	4	2	1	3	2	3	1
Q2：FC の押下圧の操作を慣れていると感じた	3	3	3	2	3	2	3	3

は, FC の操作に慣れるためには, 普段から押下圧を用いた操作をよく使っている, 時間がかかることを示している.

第5章 議論

本章では、実験結果から片手操作手法におけるシングルタッチジェスチャ性能調査の必要性について、各手法の特徴と最適な片手操作手法の選択方法、実験において発生したジェスチャ失敗の原因と改善方法、および各手法のトリガの実行回数による影響について議論する。

5.1 片手操作手法におけるシングルタッチジェスチャ性能調査の必要性

実験の結果から、実行するシングルタッチジェスチャによって、ジェスチャ実行時間（図 4.4）、加加速度（図 4.10）、および角加速度（図 4.14）の片手操作手法の性能は大きく変化することはなかった。結果としては、ジェスチャに依らずジェスチャ実行時間においては $DT < OM < FC \simeq EFC$ 、加加速度と角加速度においては $FC < EFC < OM < DT$ という結果になった。しかし、成功率（図 4.7）においては実行するジェスチャによって結果が大きく変化した。Tap においては、全ての手法において 90% 以上の高い成功率となった一方で、DTap においては OM にて 82.64%、FC にて 80.56%、Swipe においては OM にて 83.68%、Drag においては DT にて 84.20%、OM にて 78.82%、FC にて 81.42% と 90% を下回る成功率になった。さらに、実験の際に参加者からは、「OM を使ったドラッグが難しかった」「FC を使ったスワイプはやりやすかったが、ダブルタップは難しかった」「EFC を使ったダブルタップがやりやすかった」といった、手法とジェスチャの組み合わせで実行のしやすさが変化するというコメントが得られた。

これらの結果は、片手操作手法の性能は、実行するジェスチャによって変化するということを示唆しており、片手操作手法の性能を調査する際には、シングルタッチジェスチャの性能を調査する必要があると考えられる。

5.2 各手法の特徴と最適な片手操作手法の選択

実験の結果として、各手法にはそれぞれ特徴が見られた。本節においては、各手法の特徴と、その特徴に基づいた最適な片手操作手法の選択指標について述べる。

5.2.1 OM の特徴

4.2 OM は、表 4.3、表 4.2 に示すようにターゲットが大きい場合には比較的高い成功率と速いジェスチャ実行速度を備えた手法であった。各ジェスチャにて比較すると、Tap 以外のジェ

スチャを実行する際には、Tap の成功率 (90.62%) と比較して、成功率が低くなった。加加速度と角加速度は、DT と比べると小さくなったものの、カーソルを用いた手法と比較して大きい結果となった。また、ターゲットが小さい場合には、成功率は今回調査した手法の中で最も低くなり、かつジェスチャ実行速度も最も遅くなった。

5.2.2 FC の特徴

FC は、他の手法と比べて成功率が低く、ジェスチャ実行速度も遅い手法であった。各ジェスチャにて比較すると、FC は Tap と Swipe においては成功率が 90% よりも高く、ジェスチャ実行速度も EFC よりも速かったものの、DTap と Drag においては、成功率が 80% 程度となり、またジェスチャ実行速度も遅くなった。一方で、加加速度と角加速度は、全手法の内最も小さくなり、ユーザがスマートフォンを最も安定したまま操作が可能な手法であった。

5.2.3 EFC の特徴

EFC は、他の手法と比べて、最も成功率が高い手法であった。ただし、ジェスチャの実行速度は、FC と同程度に遅かった。また、EFC は他の手法と比べて、実行するジェスチャによる成功率や実行速度への影響が小さい手法であった。実行するジェスチャに依らず、ジェスチャ実行時間は DT や OM と比べて 1 秒程度大きくなり、また、成功率は 90% 以上と高くなった。なお、加加速度と各加速度は、FC と比べると大きいものの、DT や OM と比べて小さくなった。そのため、EFC は、ユーザがスマートフォンをある程度安定させた状態で高精度に操作が可能な手法であった。

5.2.4 最適な片手操作手法の選択

上述の各手法の特徴を考慮すると、まず OM はターゲットが大きく、またスマートフォンの動きがある程度許容できるような場面にて利用することが適していると考えられる。そのため、例えば、ユーザが座っている場合にホーム画面上の指の届かないアイコンを選択する場合には、最適な手法である。ただし、Swipe や DTap, Drag の実行が多い場合には、成功率が低くなる。

FC は、スマートフォンをより安定させたい場合に適した手法であると考えられる。そのため、カメラやビデオの撮影中に画面上のボタンを操作する時や、室外にてスマートフォンを操作しており落とした場合に破損する危険が高い場合に適した手法であると考えられる。

EFC は、他の手法と比べて、実行するジェスチャに依らず高い成功率の操作が可能な手法である。そのため、小さなボタンが並んでおり、操作に成功率が要求される場合や、Tap 以外のジェスチャを頻繁に用いる場合に最適な手法である。

しかし、実際にユーザがスマートフォンを利用する場合には、スマートフォンを利用しながら、ユーザは姿勢を変化させる、あるいはアプリケーションを変更することが考えられる。

片手操作手法の性能は、実行するジェスチャによっても変わり、ユーザの状況によって使いたい片手操作手法も変化することが考えられる。そのため、私は複数の片手操作手法を組み合わせ利用できるようにすることが重要であると考え。例えば、今回の実験結果から OM と EFC は、異なる長所を持つ片手操作手法であることが明らかとなった。OM は、ターゲットが大きい時には、スマートフォンの動きはある程度大きいものの、特に Tap は速く正確に実行が可能である。一方で EFC は、実行するジェスチャに依らず高い成功率で実行可能であり、またスマートフォンの動きも抑えることができる。そのため、OM と EFC を状況に応じて選択して利用できるようにすることで、状況に合わせた片手操作が可能になると考えられる。複数の手法を使い分ける方法としては、それぞれに別のトリガを割り当てることが考えられる。既存の手法においても、2 章に示したように様々なトリガが用いられており、異なるトリガを異なる手法に割り当てることでユーザは状況に応じて片手操作手法の選択が可能になる。

5.3 エラーの原因と改善方法

本節においては、実験の際の、それぞれの手法にて発生したエラー（ターゲット以外の場所に対するシングルタッチジェスチャの実行、あるいは異なるシングルタッチジェスチャの実行）の原因と改善するための方法について議論する。

5.3.1 DT と OM

DT と OM において、エラーは、小さなターゲットに対するポインティングの難しさが原因となって発生していた。特に OM においては、表示を縮小するため、よりターゲットは小さくなる。小さなターゲットに対して、親指を用いたポインティングを行う際には、ターゲットが親指にて隠れてしまうため正確なポインティングは難しいことがわかっている [SRC05]。また、スマートフォンを操作する指の角度によっては、ユーザが考えているタッチの位置と実際にタッチが発生した位置が大きくずれることが Xu らによって明らかにされている [XLYS12]。

そのため、DT と OM の成功率を改善するためには、小さなターゲットの選択を補助する手法 [BC09, OHOW13] や、タッチのポインティング成功率を向上させる手法 [HB10, RWSMS11] 等を組み合わせることが有効であると考えられる。

5.3.2 FC

FC において、多くの参加者から、押下圧を変化させた時に、意図せずカーソルが動いてしまいジェスチャが失敗してしまうというコメントが得られた。特に、DTap を実行する時には、参加者は素早く繰り返して押下圧の高低を変化させる必要がある。その際に、親指のタッチ点が移動してしまいカーソルがターゲットの上から移動してしまうという現象が頻繁に発生していた。さらに、参加者がカーソルを移動させている時に、意図せず押下圧を高めてしま

い意図せずカーソルの位置にタッチイベントが発生するという現象が発生していた。これらによる、エラーによって FC の成功率は他の手法と比べて低くなったと考えられる。

そのため、FC の成功率を改善するためには、カーソルの移動と押下圧の変化を分けるためのフィルタを導入することが有効な可能性がある。

5.3.3 EFC

EFC において、多くの参加者は、指を画面から離れた時にカーソルが意図せず移動してしまい、異なるターゲットに対してジェスチャを実行してしまうと述べていた。指を画面から離す瞬間にタッチ座標が意図せず変化してしまうという問題は、Xu ら [XLYS12] が調査しており、指の角度によってはタッチ座標が大きく変化することを明らかにしている。今回のカーソル手法においては、カーソルは常に指の移動距離の 3 倍の距離を移動するため、この問題の影響を強く受けたと考えられる。

そのため、EFC の成功率を改善するためには、指が画面から離れる直前のカーソルの移動を抑制する機能の実装や、Corsten ら [CVB17] が押下圧の調整タスクにて行ったように、指が画面から離れる直前の状態に戻す機能を実装することが有効であると考えられる。

5.4 各手法のトリガの実行回数による影響

今回行った実験においては、全てのジェスチャ実行が実験の手法 (DT, OM, FC, あるいは EFC) を用いて行われた。しかし、各手法にてユーザがトリガを実行するタイミングは異なる。OM は、一度トリガを実行した後、再びトリガを実行するまでは手法を使い続けられる、すなわち表示を縮小させ続けられる手法である。また、FC は一度トリガを実行した後、ユーザが指を画面から離すまで手法を使い続けられる手法である。一方で EFC は、ジェスチャを実行するたびにトリガを実行し直す必要がある。そのため、本実験の結果は、トリガの実行回数による影響を受けていると考えられる。

トリガの実行回数による影響を調査するために、本節においては、トリガが 1 度以上実行された試行のみを抽出した時の、ジェスチャ実行時間 (ターゲットが表示されてから正しいジェスチャが実行されるまでの時間)、成功率 (トリガが 1 度以上実行された試行数のうち、エラーが 1 度もなかった割合)、加加速度 (ターゲットが表示されてから正しいジェスチャが実行されるまでの加加速度)、角加速度 (ターゲットが表示されてから正しいジェスチャが実行されるまでの角加速度) の結果の分析を行う。

ジェスチャ実行時間の結果を表 5.2、図 5.1、成功率の結果を表 5.3、図 5.2、加加速度の結果を表 5.4、図 5.3、角加速度の結果を表 5.5、図 5.4 に示す。これらの結果からわかるように、トリガが一度以上実行された試行においては、ジェスチャ実行時間は $EFC \simeq FC \simeq OM$ であり、成功率は $OM \simeq FC \simeq EFC$ 、加加速度は $FC < EFC < OM$ であり、角加速度は $FC < EFC < OM$ であった。つまり、トリガが一度以上実行された試行においては、EFC は速く正確な手法であり、OM は速度、成功率、端末の安定度の全ての項目で他の手法よりも性能が悪く

表 5.1: トリガが 1 度以上実行された試行数とその試行の平均順番 (1 – 18) .

手法	トリガが 1 度以上実行された試行数	平均順番
OM	142	1.8
FC	791	8.8
EFC	2304	9.5

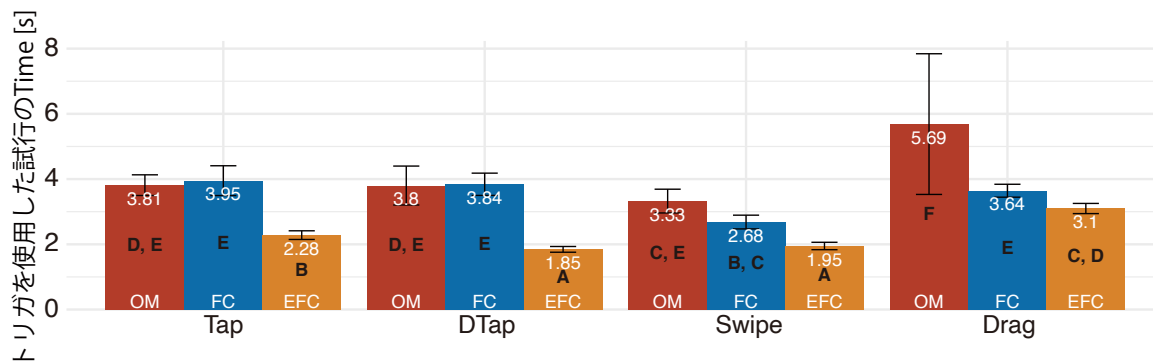


図 5.1: トリガが 1 度以上実行された試行のジェスチャ実行時間. エラーバーは 95%信頼区間を表す. 同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在する.

なった. そのため, ユーザがトリガを頻繁に使用する場合, OM の性能が悪くなり, 最適な手法は EFC であると考えられる.

この結果の正当性を調査するために, トリガが 1 度以上実行された試行数, およびトリガが 1 度以上実行された試行の順番 (1–18) を調査した. 結果を表 5.1 に示す. なお, EFC は全ての試行にてトリガが実行されているため, トリガの実行回数は 2,304 回 (18 ターゲット $\times$ 4 ジェスチャ $\times$ 2 ターゲットサイズ $\times$ 2 繰り返し $\times$ 8 参加者) であり, 平均順番は 9.5 となっている. 表 5.1 から分かるように, OM においては, 参加者は最初のターゲットにてトリガを実行した後, OM を起動した状態 (つまり, 表示を縮小させた状態) にて最後までタスクを行っていた傾向があった. ただし, 実際の OM の使用環境においては, 例えば小さなターゲット (ナビゲーションバーのボタン) を選択する時や, 文字入力を行う時に毎回トリガを実行し, 表示を元の大きさに戻すことが考えられる. そのため, 今回の実験に比べて OM のトリガ実行頻度は高くなると考えられる.

よって, 実際のスマートフォンの使用環境においては, 図 5.1, 図 5.2 に示すように EFC が最適な手法となる可能性がある.

表 5.2: トリガが一度以上実行された試行における独立変数毎のジェスチャ実行時間の結果. CI は 95%信頼区間である. Group に同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している. TECHNIQUE においては, OM と EFC の間にて $p < .01$ であった. TECHNIQUE $\times$ GESTURE においては, OM の Tap と FC の Swipe, OM の DTap と FC の Tap, OM の Swipe と EFC の Tap, EFC の Tap と EFC の Swipe の間にて $p < .05$ であった. FC の Tap と EFC の Drag の間にて $p < .01$ であった. その他の組み合わせにおいては $p < .001$ であった. TECHNIQUE $\times$ SIZE においては, OM の Small と FC の Small, OM の Large と FC の Large, FC の Large と EFC の Small の間にて $p < .05$ であった. OM の Small と OM の Large の間にて $p < .01$ であった. その他の組み合わせにおいては $p < .001$ であった.

	OM			FC			EFC		
	Mean	CI	Group	Mean	CI	Group	Mean	CI	Group
	4.18	± 0.57	B	3.49	± 0.14	A, B	2.29	± 0.07	A
GESTURE									
Tap	3.81	± 0.32	D, E	3.95	± 0.46	E	2.28	± 0.13	B
DTap	3.80	± 0.60	D, E	3.84	± 0.34	E	1.85	± 0.09	A
Swipe	3.33	± 0.36	C, E	2.68	± 0.21	B, C	1.95	± 0.11	A
Drag	5.69	± 2.16	F	3.64	± 0.20	E	3.10	± 0.16	C, D
SIZE									
Small	4.61	± 1.06	B	3.99	± 0.21	D	2.60	± 0.10	E
Large	3.67	± 0.37	D	2.88	± 0.14	C	1.99	± 0.08	D

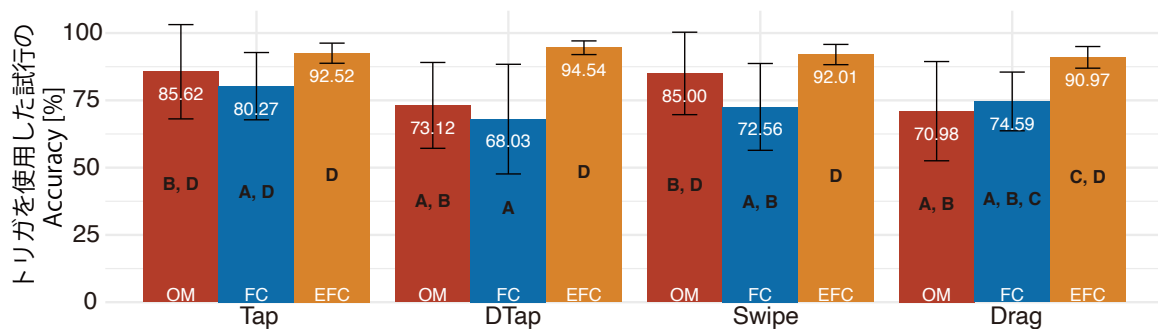


図 5.2: トリガが1 度以上実行された試行の成功率. エラーバーは参加者間の 95%信頼区間を表す. 同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在する.

表 5.3: トリガが一度以上実行された試行における独立変数毎の成功率の結果. CI は 95%信頼区間である. Group に同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している. TECHNIQUE においては, FC と EFC の間においては $p < .05$ であった. OM と EFC の間においては $p < .01$ であった. TECHNIQUE $\times$ GESTURE においては, OM の Tap と FC の DTap, OM の DTap と EFC の Drag, OM の Swipe と FC の DTap, OM の DTap と EFC の Swipe, FC の Swipe と EFC の Drag, FC の Drag と EFC の Swipe, FC の Drag と EFC の Tap 間にて $p < .05$ であった. OM の DTap と EFC の Tap, OM の DTap と EFC の DTap, OM の Drag と EFC の Tap, OM の Drag と EFC の Swipe, OM の Drag と EFC の Drag, FC の Swipe と EFC の DTap, FC の Swipe と EFC の DTap, FC の Swipe と EFC の Swipe, FC の Swipe と EFC の Tap, FC の Drag と EFC の DTap 間にて $p < .01$ であった. その他の組み合わせでは, $p < .001$ であった. TECHNIQUE $\times$ SIZE においては, OM の Small と EFC の Small, OM の Small と EFC の Large, OM の Large と EFC の Small, OM の Large と EFC の Large の間にて $p < .01$ であった. その他の組み合わせにおいては $p < .001$ であった.

	OM			FC			EFC		
	Mean	CI	Group	Mean	CI	Group	Mean	CI	Group
	78.68	± 2.47	B	73.86	± 2.19	A, B	92.51	± 0.52	A
GESTURE									
Tap	85.63	± 4.93	D, E	80.27	± 3.52	B, D, E	92.52	± 1.05	E
DTap	73.13	± 4.49	A, D	68.03	± 5.74	A	94.54	± 0.72	E
Swipe	85.00	± 4.32	C, D, E	72.56	± 4.54	A, B, C	92.01	± 1.06	E
Drag	70.98	± 5.19	A, B	74.59	± 3.07	A, D	90.97	± 1.13	E
SIZE									
Small	69.53	± 5.60	A	74.00	± 3.84	A	89.48	± 1.25	B
Large	89.58	± 3.92	B	76.58	± 3.77	A	95.57	± 0.60	B

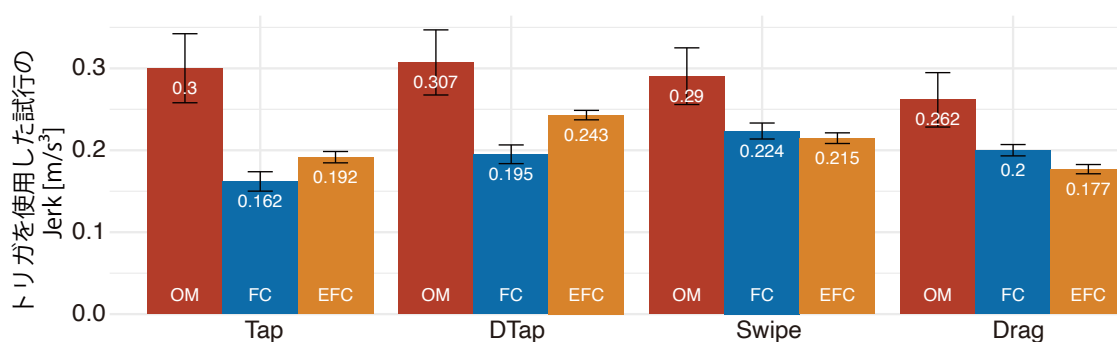


図 5.3: トリガが1度以上実行された試行の加加速度. エラーバーは 95%信頼区間を表す. 同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在する.

表 5.4: トリガが一度以上実行された試行における独立変数毎の加加速度の結果。CI は参加者間の 95% 信頼区間である。Group に同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している。TECHNIQUE においては、FC と EFC の間にて $p < .05$ であった。OM と FC、OM と EFC の間にて $p < .001$ であった。TECHNIQUE $\times$ GESTURE においては、OM の DTap と OM の Drag、FC の Swipe と FC の Drag の間にて $p < .05$ であった。FC の Drag と EFC の Drag の間にて $p < .01$ であった。その他の組み合わせにおいては $p < .001$ であった。TECHNIQUE $\times$ SIZE においては、FC の Large と EFC の Large の間にて $p < .05$ であった。その他の組み合わせにおいては $p < .001$ であった。

	OM			FC			EFC		
	Mean	CI	Group	Mean	CI	Group	Mean	CI	Group
	0.29	± 0.02	C	0.20	± 0.00	B	0.20	± 0.00	A
GESTURE									
Tap	0.30	± 0.04	E, F	0.16	± 0.01	A	0.19	± 0.01	B
DTap	0.31	± 0.04	F	0.20	± 0.01	B, C	0.24	± 0.01	D
Swipe	0.29	± 0.03	F	0.22	± 0.01	B, C	0.21	± 0.01	C
Drag	0.26	± 0.03	E	0.20	± 0.01	B	0.18	± 0.01	A
SIZE									
Small	0.26	± 0.02	D	0.18	± 0.01	A	0.20	± 0.00	B
Large	0.33	± 0.03	E	0.22	± 0.01	B	0.22	± 0.00	C

表 5.5: トリガが一度以上実行された試行における独立変数毎の角加速度の結果。CI は 95% 信頼区間である。Group に同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在している。TECHNIQUE においては、全ての組み合わせにおいて $p < .001$ であった。TECHNIQUE $\times$ GESTURE においては、OM の DTap と OM の Drag、OM の Swipe と OM の Drag の間にて $p < .05$ であった。FC の Drag と EFC の Swipe、EFC の Tap と EFC の Swipe の間にて $p < .01$ であった。その他の組み合わせにおいては $p < .001$ であった。TECHNIQUE $\times$ SIZE においては、全ての組み合わせにおいて $p < .001$ であった。

	OM			FC			EFC		
	Mean	CI	Group	Mean	CI	Group	Mean	CI	Group
	0.14	± 0.01	C	0.09	± 0.00	B	0.09	± 0.00	A
GESTURE									
Tap	0.14	± 0.02	E, F	0.07	± 0.01	A	0.08	± 0.00	B
DTap	0.14	± 0.01	F	0.09	± 0.00	B, C	0.10	± 0.00	D
Swipe	0.14	± 0.02	F	0.09	± 0.00	B, C	0.09	± 0.00	C
Drag	0.12	± 0.02	E	0.09	± 0.00	B	0.07	± 0.00	A
SIZE									
Small	0.12	± 0.01	D	0.08	± 0.00	A	0.08	± 0.00	B
Large	0.16	± 0.01	E	0.10	± 0.00	C	0.09	± 0.00	C

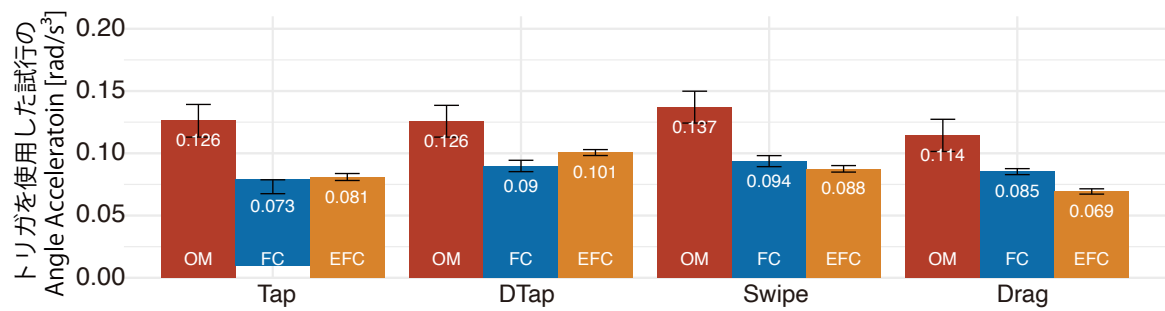


図 5.4: トリガが1度以上実行された試行の角加速度. エラーバーは95%信頼区間を表す. 同じ文字を共有していない組み合わせには有意な差が存在する.

第6章 実験結果の考察限界

本章においては、今回の実験において考察できないことについて述べ、片手操作手法の性能をより明らかにするために今後必要となる調査について述べる。

6.1 実験参加者の属性の偏りと実験参加者数

今回行った実験においては、参加者の全員が若く、またスマートフォンの利用になれていた。しかし、スマートフォンのユーザは、子供から老人、初心者から熟練者まで幅広く存在している。先行研究は、老人は若者に比べて力の細かな制御が苦手であること [KF96]、さらに小さなターゲットに対して親指を用いたポインティングの性能が低下すること [KHM⁺11, XM16] を明らかにしている。このことから、年齢は片手操作手法の性能に影響を与える可能性が高い。特に、FC の操作時には押下圧を用いる必要があり、また OM の操作時にはより小さなターゲットのポインティングが必要となるため、年齢の影響が大きな可能性がある。

加えて、今回行った実験の参加者は 8 人と少ない。そのため、各片手操作手法の性能を正確に把握するためには、様々な属性を持つ参加者を増やして追加の実験を行う必要がある。

6.2 異なる状態でのスマートフォンの利用

今回行った実験においては、参加者は常に椅子に座った状態にてタスクを行った。しかし、スマートフォンは椅子に座った状態で利用する以外にも、歩いている状態、電車に乗っている状態、あるいは横向きに寝た姿勢においても利用される。先行研究は、歩いている状態においては親指を用いたポインティング性能が低下 [NBW14] し、更に押下圧の分解能が低下 [WBH⁺11] することを明らかにしている。加えて、Eardley ら [ERGT17] および Ikematsu ら [IOES20] は、スマートフォンの安定度がユーザの姿勢によって変化することを述べている。このことから、スマートフォンを利用するユーザの状態は、片手操作手法の性能に影響を与えることが示唆される。OM においては、ターゲットが他の手法に比べてより小さくなるため、歩いている状態におけるポインティング性能の低下や、寝ている状態におけるスマートフォンの安定度の低下の影響を強く受ける可能性がある。また、FC においては、歩行時に押下圧の分解能が低下する影響を強く受ける可能性がある。ただし、FC においてはユーザが調整する必要がある押下圧のレベルは 2 段階のみであり、歩行時にも性能が変化しない可能性がある。これらのことから、様々なユーザの状態にて片手操作手法の性能を調査する必要がある。

6.3 片手操作手法の熟練度

今回の実験において、各参加者は練習を含めて、各手法にて各ジェスチャを 108 回実行した。しかし、より多くの試行を行うことによって、ユーザはその片手操作手法を熟練し、性能が変化する可能性がある。特に、Corsten らは、押下圧を用いた手法においては、練習を重ねることによって性能が向上することを明らかにしており [CVLB18]、性能を正確に把握するためには長期実験を行う必要性を示している。今回の実験においては、FC は、スマートフォンの安定度は高かったものの、ジェスチャ実行速度や成功率、ユーザビリティの主観評価の結果において他の手法より劣っていた。しかし、長期間の練習を設けることで、FC の性能は変化する可能性がある。また、他の手法においても、ユーザが熟練することによって、よりジェスチャ実行速度や成功率が向上することが考えられるため、長期実験を行い、片手操作手法の性能を調査する必要がある。

6.4 実アプリケーションによる利用

今回の実験におけるタスクは、画面全体に配置されたターゲットへのジェスチャ実行であった。また、ジェスチャの実行は、全て手法を用いて行われ、同じジェスチャの実行を連続して行った。しかし、実際にユーザがスマートフォンを利用している状態では、複数のジェスチャを交互に実行することや、手法を用いたジェスチャ実行と手法を用いないジェスチャ実行を組み合わせる操作を行うことが考えられる。そのため、今回の実験にて調査した性能とは異なる可能性がある。

特に、OM においては、ユーザが手法を利用している間は表示が縮小され、見づらくなる。そのため、ユーザはジェスチャを実行するたびに元のサイズに戻すことが考えられるため、ジェスチャ実行時間が遅くなる可能性がある。また、OM と FC においては、連続した手法の使用が可能であったが、EFC は連続した手法の使用が不可能である。今回の実験タスクにおいては、連続して手法を利用するため EFC のジェスチャ実行時間が遅くなったが、実利用環境においては、手法を用いたジェスチャ実行と手法を用いないジェスチャ実行を組み合わせる用いることが考えられるため、他の手法とのジェスチャ実行速度の差が縮まる可能性がある。

6.5 カーソルの移動方法

FC と EFC においては、カーソルの移動方法として、ユーザが指を移動した時にその指の移動方向と同方向に 3 倍の距離を移動するという方法を用いている。しかし、他のカーソルの移動方法を使用することによって性能が向上する可能性がある。[VHCR20] においては、顔の向きと指の移動を組み合わせたカーソルの移動方法を用いることによって性能が向上したことを示している。そのため、FC と EFC の性能を向上させるために、様々なカーソルの移動方法にて性能を調査する必要がある。

第7章 結論

本論文において、指の届かないターゲットに対して全てのシングルタッチジェスチャの実行を可能とする片手操作手法として Force Cursor (FC) と Event Forward Cursor (EFC) の設計を行った。FC は、押下圧を用いてカーソルの位置にタッチイベントを発生させる手法であり、ユーザが押下圧を高めることでタッチダウンイベントが、押下圧を低めることでタッチアップイベントがカーソルの位置に発生する。一方で EFC は、タッチイベントを発生させる位置の決定とジェスチャの実行を二段階の操作に分けた手法であり、カーソルモードを起動した後、指を画面から離すとカーソルの位置が固定され、その後画面上の任意の位置でタッチジェスチャを実行するとカーソルの位置にジェスチャが転送される。これらの手法は、既存のカーソルを用いた手法とは異なり、ユーザが自由にタッチイベント（タッチダウンイベント、タッチムーブイベント、およびタッチアップイベント）をカーソルの位置に発生させられるため、シングルタッチジェスチャの実行が可能である。

また、本論文においては、片手操作手法のシングルタッチジェスチャ性能を調査するために、実験を行った。調査した手法は、片手操作手法を用いない DT、既存の手法のうち全てのシングルタッチジェスチャの実行が可能である画面を縮小する手法 (OM)、および設計した2つの手法 (FC と EFC) である。実験の結果、OM と FC はタップ以外のジェスチャを実行する時のジェスチャ実行時間や成功率の性能が低下した。対して EFC はいずれのジェスチャを実行するときにも高い成功率であった。なお、EFC は OM や FC と比べてジェスチャの実行時間が長かったが、トリガが一度以上実行された試行のみを抽出した場合には、OM や FC よりもジェスチャ実行時間が短くなり、トリガが頻繁に実行される場合には最適な手法である可能性を示した。

さらに、本論文においては、それぞれの片手操作手法の特徴から適した手法の選択指標について述べた。OM は、大きなターゲットに対してタップを行う場合には、最も速く正確な手法であり、FC はスマートフォンを安定させたまま操作したい場合には適した手法であり、EFC は実行するジェスチャに依らず正確なジェスチャ実行が可能な手法である。

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、川口一画先生には多くのご意見とご指導を頂きました。特に、志築文太郎先生には、常日頃より、手法の内容、実験設計、論文の執筆手法、発表のやり方といった研究の事のみならず、日常生活における研究者の心構えなど多くの事をご指導頂きました。研究について、配属当時は右も左もわからない状態から始まったにも関わらず、熱心なご指導のおかげで、いくつかの研究成果を出すことができました。重ねて感謝致します。

インタラクティブプログラミング研究室の後輩達、同期、先輩方には様々な面において多くのご助言を頂きました。特に WAVE チームの皆様にはチームゼミにおけるご意見だけでなく、研究室にて相談に乗っていただき多くのご意見、アドバイスを頂きました。苦勞することもありましたが、3年間の研究生活を十分に楽しめたのは、研究室の方々のおかげです。深く感謝致します。

学生生活の多くの面において私を支えてくださった友人達、大学生活にてお世話になった皆様に感謝申し上げます。研究を行うにあたって、多くの実験を行ってきましたが、実験の参加者を集めることは友人たちの協力なくしては達成できませんでした。深く感謝致します。

また、私を育て、様々な面において私を支えてくださった両親に深く感謝致します。私が勉強、研究に没頭できたのは、両親が支えてくれたおかげです。最後に、忙しい日々の中、毎日私を笑顔にしてくれた婚約者、坂越雛さんに感謝致します。

参考文献

- [App14] Apple Inc. Reachability - iPhone User Guide, 2014. <https://help.apple.com/iphone/11/?lang=en#/iph66e10a71c>. (accessed 2020-01-13).
- [App19] Apple Inc. Force Touch - Apple Developer, 2019. <https://developer.apple.com/macos/force-touch/>. (accessed 2020-01-13).
- [App20a] Apple Inc. 3D Touch - User Interaction - iOS - Human Interface Guidelines - Apple Developer, 2020. <https://developer.apple.com/design/human-interface-guidelines/ios/user-interaction/3d-touch/>. (accessed 2020-01-13).
- [App20b] Apple Inc. Gestures - User Interaction - iOS - Human Interface Guidelines - Apple Developer, 2020. <https://developer.apple.com/design/human-interface-guidelines/ios/user-interaction/gestures/>. (accessed 2020-01-13).
- [App20c] Apple Inc. TestFlight - Apple Developer, 2020. <https://developer.apple.com/testflight/>. (accessed 2020-01-13).
- [BC09] Patrick Baudisch and Gerry Chu. Back-of-device interaction allows creating very small touch devices. In *Proceedings of the 2009 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '09, pp. 1923–1932, New York, NY, USA, 2009. 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 2014 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 1991–2000, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [Bro96] John Brooke. SUS-a quick and dirty usability scale. In P.W. Jordan, B. Thomas, B. A. Weerdmeester, & A.L. McClelland (Eds.). *Usability Evaluation in Industry*, 1996.
- [CIS07] Jared Cechanowicz, Pourang Irani, and Sriram Subramanian. Augmenting the mouse with pressure sensitive input. In *Proceedings of the 2007 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '07, pp. 1385–1394, New York, NY, USA, 2007. 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. 212:1–212:12, 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 2015 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 1499–1508, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [CVB17] Christian Corsten, Simon Voelker, and Jan Borchers. Release, don't wait! reliable force input confirmation with quick release. In *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '17, pp. 246–251, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [CVLB18] Christian Corsten, Simon Voelker, Andreas Link, and Jan Borchers. Use the Force Picker, luke: Space-efficient value input on force-sensitive mobile touchscreens. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 661:1–661:12, New York, NY, USA, 2018. 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, pp. 202:1–202:8, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [HB10] Christian Holz and Patrick Baudisch. The generalized perceived input point model and how to double touch accuracy by extracting fingerprints. In *Proceedings of the 2010 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '10, pp. 581–590, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.
- [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, 2016. Asia Digital Art and Design Association.

- [HIS19] Kyohei Hakka, Toshiya Isomoto, and Buntarou Shizuki. One-handed interaction technique for single-touch gesture input on large smartphones. In *Symposium on Spatial User Interaction*, SUI '19, pp. 21:1–21:2, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [HKAI16] Khalad Hasan, Junhyeok Kim, David Ahlström, and Pourang Irani. Thumbs-Up: 3d spatial thumb-reachable space for one-handed thumb interaction on smartphones. In *Proceedings of the 2016 Symposium on Spatial User Interaction*, SUI '16, pp. 103–106, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [HL11] Seongkook Heo and Geehyuk Lee. Force Gestures: Augmenting touch screen gestures with normal and tangential forces. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '11, pp. 621–626, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [HL12] Seongkook Heo and Geehyuk Lee. ForceDrag: Using pressure as a touch input modifier. In *Proceedings of the 24th Australian Computer-Human Interaction Conference*, OzCHI '12, pp. 204–207, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [HRY19] Inseok Hwang, Eric Rozner, and Chungkuk Yoo. Telekinetic thumb summons out-of-reach touch interface beneath your thumbtip (demo). 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.
- [IOES20] Kaori Ikematsu, Haruna Oshima, Rachel Eardley, and Itiro Siio. Investigating how smartphone movement is affected by lying down body posture. *Proceedings of ACM Human Computer Interaction*, Vol. 4, No. 192, p. 17, November 2020.
- [ITY20] Kaori Ikematsu, Kota Tsubouchi, and Shota Yamanaka. PredicTaps: Latency reduction technique for single-taps based on recognition for single-tap or double-tap. In *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '20, pp. 1–9, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [KB06] Amy K. Karlson and Benjamin B. Bederson. Studies in one-handed mobile design: Habit, desire and agility. Technical report, Proceedings of the 4th ERCIM Workshop on User Interfaces for All (UI4ALL '98), 10 pages, 2006.
- [KF96] Hiroshi Kinoshita and Peter R. Francis. A Comparison of Prehension Force Control in Young and Elderly Individuals. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, Vol. 74, No. 5, pp. 450–460, November 1996. Springer.

- [KHM⁺11] Masatomo Kobayashi, Atsushi Hiyama, Takahiro Miura, Chieko Asakawa, Michitaka Hirose, and Tohru Ifukube. Elderly user evaluation of mobile touchscreen interactions. In *Proceedings of the 13th IFIP TC 13 International Conference on Human-Computer Interaction - Volume Part I*, INTERACT'11, pp. 83–99, Berlin, Heidelberg, 2011. Springer-Verlag.
- [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. 27:1–27:10, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [LCR07] Edward Lank, Yi-Chun Nikko Cheng, and Jaime Ruiz. Endpoint prediction using motion kinematics. In *Proceedings of the 2007 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '07, pp. 637–646, New York, NY, USA, 2007. Association for Computing Machinery.
- [LFK16] Andy Li, Hongbo Fu, and Zhu Kening. BezelCursor: Bezel-initiated cursor for one-handed target acquisition on mobile touch screens. *International Journal of Mobile Human Computer Interaction*, Vol. 8, pp. 1–22, 2016. IGI Global.
- [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, pp. 17:1–17:4, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [LKB⁺18] Huy Viet Le, Thomas Kosch, Patrick Bader, Sven Mayer, and Niels Henze. Palm-Touch: Using the palm as an additional input modality on commodity smartphones. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 360:1–360:13, 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. 31:1–31:12, 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, 2015. IEEE.
- [MTKJ⁺05] Sachi Mizobuchi, Shinya Terasaki, Turo Keski-Jaskari, Jari Nousiainen, Matti Ryyanen, and Miika Silfverberg. Making an Impression: Force-controlled Pen Input for Handheld Devices. In *CHI '05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '05, pp. 1661–1664, New York, NY, USA, 2005. Association for Computing Machinery.
- [NBW14] Alexander Ng, Stephen A. Brewster, and John H. Williamson. Investigating the effects of encumbrance on one- and two- handed interactions with mobile devices. In *Proceedings of the 2014 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 1981–1990, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [Nel15] R. Kevin Nelson. Exploring Apple’s 3D touch, 2015. <https://medium.com/@rknl1a/exploring-apple-s-3d-touch-f5980ef45af5>. (accessed 2020-01-13).
- [OHOW13] Stephen Oney, Chris Harrison, Amy Ogan, and Jason Wiese. ZoomBoard: A diminutive qwerty soft keyboard using iterative zooming for ultra-small devices. In *Proceedings of the 2013 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, pp. 2799–2802, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [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 2009 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '09, pp. 1523–1526, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery.
- [RWSMS11] Simon Rogers, John Williamson, Craig Stewart, and Roderick Murray-Smith. AnglePose: Robust, precise capacitive touch tracking via 3d orientation estimation. In *Proceedings of the 2011 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pp. 2575–2584, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.

- [Sam19] Samsung Inc. How Do I Use the Reduce Screen Size of One-Handed Operation on Note4 Samsung Support HK_EN, 2019. <https://www.samsung.com/au/support/mobile-devices/one-hand-mode/>. (accessed 2020-01-13).
- [Sau11] Jeff Sauro. SUSstified little-known system usability scale facts user experience magazine, 2011. <http://uxpamagazine.org/sustified/>. (accessed 2020-01-13).
- [SAX⁺16] Qingkun Su, Oscar Kin-Chung Au, Pengfei Xu, Hongbo Fu, and Chiew-Lan Tai. 2D-Dragger: Unified touch-based target acquisition with constant effective width. In *Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '16, pp. 170–179, New York, NY, USA, 2016. 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.
- [SS91] Andrew Sears and Ben Shneiderman. High precision touchscreens: Design strategies and comparisons with a mouse. *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 34, No. 4, pp. 593–613, April 1991.
- [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*, MobileHCI '16, pp. 651–658, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [VHCR20] Simon Voelker, Sebastian Hueber, Christian Corsten, and Christian Remy. Head-Reach: 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.
- [WBH⁺11] Graham Wilson, Stephen A. Brewster, Martin Halvey, Andrew Crossan, and Craig Stewart. The effects of walking, feedback and control method on pressure-based interaction. In *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '11, pp. 147–156, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [WSB10] Graham Wilson, Craig Stewart, and Stephen A. Brewster. Pressure-based menu selection for mobile devices. In *Proceedings of the 12th International Conference on*

Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services, MobileHCI '10, pp. 181–190, New York, NY, USA, 2010. 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.
- [XM16] Jinghong Xiong and Satoshi Muraki. Thumb performance of elderly users on smartphone touchscreen. *SpringerPlus*, Vol. 5, 10 pages, No. 1218, December 2016. Springer.
- [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.
- [YLP⁺17] Sangeon Yong, Edward Jangwon Lee, Roshan Peiris, Liwei Chan, and Juhan Nam. ForceClicks: Enabling efficient button interaction with single finger touch. In *Proceedings of the Eleventh International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '17, pp. 489–493, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [YYJ15] Hyunjin Yoo, Jungwon Yoon, and Hyunsoo Ji. Index Finger Zone: Study on touchable area expandability using thumb and index finger. In *Proceedings of the 17th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services Adjunct*, MobileHCI '15, pp. 803–810, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [ZF13] Hao Zhao and Hao Feng. A novel angular acceleration sensor based on the electromagnetic induction principle and investigation of its calibration tests. *Sensors*, Vol. 13, No. 8, pp. 10370–10385, Aug 2013. MDPI.
- [大西 14] 大西主紗, 志築文太郎, 田中二郎. TouchOver: 大画面を備える携帯情報端末を楽に操作するための片手親指操作手法. 第 22 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 2014), WISS2014, pp. 85–90. 日本ソフトウェア科学会, 2014.

著者論文リスト

本論文に関する論文および発表

- 査読付き国際会議論文

1. Kyohei Hakka, Toshiya Isomoto, Buntarou Shizuki. One-Handed Interaction Technique for Single-Touch Gesture Input on Large Smartphones. Proceedings of the ACM Spatial User Interaction 2019 (SUI 2019), 2 pages, ACM, New York, NY, USA, New Orleans, USA, October 2019.
2. Kyohei Hakka, Toshiyuki Ando, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. Pressure-Based One-Handed Interaction Technique for Large Smartphones Using Cursor. Proceedings of the 2019 ACM CHI symposia on ASIAN CHI SYMPOSIUM: EMERGING HCI RESEARCH COLLECTION (Asian CHI Symposium 2019), 8 pages, ACM, New York, NY, USA, Glasgow, UK, May 2019.

- 査読付き国内会議論文

1. 八箇恭平, 志築文太郎, 高橋伸. 大画面スマートフォンの片手操作を可能にする押下圧およびタッチ面積を用いた操作手法. 第 26 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 (WISS2018), 2 pages, 日本ソフトウェア科学会, 山梨, 日本.
2. 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. 第 24 回一般社団法人情報処理学会シンポジウム (インタラクシオン 2020), pp. 48–57, 情報処理学会, 2020 年 3 月.

- 査読無し国内会議論文

1. 八箇恭平, 志築文太郎. 大形スマートフォンの片手操作のためのカーソル設計に関する調査. 報処理学会研究報告, Vol.2018-HCI-180, 8 pages, 情報処理学会, 兵庫, 2018 年 12 月.

その他の論文および特許

- 査読あり国際会議論文

1. Kyohei Hakka, Toshiya Isomoto, Buntarou Shizuki, Shin Takahashi. Bounded Swipe: Swipe Gesture Inside a Target. Proceedings of the 30th Australian Conference on Computer-Human Interaction (OzCHI 2019), pp. 312–316, ACM, New York, NY, USA, Perth/Fremantle, Australia, December 2019.
2. Rei Takakura, Kyohei Hakka, Buntarou Shizuki. Exploration of Passive Haptics Based Learning Support Method for Touch Typing. Proceedings of the 30th Australian Conference on Computer-Human Interaction (OzCHI 2019), pp. 529–533, ACM, New York, NY, USA, Perth/Fremantle, Australia, December 2019.

- 査読付き国内論文誌論文

1. 八箇恭平, 磯本俊弥, 志築文太郎, 高橋伸. ターゲット内に両端が存在するスワイプジェスチャの設計と評価. 日本ソフトウェア科学会論文誌, コンピュータソフトウェア. pp. 50–63, Vol. 37, No. 4, November 2020.

- 査読あり国内会議論文

1. 八箇恭平, 磯本俊弥, 志築文太郎. ターゲット内に両端が存在するスワイプジェスチャ. 第 27 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 2019), pp. 61–66, 日本ソフトウェア科学会, 長野, 2019 年 9 月.

- 査読なし国内会議論文

1. 小林孝基, 八箇恭平, 船越南斗, 志築文太郎. 指にてなぞることにより入力可能な単一結線識別子の検討. 情報処理学会第 81 回全国大会, 情報処理学会, 2 pages, 福岡, 2019 年 3 月.

付 録 A 実験の際に用いた各種書類

本研究における実験にて用いた、実験同意書、実験計画書、ビデオ画像の公開についての承諾書・承諾変更書を以下に示す。さらに、実験に用いた記入済みの事前アンケートの用紙、および日本語に翻訳した System Usability Scale のアンケートおよびその回答も合わせて示す。

A.1 実験同意書

同 意 書

筑波大学システム情報系長 殿

私は、「課題名：タッチパネル搭載端末に対する操作手法の評価」について、研究概要、方法、研究対象者の必要性、研究対象者に対するリスクと安全性、研究に参加する上で想定される危険の回避、ビデオ録画を含めた個人情報の保護について十分な説明を受けました。

説明の際、本研究に協力することに同意しなくても何ら不利益を受けないこと、さらに、同意後も私自身の自由意思により不利益を受けず、参加の同意を撤回できることも理解しました。また、研究や実験の終了後であっても、枠下に指定の期日迄であれば、データ提供の同意を撤回できることも理解しました。私は、このことを理解した上で研究対象者になることに同意します。

平成 年 月 日

氏 名 (署名)

「課題名：タッチパネル搭載端末に対する操作手法の評価」の研究について、次の内容について平成 年 月 日に説明を行い、上記のとおり同意を得ました。

実施責任者 所 属

氏 名 (署名又記名押印)

データ提供の同意撤回の期限は同意書署名の日から30日後までとさせていただきます。

研究や実験に協力した結果、不都合があった場合の連絡先

実施分担者 (所属： 氏名：)

(実施分担者が学生の場合、研究室の電話番号を記入してください。)

実施責任者 (所属：筑波大学 システム情報系 氏名：志築文太郎 TEL：029-853-5520)

筑波大学 システム情報系 研究倫理委員会 事務局

(システム情報エリア支援室 TEL：029-853-4989)

(裏面)

① 研究の概要について

私たちはスマートフォンやタブレット端末などのタッチパネルを搭載した端末に対する操作手法を開発し、その手法の性能や使用感の調査を行っています。操作手法は、タッチ、スワイプまたはドラッグといったジェスチャ入力に応用することによって、タッチパネル搭載端末の操作性の向上を狙って提案されたものです。

拘束時間

実験の1日当たりの所要時間は、休憩やアンケートの記入も含めて最大120分程度となります。

謝金の対応

実験協力者には、実験へ参加した時間に対する報酬として、筑波大学の謝金規定に基づいた時給(820円)を支払います。報酬の支給方法は口座振り込みまたはアマゾンギフト券等の提供とします。実験を途中で止めた場合も、実験協力者が実験に参加した時間から時給を算出し、支払うこととします。

研究等を行う期間

研究倫理委員会承認後 ～ 2024年 3月31日

② 研究対象者の必要性、研究への参加におけるリスクと安全性、危険回避の方法について

私たちが設計・開発したシステムによってスマートフォンやタブレットへ意図した操作が可能かどうか、そして、その使い勝手はどうかを知る必要があります。そのために、この実験では、設計・開発中のシステムを実験協力者に使用していただき、その後アンケートにご回答頂きます。回答したくない項目に関しては空欄としてください。

本実験の参加は、任意であり、参加に同意しないことによる影響は一切ありません。また、実験協力者が与えたインフォームド・コンセントについて、いつでも不利益を受けることなく撤回することができます。

本実験で用いるタッチパネル端末は、ハードウェア改造を施していない市販品のため、安全上の問題はありません。また、タッチパネル端末は実験開始前に株式会社コーヨー化成製「NB 天然アルコール除菌ウェットタオル」にて拭くことにより除菌し、実験協力者に清潔な状態にて提供します。その他実験に伴う必然的な心身上の苦痛及び不快な状態として、長時間の実験による拘束、及びそこから生じる疲労が考えられます。但し、ご協力いただいた時間の対価として謝金を支払い、実験中は十分な休憩を取られるようにして、それぞれ最大限の配慮を致します。

研究成果公表の際、実験協力者から得られたビデオ画像以外のデータは個人を特定できないように加工して使用させていただきます。ビデオ画像に関してはビデオ画像の公開についての承諾書の内容に従います。

研究に関する問い合わせは同意書署名欄下部に記載された連絡先(志築文太郎准教授)までお願いいたします。

③ 個人情報の保護について

- ☐ 実験中に、写真やビデオの撮影を行う場合がありますが、これらは実験の様子を記録するために行います。その写真やビデオを発表において利用する場合は、実験協力者の確認を得た上で、研究目的においてのみ利用いたします。
- ☐ 実験への参加は、協力者の自由意思によるものであり、実験への参加を随時拒否・撤回することができます。
- ☐ 学会・論文などでデータを発表する際は、データおよびそれを統計的に処理したものだけを用います。実験参加者を表現するためには、記号・数字を用います。個人を特定できる情報は公表しません。ただし、実験参加者全体については、性別の実験参加者数、年齢の範囲、所属を公表することがあります。
- ☐ 実験において得たデータは全て暗号化された状態で論文発表後 10 年間保存されます。暗号化に用いられるパスワードは本研究に関わる研究者のみが知っているものを使います。なお、さらに安全を期すため、データに個人名が入ることはありません。個人名が記入された書類は研究期間の終了後シュレッダーにて粉碎されます。
- ☐ 上記以外のいかなる場合においても実験協力者のプライバシーは保全されます。

A.2 回答済み事前アンケート

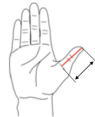
実験に関する事前アンケート (P1)

文責：八箇 恭平

1. 年齢, 性別, 利き手を教えてください

年齢: 21 歳, 性別: 男, 利き手: 右 ,

2. 親指（親指根本の皺から先端）と手（手首の皺から先端）のサイズを測定してください



親指: 70 mm



手: 195 mm

3. 普段スマートフォンの画面を操作する際に, 最も用いる手を教えてください

(例: 右手, 左手, 両手など)

(右手)

4. 使用しているスマートフォンの機種を教えてください.

(例: iPhone8, Xperia XZ1)

機種名: iPhone XS

5. 今までのスマートフォンの利用歴はどのくらいですか?

6 年 4 ヶ月

6. スマートフォンを片手で操作しづらいと感じたことがある

ある

実験者使用欄

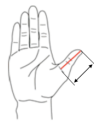
実験に関する事前アンケート (P2)

文責：八箇 恭平

1. 年齢, 性別, 利き手を教えてください

年齢: 22 歳, 性別: 男, 利き手: 右 ,

2. 親指 (親指根本の皺から先端) と手 (手首の皺から先端) のサイズを測定してください



親指: 60 mm



手: 185 mm

3. 普段スマートフォンの画面を操作する際に, 最も用いる手を教えてください

(例: 右手, 左手, 両手など)

(右手)

4. 使用しているスマートフォンの機種を教えてください.

(例: iPhone8, Xperia XZ1)

機種名: iPhone XS

5. 今までのスマートフォンの利用歴はどのくらいですか?

7 年 5 ヶ月

6. スマートフォンを片手で操作しづらいと感じたことがある

ある

実験者使用欄

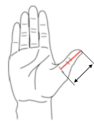
実験に関する事前アンケート (P3)

文責：八箇 恭平

1. 年齢, 性別, 利き手を教えてください

年齢: 21 歳, 性別: 女, 利き手: 左 ,

2. 親指 (親指根本の皺から先端) と手 (手首の皺から先端) のサイズを測定してください



親指: 57 mm



手: 177 mm

3. 普段スマートフォンの画面を操作する際に, 最も用いる手を教えてください

(例: 右手, 左手, 両手など)

(右手)

4. 使用しているスマートフォンの機種を教えてください.

(例: iPhone8, Xperia XZ1)

機種名: iPhone 7

5. 今までのスマートフォンの利用歴はどのくらいですか?

9 年 4 ヶ月

6. スマートフォンを片手で操作しづらいと感じたことがある

ある

実験者使用欄

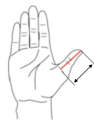
実験に関する事前アンケート (P4)

文責：八箇 恭平

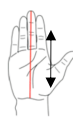
1. 年齢, 性別, 利き手を教えてください

年齢: 24 歳, 性別: 男, 利き手: 右 ,

2. 親指 (親指根本の皺から先端) と手 (手首の皺から先端) のサイズを測定してください



親指: 67 mm



手: 192 mm

3. 普段スマートフォンの画面を操作する際に, 最も用いる手を教えてください

(例: 右手, 左手, 両手など)

(右手)

4. 使用しているスマートフォンの機種を教えてください.

(例: iPhone8, Xperia XZ1)

機種名: iPhone X

5. 今までのスマートフォンの利用歴はどのくらいですか?

8 年 5 ヶ月

6. スマートフォンを片手で操作しづらいと感じたことがある

ある

実験者使用欄

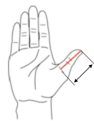
実験に関する事前アンケート (P5)

文責：八箇 恭平

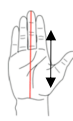
1. 年齢, 性別, 利き手を教えてください

年齢： 22 歳, 性別： 男 , 利き手： 右 ,

2. 親指（親指根本の皺から先端）と手（手首の皺から先端）のサイズを測定してください



親指： 60 mm



手： 181 mm

3. 普段スマートフォンの画面を操作する際に, 最も用いる手を教えてください

(例：右手, 左手, 両手など)

(右手)

4. 使用しているスマートフォンの機種を教えてください.

(例：iPhone8, Xperia XZ1)

機種名： iPhone 6s

5. 今までのスマートフォンの利用歴はどのくらいですか？

6 年 4 ヶ月

6. スマートフォンを片手で操作しづらいと感じたことがある

ある

実験者使用欄

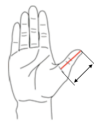
実験に関する事前アンケート (P6)

文責：八箇 恭平

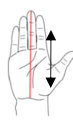
1. 年齢, 性別, 利き手を教えてください

年齢: 23 歳, 性別: 男, 利き手: 右 ,

2. 親指 (親指根本の皺から先端) と手 (手首の皺から先端) のサイズを測定してください



親指: 56 mm



手: 192 mm

3. 普段スマートフォンの画面を操作する際に, 最も用いる手を教えてください

(例: 右手, 左手, 両手など)

(右手)

4. 使用しているスマートフォンの機種を教えてください.

(例: iPhone8, Xperia XZ1)

機種名: iPhone XS

5. 今までのスマートフォンの利用歴はどのくらいですか?

7 年 5 ヶ月

6. スマートフォンを片手で操作しづらいと感じたことがある

ある

実験者使用欄

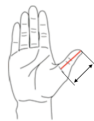
実験に関する事前アンケート (P7)

文責：八箇 恭平

1. 年齢, 性別, 利き手を教えてください

年齢: 23 歳, 性別: 男, 利き手: 右 ,

2. 親指 (親指根本の皺から先端) と手 (手首の皺から先端) のサイズを測定してください



親指: 65 mm



手: 185 mm

3. 普段スマートフォンの画面を操作する際に, 最も用いる手を教えてください

(例: 右手, 左手, 両手など)

(右手)

4. 使用しているスマートフォンの機種を教えてください.

(例: iPhone8, Xperia XZ1)

機種名: iPhone 8

5. 今までのスマートフォンの利用歴はどのくらいですか?

7 年 6 ヶ月

6. スマートフォンを片手で操作しづらいと感じたことがある

ある

実験者使用欄

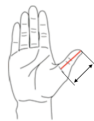
実験に関する事前アンケート (P8)

文責：八箇 恭平

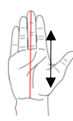
1. 年齢, 性別, 利き手を教えてください

年齢: 23 歳, 性別: 男, 利き手: 右 ,

2. 親指 (親指根本の皺から先端) と手 (手首の皺から先端) のサイズを測定してください



親指: 64 mm



手: 186 mm

3. 普段スマートフォンの画面を操作する際に, 最も用いる手を教えてください

(例: 右手, 左手, 両手など)

(右手)

4. 使用しているスマートフォンの機種を教えてください.

(例: iPhone8, Xperia XZ1)

機種名: iPhone 7

5. 今までのスマートフォンの利用歴はどのくらいですか?

8 年 0 ヶ月

6. スマートフォンを片手で操作しづらいと感じたことがある

ある (あまりない)

実験者使用欄

A.3 日本語に翻訳された System Usability Scale

System Usability Scale

1. このシステムをしばしば使いたいと思う
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
2. このシステムは不必要なほど複雑であると感じた
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
3. このシステムは容易に使えると思った
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
4. このシステムを使うのに技術専門家のサポートが必要とするかもしれない
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
5. このシステムにあるさまざまな機能がよくまとまっていると感じた
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
6. このシステムでは、一貫性のないところが多くあったとおもった
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
7. たいていのユーザは、このシステムの仕様方法について、素早く学べるだろう
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
8. このシステムはとても扱いにくいと思った
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
9. このシステムを使うのに自信があったと感じた
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
10. このシステムを使い始める前に多くのことを学ぶ必要があった
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)

A.4 System Usability Scale の回答

参加者	手法	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10
p1	DT	5	4	3	5	4	5	1	2	2	5
p1	OM	2	4	2	5	2	4	1	3	4	5
p1	FC	2	3	2	4	2	4	2	4	2	2
p1	EFC	2	4	2	4	2	4	2	4	1	2
p2	DT	4	1	5	1	4	1	5	3	3	1
p2	OM	4	1	5	1	4	1	5	2	4	1
p2	FC	2	4	4	2	4	2	4	3	4	2
p2	EFC	2	2	2	2	4	1	1	4	2	2
p3	DT	3	1	3	1	4	1	5	3	4	1
p3	OM	3	2	3	4	4	1	4	4	2	3
p3	FC	4	3	3	2	4	1	3	3	3	2
p3	EFC	4	2	4	2	4	1	4	2	4	1
p4	DT	4	1	5	1	4	1	5	3	3	1
p4	OM	4	1	5	1	4	1	5	2	4	1
p4	FC	2	4	4	2	4	2	4	3	4	2
p4	EFC	2	2	2	2	4	1	1	4	2	2
p5	DT	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1
p5	OM	1	2	4	2	2	2	5	2	1	1
p5	FC	2	2	4	2	4	2	4	2	2	2
p5	EFC	3	2	4	2	4	2	4	2	2	2
p6	DT	2	5	1	5	2	4	1	5	1	5
p6	OM	2	5	1	5	2	4	2	4	2	4
p6	FC	2	5	1	5	2	4	1	5	1	5
p6	EFC	1	4	1	4	2	4	2	4	2	4
p7	DT	5	1	5	1	5	1	5	1	4	1
p7	OM	2	1	3	1	4	1	5	2	3	1
p7	FC	1	2	1	2	2	1	4	4	1	1
p7	EFC	4	3	4	1	2	2	4	2	3	1
p8	DT	4	2	3	2	3	2	4	2	3	1
p8	OM	1	2	2	4	2	2	4	4	2	2
p8	FC	4	2	4	2	4	2	2	2	4	2
p8	EFC	4	2	4	4	4	2	4	3	4	2