

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

腕に装着した超小型タッチパネル端末に対する
傾け操作の特性調査

大西 主紗

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

2016年3月

概要

端末に対する傾け操作，すなわち，端末そのものに対する傾けを入力とする操作についての研究が数多くなされるようになった．傾け操作は小さい端末の入力語彙を拡張する手法として有用性が示されており，手首用ウェアラブルデバイスの入力語彙拡張にも有用であると考えられる．本研究は腕に装着した超小型タッチパネル端末に対する傾け操作の特性を調査するため，傾け操作によって位置が決定されるカーソルを用いてポインティング実験を行った．その結果から，目的の角度に腕を傾ける際のずれがどのように分布するか，そしてターゲットの位置や大きさが操作にかかる時間にどのような影響を及ぼすかを調査した．結果，傾け操作の精度は 0.20° であり，ターゲットの大きさが操作時間に影響を与えることが判明した．またこれらの実験から得られた知見を元に傾け操作の設計指針を示し，適用例として文字入力手法の実装およびその性能評価を行った．結果，文字入力速度は 5.4WPM であった．

目次

第1章	はじめに	1
1.1	目的およびアプローチ	2
1.2	本研究の貢献	2
1.3	本論文の構成	2
第2章	関連研究	3
2.1	傾け操作の適用例	3
2.1.1	超小型の画面を持つ端末に対する傾け操作	3
2.1.2	携帯情報端末に対する傾け操作	3
2.1.3	大型の情報端末に対する傾け操作	4
2.2	傾け操作の性能調査	4
2.2.1	傾け操作による位置決定および移動速度決定の比較	5
2.2.2	傾け操作を位置決定に用いた研究	5
2.2.3	傾け操作を移動速度決定に用いた研究	6
2.3	スマートウォッチ上における文字入力手法	6
第3章	予備実験	7
3.1	実験設計	7
3.1.1	被験者	7
3.1.2	実験機器	7
3.1.3	実験用ソフトウェア	7
3.1.4	タスク	9
3.2	実験結果	10
3.3	考察	10
第4章	実験1	11
4.1	実験設計	11
4.1.1	被験者	11
4.1.2	実験機器	11
4.1.3	実験用ソフトウェア	11
4.1.4	タスク	11
4.2	実験結果	12

4.2.1	ターゲットからのずれ	12
4.2.2	試行時間	13
4.3	考察	13
4.3.1	タップ時におけるカーソル位置の分布	14
4.3.2	ターゲットの位置および傾け操作の精度の関係	15
4.3.3	学習効果による精度の変化	15
4.3.4	ターゲットまでの距離および傾け操作の試行時間の関係	16
4.4	実験 1 についての議論	16
4.4.1	ターゲット位置および試行時間の関係	16
4.4.2	最適な分割数	17
4.5	実験 1 の事後調査	18
第 5 章	実験 2	26
5.1	実験設計	26
5.1.1	被験者	26
5.1.2	実験機器	26
5.1.3	実験用ソフトウェア	26
5.1.4	タスク	26
5.2	実験結果	28
5.3	考察	32
5.3.1	被験者間の差	32
5.3.2	カーソルの移動距離および試行時間の関係	32
5.3.3	ターゲット位置および試行時間の関係	32
5.3.4	ターゲットの大きさおよび試行時間の関係	33
5.4	実験 2 についての議論	34
5.4.1	画面角および端へのターゲットの配置	34
5.4.2	傾け操作の身体的特性	36
	y 軸方向の操作の容易性	36
	x 軸方向の操作の非対称性	36
第 6 章	傾け操作の適用例	42
6.1	設計指針	42
6.2	性能評価	43
第 7 章	結論および今後の課題	45
	謝辞	46
	参考文献	47

付 録 A 実験 1 において使用した書類	52
付 録 B 実験 2 において使用した書類	58
付 録 C 実験 2 における，各被験者ごとの各分割条件におけるターゲット位置および試行時間の関係	64

目 次

3.1	カーソルの位置決定手法. (a) スマートウォッチの傾きおよび (b) カーソル位置の関係.	8
3.2	実験時のスマートウォッチの画面. (a) 準備画面. (b) タスク画面. (c) 待機画面.	9
3.3	予備実験結果.	10
4.1	実験時のスマートウォッチの画面. (a) 待機画面. (b) 準備画面. (c) タスク画面.	12
4.2	実験姿勢. (a) 着座姿勢. (b) 起立姿勢.	13
4.3	ターゲットからのずれ.	14
4.4	ターゲットからのずれの角度.	15
4.5	ターゲットからのずれの角度の分布.	16
4.6	1 試行当たりの試行時間.	17
4.7	ターゲットの中心に対するカーソル位置の分布.	18
4.8	被験者ごとのターゲットの中心に対するカーソル位置の分布.	19
4.9	被験者ごとの試行時間.	20
4.10	着座条件における x 軸方向のターゲット位置によるずれ.	20
4.11	着座条件における y 軸方向のターゲット位置によるずれ.	21
4.12	起立条件における x 軸方向のターゲット位置によるずれ.	21
4.13	起立条件における y 軸方向のターゲット位置によるずれ.	22
4.14	着座条件におけるセッション毎のずれの距離.	22
4.15	起立条件におけるセッション毎のずれの距離.	23
4.16	着座条件におけるターゲットまでの距離による試行時間.	23
4.17	起立条件におけるターゲットまでの距離による試行時間.	24
4.18	x 軸, y 軸ともに 39 分割した際のターゲットの配置. (a) 1521 個のアイテムが表示された画面. (b) 実際に腕に装着した際の様子.	24
4.19	各軸方向の傾け操作の限界角度.	25
4.20	被験者ごとの限界角度.	25
5.1	実験時のスマートウォッチの画面. (a) 待機画面. (b) 準備画面. (c) タスク画面.	27
5.2	3 × 3 分割条件における領域番号.	27
5.3	5 × 5 分割条件における領域番号.	27
5.4	7 × 7 分割条件における領域番号.	27
5.5	実験中の姿勢. (a) 前方から見た様子. (b) 後方から見た様子.	28

5.6	3 × 3 分割条件における領域ごとの試行時間.	29
5.7	5 × 5 分割条件における領域ごとの試行時間.	29
5.8	7 × 7 分割条件における領域ごとの試行時間.	30
5.9	3 × 3 分割条件における領域ごとの試行時間の濃淡図.	30
5.10	5 × 5 分割条件における領域ごとの試行時間の濃淡図.	31
5.11	7 × 7 分割条件における領域ごとの試行時間の濃淡図.	31
5.12	3 × 3 分割条件における被験者ごとの試行時間.	33
5.13	5 × 5 分割条件における被験者ごとの試行時間.	34
5.14	7 × 7 分割条件における被験者ごとの試行時間.	35
5.15	3 × 3 分割条件における被験者ごとの試行時間の濃淡図.	37
5.16	5 × 5 分割条件における被験者ごとの試行時間の濃淡図.	38
5.17	7 × 7 分割条件における被験者ごとの試行時間の濃淡図.	39
5.18	3 × 3 分割条件におけるカーソルの移動距離および試行時間.	40
5.19	5 × 5 分割条件におけるカーソルの移動距離および試行時間.	40
5.20	7 × 7 分割条件におけるカーソルの移動距離および試行時間.	40
5.21	各分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	41
5.22	ターゲットの大きさごとの試行時間.	41
6.1	傾け操作を用いて操作する縦型 QWERTY キーボード. (a) 実装したキーボードが表示された画面. (b) 実際に腕に装着した際の様子.	43
6.2	提案手法による文字入力の様子.	44
C.1	P1 の 3 × 3 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	65
C.2	P1 の 5 × 5 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	65
C.3	P1 の 7 × 7 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	65
C.4	P2 の 3 × 3 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	66
C.5	P2 の 5 × 5 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	66
C.6	P2 の 7 × 7 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	66
C.7	P3 の 3 × 3 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	67
C.8	P3 の 5 × 5 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	67
C.9	P3 の 7 × 7 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	67
C.10	P4 の 3 × 3 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	68
C.11	P4 の 5 × 5 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	68
C.12	P4 の 7 × 7 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	68
C.13	P5 の 3 × 3 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	69
C.14	P5 の 5 × 5 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	69
C.15	P5 の 7 × 7 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	69
C.16	P6 の 3 × 3 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	70
C.17	P6 の 5 × 5 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	70

C.18 P6 の 7×7 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	70
C.19 P7 の 3×3 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	71
C.20 P7 の 5×5 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	71
C.21 P7 の 7×7 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	71
C.22 P8 の 3×3 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	72
C.23 P8 の 5×5 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	72
C.24 P8 の 7×7 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.	72

第1章 はじめに

様々な計算能力を備えたデバイス（以降，端末）に対する傾け操作，すなわち，端末そのものに対する傾けを入力とする操作についての研究が数多くなされるようになった．傾け操作は特に PDA などの画面の小さい端末の入力語彙を拡張する手法として有用性が示されており [Rek96]，スマートウォッチやアクティビティトラッカーをはじめとした手首用ウェアラブルデバイスの入力語彙拡張にも有用であると考えられる [Che15, PCS⁺02]．本研究は，スマートウォッチに注目した．スマートウォッチはスマートフォンからの通知の表示や健康管理など様々な用途に使用することが可能である汎用デバイスであるためアクティビティトラッカーなどの端末に対して操作量が多くなる．しかしスマートウォッチはその画面の小ささから，Fat Finger 問題 [SRC05] や複数の指を用いた操作の困難さなど，入力における制限が存在する．従って，従来の画面の小さい端末同様傾け操作による入力語彙の拡張が有用である．また手首用ウェアラブルデバイスデバイスにおいては，既存研究である手のジェスチャを用いた操作手法 [FWSS15, OARSM15, 塚田 02, WKTA15] と組み合わせることにより，アイテムの選択および決定や文字入力など，端末を装着した腕のみを用いて様々な操作が可能となると考えられる．手首用ウェアラブルデバイスを装着した手のジェスチャは MYO[Lab] などの筋電位を測定可能なデバイスを用いて様々な手法が実装可能であるため，傾け操作との組み合わせの有用性は高いと考えられる．

このように傾け操作には様々な有用性が考えられる一方で，傾け操作を設計するにはその指針が必要となる．フィーチャーフォンやスマートフォン，タブレット端末に対しては，傾け操作の性能評価が行われている [RGIS09, FC09, TM14]．これらの端末は加速度センサやジャイロセンサをはじめとする傾きセンサが搭載されているものが多いため，新たにセンサを加えることなく傾け操作を利用可能である．本研究が対象とするスマートウォッチにも傾きセンサが搭載されており，先述の端末と同様に端末のみを用いて傾け操作を用いることが可能である．

本研究においては，スマートウォッチにおける傾け操作の特性を調査する．すなわち，ユーザが端末をどの程度正確に目的の角度に合わせられるかという精度，および目的の角度に腕を傾けるのにどの程度時間がかかるのかという速度のふたつを調査する．この特性が明らかになれば，傾け操作を用いたスマートウォッチ用の GUI や操作方法の設計指針として役立つと考えられる．例として，フィーチャーフォンに対する傾け操作の性能評価を行った研究においては傾ける方向に応じて操作時間が変化することを見出している．本研究においても精度や操作時間等に特性が見いだせれば，GUI 部品の配置指針が定まると考えられる．例として操作精度の高い角度の傾け操作に使用頻度の高い操作を割り当てることにより，高精度な

操作が実現可能となる．本研究においては短期的な実験を行い，傾け操作に不慣れなユーザにも使用可能な操作の設計指針を示すこととした．

1.1 目的およびアプローチ

本研究の目的は，腕に装着したスマートウォッチに対する傾け操作の特性を調査することである．本研究は先行研究 [TM14, OO05, CMBMS09] に基づき，傾け操作を用いて位置を決定するカーソルを用いたポインティングタスクを通して傾け操作の特性を調査することとした．

この目的を達成するためまず予備実験を行い，その結果を用いて実験用のカーソルを設計した．設計したカーソルを用いたポインティング実験を2種類行い，傾け操作の特性を調査した．

1.2 本研究の貢献

本研究の貢献は，スマートウォッチを装着した腕を目的の角度に合わせる際の特性を明らかにしたことである．具体的には，目的の角度に腕を傾ける際のずれがどのように分布するか，そしてその目的角度や許容範囲が操作にかかる時間にどのような影響を及ぼすかを明らかにしたことである．また，それらの知見からスマートウォッチにおける傾け操作の設計指針を示し，適用例として文字入力手法を実装した．これは，スマートウォッチにおける従来のタップを用いた文字入力は Fat Finger 問題のためキーの押し分けが困難であり，指によって画面が遮蔽されない傾け操作の利点が生かせるためである．また，端末を装着した手によるジェスチャを用いた操作との組み合わせの有用性を検証するため，本研究においては端末を装着した非利き手のみを用いた文字入力手法を実装し，評価を行った．これはスマートウォッチ上の文字入力手法における先行研究 [OHOW13, 石井 15, LSC⁺15] と異なり，端末を装着した手のみを用いて使用可能な手法である．

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである．第2章においては，傾け操作の適用例や傾け操作の性能調査を行った研究を挙げ，本研究の位置づけを行う．第3章においては，実験用のカーソル設計のために行った予備実験を述べる．第4章においては，傾け操作の精度を調査した実験を述べる．第5章においては，傾け操作にかかる時間を調査した実験を述べる．第6章においては，第4章，第5章によって得られた知見から傾け操作の設計指針を述べ，その適用例として行った文字入力手法の実装およびその性能評価を述べる．第7章においては，結論および今後の課題を述べる．

また，付録Aとして実験1に用いた書類を，付録Bとして実験2に用いた書類を示す．付録Cとして，実験2における実験結果の1部を示す．

第2章 関連研究

本章においては、これまでに提案されてきた傾け操作の適用例を示す。また、本研究と同様に傾け操作の性能を調査した研究を示す。本研究は傾け操作の適用例として文字入力手法を示すため、スマートウォッチ上における文字入力についての研究も合わせて示す。

2.1 傾け操作の適用例

入力語彙を拡張するため、様々な端末に対する傾け操作が提案されてる。

2.1.1 超小型の画面を持つ端末に対する傾け操作

手首用ウェアラブルデバイスのような超小型の画面を持つ端末に対する入力語彙の拡張に傾け操作を用いた研究として Blowatch[Che15] や TiltType[PCS⁺02] が存在する。Blowatch はスマートウォッチに息を吹きかける動作をトリガとした操作手法である。ユーザが息を吹きかけたあとに傾け操作を行うことによって、カメラや地図のズームイン、アウトを実装している。TiltType は、腕時計型端末における傾け操作を用いた文字入力手法である。ユーザは傾け操作を用いて 8 方向+中央の計 9 種類の文字を選択して入力を行う。操作には両手を用いるため、文字入力を行う際は端末を手首から外して操作を行っている。InclineType[GV15] はスマートウォッチ向けの傾け操作を用いた文字入力手法である。ユーザは傾け操作を用いて画面端に配置された文字から入力に使用する文字を選択し、タップを用いて入力を行う。

本研究もこれらと同じく、超小型の画面を持つ端末に対する傾け操作を対象とする。傾け操作の性能を向上させるため、被験者実験を通して得られた設計指針を元に適用例の実装を行う。

2.1.2 携帯情報端末に対する傾け操作

携帯情報端末に対して、傾け操作を用いて入力語彙を拡張する試みがなされている。Hinckley ら [HPSH00] は手のひらサイズの PC に複数のセンサを取り付け、端末の状態に応じて実行される機能を提案した。携帯電話のように握った際にメモを記録する機能や持ち上げた際に自動で電源が入る機能と共に、端末を傾けることによってスクロールを行う機能の実装を行っている。Cho ら [CMSK07] は傾け操作を用いて PDA におけるフォトライブラリの閲覧手法を提案した。ユーザは傾け操作によってアルバムのスクロールを行い、かつ、その傾きの大き

さによって一度に画面に表示する画像の枚数の調節を行う。TiltText[WB03]は、フィーチャーフォンにおけるテキスト入力の際、端末の傾け操作を用いることによってボタンの押下回数を減らす手法である。被験者実験の結果、提案手法はタップを用いた文字入力よりも23%速いという結果が示されている。大西ら[大西07]は、フィーチャーフォン型の端末に対する傾け操作を用いることによって、Webブラウジングの操作を拡張した。ユーザは傾け操作を用いて画面に表示されているwebページの周辺領域やリンク先のプレビューを表示し、仮想的に端末画面の大きさを拡大することが可能である。Changら[CLKS15]は大画面スマートフォンの片手操作に傾け操作を用いている。ユーザは傾け操作により画面の移動、画面の縮小、ドラッグにて移動するカーソルの出現を行うことができる。Gilbertsonら[GCCV08]は、スマートフォン上の3Dドライビングゲームを用いて、キー入力による操作と傾け操作を比較する実験を行った。実験から、被験者が傾け操作をより楽しいと感じたという結果が示されている。Fitchettら[FC09]はiPod touch上にて、傾け操作によるスクロールおよびフリックによるスクロールを比較する手法を提案している。着座姿勢においては指を用いたスクロールよりも傾け操作を用いたスクロールの方が操作速度が速いという結果が得られている。

このように、小型の端末に対する傾け操作は様々な入力語彙の拡張に利用されている。本研究が対象とするスマートウォッチも小型の端末であるため、これらの研究と同様に傾け操作による語彙拡張が有用である。

2.1.3 大型の情報端末に対する傾け操作

小型のデバイスに対する傾け操作が数多く提案されている一方で、大型の情報端末に対しても傾け操作を入力とする手法が提案されている。Tilting Table[LKM07]はテーブルトップを傾けるインタラクションである。ユーザがテーブルトップを傾けると、傾斜の度合いに応じて映像および音声出力が変化する。この手法を用いたユーザフィードバック調査において被験者を観察した結果、ユーザが1, 2回画面を傾けただけでアプリケーションがどのように機能するかを把握する様を観察し、傾けるインタラクションが直感的であることが示唆されたと結論付けている。Schmidtら[SSRG12]はテーブルトップおよびスマートフォンを連携させた操作手法を提案している。ユーザはスマートフォンを用いてテーブルトップをタッチし、スマートフォンに対する傾け操作によってテーブルトップ上のスライダを操作している。

このように大型の端末であっても、端末そのものやそれに付随する入力装置に対する傾け操作を用いて入力語彙を拡張することが可能である。本研究は、小型の端末そのものに対する傾け操作を対象とする。

2.2 傾け操作の性能調査

傾け操作をカーソルや選択位置の決定、もしくはカーソルや選択の移動速度の決定に用いることにより、傾け操作の性能を調査した研究が多数存在する。本節ではまず、本研究におけるカーソルの位置が傾け操作によって決定されるよう設計した根拠となる研究を示す。そ

の後、傾け操作を位置決定および移動速度決定に用いた際の発見を示した論文についてそれぞれ述べる。

2.2.1 傾け操作による位置決定および移動速度決定の比較

Teather ら [TM14] はタブレット端末における傾け操作の評価を行っている。カーソルの位置決定およびカーソルの移動速度決定の2手法についてポインティングタスクを通して比較を行った結果、位置決定に用いる手法が移動速度決定に用いる手法の約2倍の速度であった。Oakley[OO05] らは、メニューに対するナビゲーションタスクを通して位置決定および移動速度決定の2手法を比較した。結果、位置決定に傾け操作を用いた手法が移動速度決定に用いた手法よりも素早く操作可能であることを示した。Crossan ら [CMBMS09] は頭を傾ける操作の評価を行った。これはモバイル向けのインタラクションとして提案された操作であり、静止条件および歩行条件にて評価を行っている。また、頭の傾け操作をカーソルの位置決定およびカーソルの移動速度決定に割り当てた2手法について、ポインティングタスクを通して比較を行った。結果、静止条件においては位置決定に用いる手法が、歩行条件においては移動速度決定に用いる手法が高いパフォーマンスを示した。

これらの知見から、静止状態においては傾け操作をカーソルの位置決定に用いる方が移動速度決定に用いるよりも高いパフォーマンスを示すことが判明した。従って静止した状態にて実験を行う本研究においても、傾け操作をカーソルの位置決定に用いることとした。

2.2.2 傾け操作を位置決定に用いた研究

傾け操作をカーソルや選択の位置決定に用いた研究が存在する。Crossan ら [CWBMS08] は手首に取り付けたセンサデバイスを用いたポインティングタスクを通して傾け操作の評価を行った。傾け操作は手首の軸方向のみ評価し、決定係数 0.60 にてフィッツの法則に従うという結果を得た。Sad ら [SP09] はセンサを取り付けた PDA を用いたスクロールおよびポインティングタスクを通して傾け操作の性能評価を行った。結果、両タスクとも傾け操作がフィッツの法則に一致するという知見を得た。Valente[VSF09] らは携帯電話に対する傾け操作を用いたナビゲーションタスクを行った。このとき、操作のフィードバックは音声のみにて行われた。実験から、視覚フィードバックのないタスクにおける傾け操作の有用性が示された。Jones[JAA⁺10] らは傾け操作を用いた文字入力手法を Wiimote 上に実装した。4日間のトレーニングを行った後、被験者は 5WPM にて文字入力を行えるようになった。Sazawal ら [SWB02] は2次元加速度センサを搭載したデバイスを用いて、片手のみで行える傾け操作を用いた文字入力手法を提案した。実験の結果、手の位置など、ユーザによる差異がパフォーマンスに大きな影響を与えることを示した。

本研究もこれらと同様に、傾け操作を位置決定に用いることとした。また、実験はターゲットの探索が複雑な文字入力ではなく、より単純なポインティングタスクを用いた。

2.2.3 傾け操作を移動速度決定に用いた研究

傾け操作をカーソルや選択の移動速度の決定に用いた研究が存在する．MacKenzie[MT12]らは，ISO 9241-9 にて定められたポインティングタスクをタブレット端末上にて行い傾け操作の評価を行った．結果，傾け操作はフィッツの法則に従うものの，マウスよりも性能が低いという結果を得た．Henrysson ら [HBO05, HMB07] は携帯電話を用いたオブジェクトの3次元回転タスクを通して傾け操作の評価を行った．結果，傾け操作はデバイスを移動させる操作やキー入力を用いた操作よりも遅いが，指を用いたカメラベースの空中ジェスチャよりも素早い操作が可能であるという結果を得た．Browne[BC12] らは，スマートフォン上にて動作する2次元シューティングゲームに傾け操作を用いた．この操作をスワイプや画面上に表示したボタンを用いた操作と比較した結果，傾け操作がより好まれるという結果を得た．Hynninen[Hyn12] はスマートフォン上にて動作するFPSゲームを通して傾け操作の評価を行った．結果，傾け操作よりもタッチスクリーン上に表示したジョイスティックの方が高い性能を有するという結果を得た．[MM13] らはスマートフォン上にて動作するブロック崩しゲームを通して傾け操作の評価を行った．結果，タッチスクリーン上のスワイプ操作の方が，傾け操作よりも素早く，高い得点を得られるという結果を得た．Wang ら [WZC06] は携帯電話のカメラを用いた傾け操作を様々なタスクを通して評価した．結果，フィッツの法則に基づいたスループット [Zha04] は $1.1[bps]$ であり，動作の方向によって異なるという結果を得た．

本研究はこれらと異なり傾け操作をカーソルの位置決定に用いた．これは2.2.1節に示す先行研究の結果に従うとともに，両手法を実装し比較を行った結果である．

2.3 スマートウォッチ上における文字入力手法

スマートウォッチはそのタッチパネルの小ささから，Fat Finger 問題により文字入力が困難である．これを解決するための手法が数多く存在する．ZoomBoard[OHOW13] は大まかな位置をタップすることによってキーを拡大し，押し分けを容易にする．Swipeboard[CGF14] は9つに分かれたキーのグループをフリックによって選択し，続くフリックによってキーを選択する手法である．SplitBoard[HHIL15] は複数の領域に分けられたキーボードの領域をスワイプによって選択する手法である．Komninos ら [KD14] はキーボードを6つの領域に分けることにより，超小型タッチパネル端末上でも操作可能なキーボードを提案した．原ら [原 14] はスクロールの変位量に応じてズームするキーボードを提案した．これらの手法は画面に表示するキーの数を減少させることによって Fat Finger 問題を解決している．本研究にて示す文字入力手法は傾け操作の操作精度が高いことを利用し，画面内における全てのキーの表示を実現した．

Flickey[石井 15] は指で隠れたキーを画面上部に表示しフリックを用いてキーを選択する手法である．また，ZShift[LSC⁺15] は指で隠れたキーを画面上部に表示することにより，指によって隠れたキーの押し分けを実現した．これらの手法は指で隠れた領域をユーザに視認可能にすることで Fat Finger 問題の解決を行っている．本研究にて示す文字入力手法は画面に対するタッチを行わないため，指による遮蔽を起こすことなく文字を入力可能である．

第3章 予備実験

本章においては，スマートウォッチに対する傾け操作を用いたカーソルの位置決定に関する予備実験について述べる．

3.1 実験設計

実験に参加した被験者，実験に用いた機器およびソフトウェア，実験タスクについて述べる．

3.1.1 被験者

被験者は大学生および大学院生 4 名（年齢 21 歳～23 歳，平均 22.8 歳）であった．全員が右利きであり，実験中はスマートウォッチを左手首に取り付け，右手を用いてタッチパネルに対する操作を行うよう指示した．

3.1.2 実験機器

実験には，スマートウォッチ（SONY SmartWatch 3 SWR50，端末サイズ：高さ 5mm×幅 36mm×厚さ 10mm，画面サイズ：1.6 インチ，解像度：320px×320px，OS：Android Wear 1.1.1）および，Android 端末（SONY Xperia Z3 Compact SO-02G，端末サイズ：高さ 127mm×幅 6mm×厚さ 8.6mm，画面サイズ：6.4 インチ，解像度：1280px×720px，OS：5.1.1，Android Wear：1.3.0.2160025）を用いた．

3.1.3 実験用ソフトウェア

2.2 節にて述べたように，ポインティングタスクを通して傾け操作の特性を調査した研究は数多く存在する．それらの研究は，傾け操作をカーソルの位置決定，もしくはカーソルの移動速度の決定に用いた．Teather らの研究 [TM14] においてカーソルの位置決定手法およびカーソルの移動速度決定手法を比較した結果，タブレット端末上においては傾け操作をカーソルの位置決定に用いた方がより素早くポインティングを行うことが可能であるという結果が得られている．また著者は，カーソルの位置決定および速度決定の 2 手法を実装し数名にて比較した結果，カーソルの位置決定の方が使用感がよいという結果を得た．従って本研究においては，傾け操作をカーソルの位置決定に割り当てることとした．これにより，ポインティ

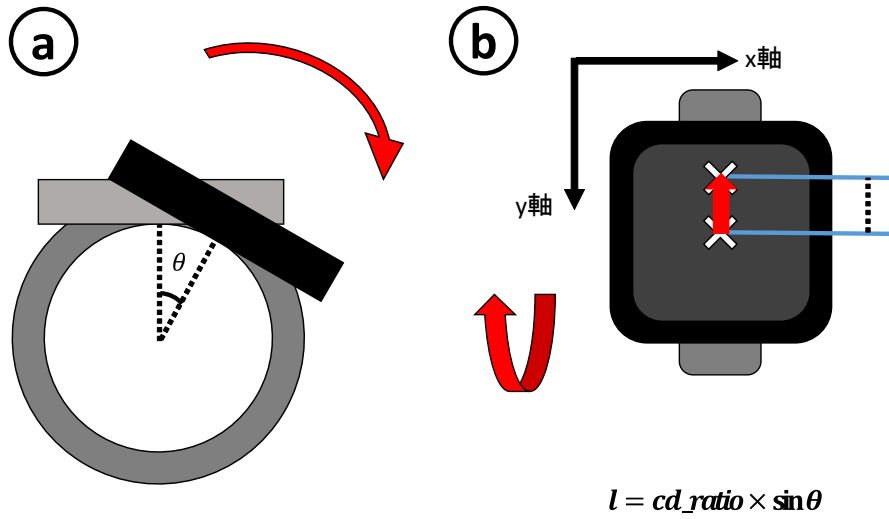


図 3.1: カーソルの位置決定手法. (a) スマートウォッチの傾きおよび (b) カーソル位置の関係.

ングタスクにおけるターゲットの位置を傾け操作における目的角度，ターゲットの大きさをどれだけ目的角度からのずれを許すかという許容範囲として扱うことが可能となる．

図 3.1 に，本研究向けに実装したカーソルの位置決定手法を示す．スマートウォッチを θ 傾けた際の画面中央 $(x, y) = (160, 160)$ からのカーソルの位置は定数 cd_ratio^1 を用いて $cd_ratio \times \sin \theta$ によって決定されるため，傾きを大きくするほどカーソルが大きく移動する．また， cd_ratio の値が大きくなるほど傾け操作に対してより大きくカーソルが移動する．すなわち，x 軸方向に θ_x ，y 軸方向に θ_y 傾け操作を行った場合のカーソルの位置は $(x, y) = (160 + cd_ratio \times \sin \theta_x, 160 + cd_ratio \times \sin \theta_y)$ となる．また，この傾きの基準角度 ($\theta = 0$) はタスクの開始時点での腕の角度である．決定された x, y のいずれかが画面の領域外である場合には，従来のデスクトップ環境におけるマウスカーソル同様，画面外に移動せず停止するように設計を行った．カーソルが停止した状態にて腕を基準角方向に傾けなおした場合，再計算された x, y が画面の領域内になるまでは傾きを変化させてもカーソルの位置は移動しない．

この予備実験においては，本実験にて使用する定数 cd_ratio の値を決定するため， cd_ratio のみが異なる 3 種類のカーソルおよび比較対象として用いる直接タッチの計 4 手法について比較を行った．予備実験を行う前段階として，本大学にて行われたオープンハウスの来訪者に $cd_ratio = 2000$ のカーソルを用いて予備実験と同様のタスクを行ってもらい使用感の調査を行った．結果「初めての使用でも操作可能ではあるがやや移動が遅い」とのコメントが得られたため，予備実験においては $cd_ratio = 2300$ ，および 1700，3000 の比較を行うこととした．

¹cd は control display の略称であり， cd_ratio はディスプレイ上のカーソル移動距離に対する傾け操作の傾け量の比と定義される．

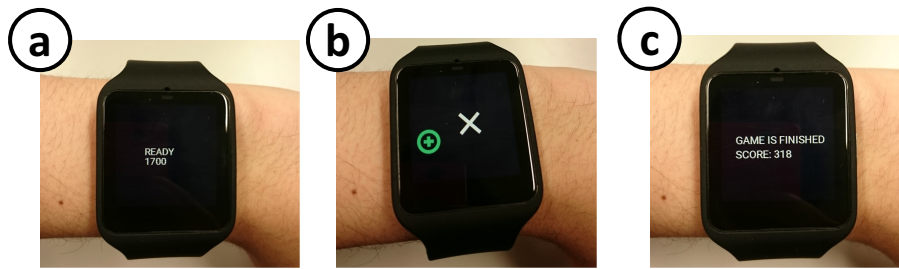


図 3.2: 実験時のスマートウォッチの画面. (a) 準備画面. (b) タスク画面. (c) 待機画面.

3.1.4 タスク

被験者には、それぞれの手法を用いてスマートウォッチの画面に表示されたターゲットをポインティングしてもらった。実験時のスマートウォッチの画面を図 3.2 に示す。被験者にはまず、スマートウォッチの画面を自然に視認できる姿勢をとってもらった。このときの画面の角度を基準角度として記録し、スマートウォッチに図 3.2a に示す準備画面を表示した。タスクは、被験者が準備画面をタップすることによって開始された。タスク中の画面を図 3.2b に示す。画面中の「×」がカーソル、「○」の中に十字が描かれた記号がターゲットである。直接タッチを用いる場合には、カーソルは表示されなかった。このターゲットは、2 秒をかけて赤色から緑色に変化し、2 秒が経過すると消失し、別の場所に再表示された。これは被験者に素早く正確な操作を意識させるためのものであり、消失までの時間は実験的に決定した。

被験者には、カーソルを用いる場合には傾け操作を用いてカーソルをターゲットに移動させ、カーソルをターゲットに重ねた状態にて画面の任意の位置をタップしてもらった。直接タッチを用いる場合には、表示されたターゲットを指を用いてタッチしてもらった。カーソルの中心をターゲットの「○」内に入れた状態にて 1 度タップを行うことまたはターゲットに対して直接タッチを行うこと、および 2 秒間の経過によるターゲットの消失を 1 試行とした。1 回の試行ごとにターゲットは画面内のランダムな位置に再表示された。25 回の試行を 1 セッションとし、セッションが終了した際にはスマートウォッチに図 3.2c に示す準備画面を表示した。画面の SCORE は後述する *TP* (スループット) の 25 試行分の合計値であり、オープンハウス来訪者に使用してもらおう際ゲーム感覚にて調査に協力してもらおうために表示することとした。

被験者には立った姿勢をとり、左腕を宙に浮かせた状態にてタスクを行ってもらった。被験者にはそれぞれの手法にて、練習 2 セッションおよび本番 2 セッションの計 4 セッションを行ってもらったため、被験者は合計 400 試行 (4 手法 × 25 試行 × 4 セッション) を行った。

被験者にはセッション間に感じたことを口に出してもらおうよう指示を行い、逐次記録を行った。被験者 1 人当たりの実験時間は実験およびアンケートの回答を合わせて合計で約 30 分であった。

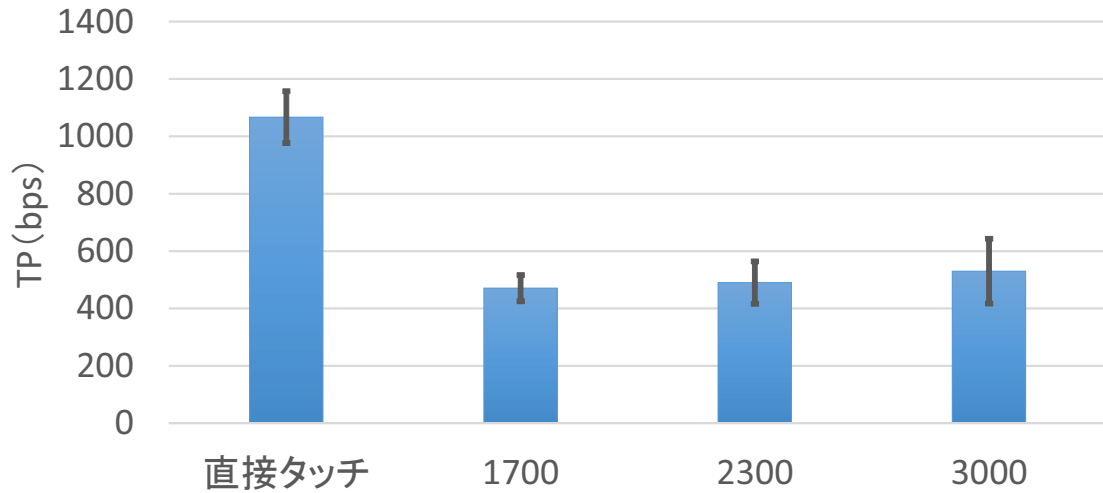


図 3.3: 予備実験結果.

3.2 実験結果

実験結果を図 3.3 に示す. 各手法の評価は TP (スループット) $= \log_2(1 + D/W)/T[bps]$ という性能評価値を用いた [Zha04]. TP は次元が単位時間当たりのビットであり, 動作がどの程度早く完了できるかを示す. 図 3.3 は 25 試行の TP の合計であり, 2 秒が経過しターゲットが消失した際は $TP = 0bps$ とした.

結果, それぞれの TP は直接タッチが $1066.8bps$, カーソルを用いた場合には $cd_ratio = 1700$ のとき $471.0bps$, 2300 のとき $490.5bps$, 3000 のとき $530.4bps$ となった. 有意検定を行ったところ, $p < .01$ となったが, 有意差が見られたのは直接タッチおよびカーソルを用いた手法の間のみであり, cd_ratio 間に有意差は見られなかった.

3.3 考察

cd_ratio 間の TP に有意差が見られなかったため, 被験者から得られたコメントを用いて実験に適した cd_ratio を決定することとした. 4 名中 3 名の被験者が $cd_ratio = 2300$ を好み, 1 名は 3000 を好んだ. また, 3000 を好んだ被験者を含め全員が「失敗無くポインティングを行うには 2300 が最も適している」という旨をコメントした. 2 名の被験者は「習熟すると 3000 が最も使いやすくなると思う」とコメントした. 1700 については, 3 名の被験者が「動きが遅い」「腕の動きが大きく疲れる」とコメントした. 本実験は短期的な性能調査を目的としているため, 未習熟な被験者に好まれた 2300 を実験 1 および実験 2 の cd_ratio として用いることとした.

第4章 実験1

スマートウォッチに対する傾け操作の精度を調査するため、被験者実験を行った。

4.1 実験設計

実験に参加した被験者、実験に用いた機器およびソフトウェア、実験タスクについて述べる。

4.1.1 被験者

被験者として大学生および大学院生 8 名（年齢 21 歳～24 歳，平均 22.5 歳）を雇用した。スマートフォンの利用暦は 0～71 ヶ月，平均 40.6 ヶ月であった。スマートウォッチを使用したことがある被験者は 0 人であった。全員が右利きであり，実験中はスマートウォッチを左手首に取り付け，右手によってタッチパネルに対する操作を行うよう指示した。実験 1 においては，これらの被験者を P1 から P8 と呼ぶ。

4.1.2 実験機器

実験には，3.1.2 節と同じ機器を用いた。

4.1.3 実験用ソフトウェア

実験には，3.1.3 節と同じカーソルを用いた。この時，予備実験の結果をうけ $cd_ratio = 2300$ としたため，x 軸，y 軸ともにカーソル位置が画面中央となる基準角度から $\pm 3.99^\circ$ 傾けることによりカーソルを画面端まで移動させることが可能となっている。従って，実験 1 においては x 軸，y 軸ともに 7.98° の範囲にて調査を行うこととなる。

4.1.4 タスク

被験者には，スマートウォッチの画面に表示されたターゲットをポインティングしてもらった。実験時のスマートウォッチの画面を図 4.1 に示す。被験者にはまず，図 4.1a に示す待機画面が表示されている間にスマートウォッチの画面を自然に視認できる姿勢をとってもらった。このときの画面の角度を基準角度として記録し，スマートウォッチに図 4.1b に示す準備画面



図 4.1: 実験時のスマートウォッチの画面. (a) 待機画面. (b) 準備画面. (c) タスク画面.

を表示した. タスクは, 被験者が準備画面をタップすることによって開始された. タスク中の画面を図 4.1c に示す. 画面中の「x」がカーソル, 「o」がターゲットである.

被験者は傾け操作を用いてカーソルをターゲットに移動させ, カーソルをターゲットに重ねた状態にて画面の任意の位置をタップしてもらった. この1回のタップを1試行とした. このとき被験者には, 時間よりも精度を優先する, すなわち可能な限りカーソルとターゲットを一致させるよう教示を行った. ターゲットは一度タップを行うごとに, 画面内のランダムな位置に再表示された. 25 試行を1セッションとし, 被験者には, 椅子に座った着座姿勢および, 立った状態の起立姿勢の計2姿勢にてタスクを行ってもらった. これらの姿勢において, 被験者は左腕を宙に浮かせた状態にてタスクを行った. それぞれの姿勢を図 4.2 に示す. 被験者にはそれぞれの姿勢にて, 練習2セッションおよび本番4セッションの計6セッションを行ってもらったため, 被験者は合計300試行(2姿勢×25試行×6セッション)を行った.

被験者には全セッション終了後, 使用感についてのアンケートに回答してもらった. 被験者1人当たりの実験時間は実験およびアンケートの回答を合わせて合計で約1時間であり, 拘束時間に対する謝礼として1人当たり820円が支払われた.

4.2 実験結果

実験結果を示す. 結果には本番4セッション分のデータ1600試行を用いた. なお, タッチ位置に関して(平均 $\pm 3 \times$ 標準偏差)の範囲を外れる37試行を外れ値として除外した. これは実験中, 誤ってタッチパネルをタッチしてしまい, 意図しない場所に対してポインティングを行った被験者がいたためである.

4.2.1 ターゲットからのずれ

ターゲットの中心座標を(0,0)とした場合の, 各姿勢条件におけるx軸方向およびy軸方向に対するターゲットからのずれを図 4.3 に示す. x軸方向のずれは, 着座姿勢においては

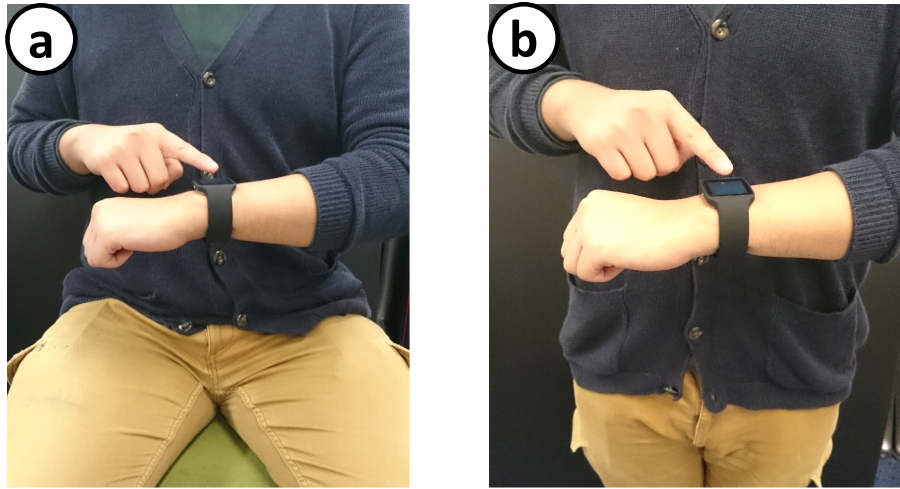


図 4.2: 実験姿勢. (a) 着座姿勢. (b) 起立姿勢.

+2.96px および -4.17px , 起立姿勢においては $+2.91\text{px}$ および -3.92px であった. また, y 軸方向のずれは, 着座姿勢においては $+3.83\text{px}$ および -4.70px , 起立姿勢においては $+3.83\text{px}$ および -4.82px であった.

ずれの単位を px から度数法に変換した結果を図 4.4 に示す. x 軸方向のずれは, 着座姿勢においては $+0.07^\circ$ および -0.10° , 起立姿勢においては $+0.07^\circ$ および -0.10° であった. また, y 軸方向のずれは, 着座姿勢においては $+0.10^\circ$ および -0.12° , 起立姿勢においては $+0.09^\circ$ および -0.12° であった.

ずれの分布を図 4.5 に示す. 0.07° 以内のずれが半分以上を占めている. 本研究においては, $68\%(=1 \times \sigma)$ 以内に分布するずれを精度とみなすこととした. 従って, 傾け操作の精度は $\pm 0.10^\circ$, すなわち 0.20° であった.

4.2.2 試行時間

1 試行あたりの試行時間を図 4.6 に示す. 着座姿勢の試行時間は 3.43s , 起立姿勢の試行時間は 3.51s であった.

4.3 考察

タップ時におけるカーソル位置の分布, ターゲットの位置および傾け操作の精度の関係, 学習効果による精度の変化, ターゲットまでの距離および傾け操作の試行時間の関係についての考察を示す.

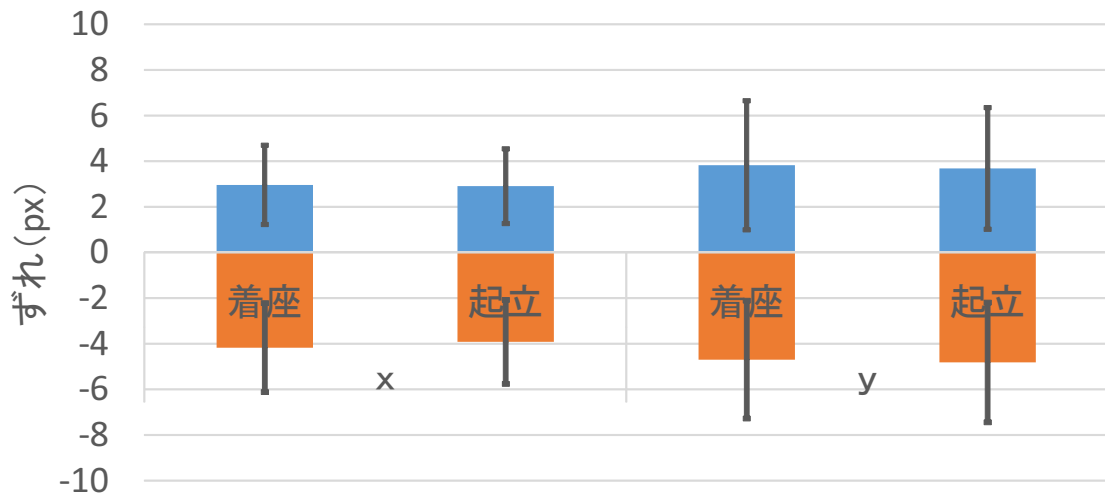


図 4.3: ターゲットからのずれ.

4.3.1 タップ時におけるカーソル位置の分布

Parhi らや深津らの研究 [PKB06, 深津 13] を参考に、ターゲットの中心に対するカーソル位置の分布を図 4.7 に示す。この図は正方形の中心をターゲットの中心とみなし、各試行におけるポインティング位置をターゲットの中心を基準として薄い灰色の点にてプロットしたものである。また、ポインティング位置の分布の中心を赤い点にて示し、その点と正方形の中心とを赤い線にて結ぶことによって分布の中心とターゲットの中心との距離を示した。また、赤い点を中心とした楕円を 3 種類描いた。これらの楕円の軸の長さには分布の標準偏差 (σ) を用いた。すなわちこれらの楕円は、軸の長さが $1 \times \sigma$ (青色) $2 \times \sigma$ (緑色) $3 \times \sigma$ (黄緑色) となっている。

また、それぞれの楕円の大きさとなる標準偏差を表 4.1, 4.2 に示す。表 4.1, 4.2 より、ポインティング位置は長辺が y 軸方向となる楕円型に分布するという結果が得られた。これはすなわち、y 軸方向よりも x 軸方向の方が傾け操作の精度が高いことを示している。P8 は実験後のアンケートにて、y 軸方向への腕の傾け操作、すなわち手首の軸方向の回転は正方向および負方向にて非対称な操作であると述べ、y 軸方向への操作の困難さについて言及していた。

また図 4.7 より、径が $1 \times \sigma$ によって表される楕円内のポインティング位置の分布密度が高いことが確認された一方、径が $3 \times \sigma$ によって表される楕円外にも分布が見られた。楕円外の分布について調査を行うため、各被験者ごとのターゲットの中心に対するポインティング位置の分布を図 4.8 に示す。P1, P3 においては、分布半径がほかの被験者に比べて大きくなっていることが確認された。これは、今回行った実験における「可能な限りカーソルとターゲットを一致させる」という教示が被験者の主観に基づくものであったため、被験者によって差が出たためだと考えられる。被験者ごとの試行時間を図 4.9 に示す。どちらの姿勢条件においても P1 および P3 の試行時間がほかの被験者に比べ短いため、より時間をかけることによ

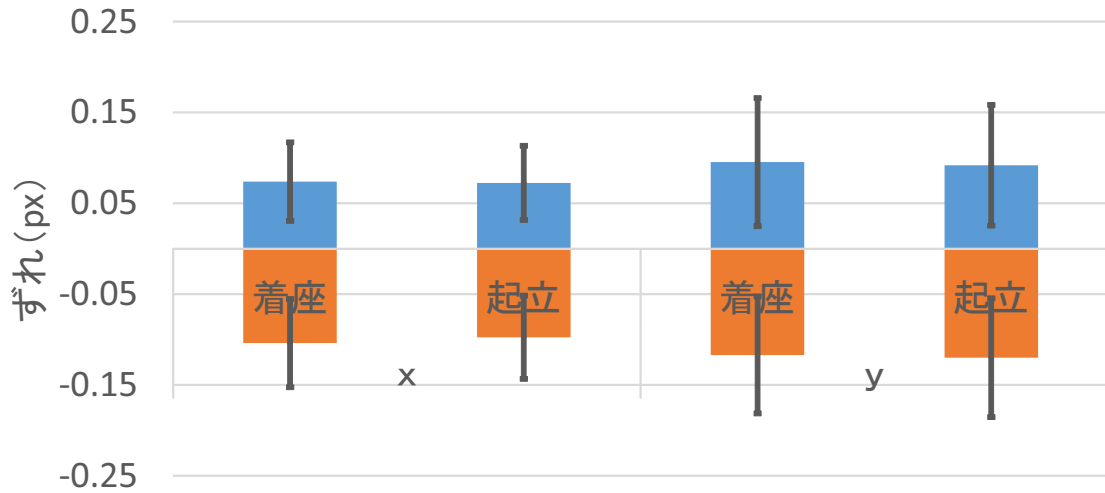


図 4.4: ターゲットからのずれの角度.

てほかの被験者と同様の分布になる可能性がある.

4.3.2 ターゲットの位置および傾け操作の精度の関係

ターゲットの位置および傾け操作の精度の関係を図 4.10～4.13 に示す. これらの散布図に対して指数, 対数, 2 次から 6 次の多項式, 累乗の 8 種類の関数を用いて近似曲線を作成し, 決定計数を調査した. 結果, すべての近似曲線に対して決定計数 $R^2 < 0.01$ を示したため, 傾け操作は各軸方向 $\pm 3.99^\circ$ の範囲にて一様な精度であることが分かった.

4.3.3 学習効果による精度の変化

慣れによる精度の向上を調査するため, 4 回のセッションそれぞれにおけるずれを求めた. 結果を図 4.14, 4.15 に示す. 着座条件においては, x 軸方向および y 軸方向ともに決定計数 $R^2 > 0.04$ にて増加傾向を示しており, 精度悪化が確認された. 一方で起立姿勢においては, x 軸方向については増加, 減少のどちらの傾向も示されなかったが, y 軸方向については決定計数 $R^2 > 0.80$ という強い相関にて減少傾向を示しており, 精度向上が確認された. 実験後のアンケートにて起立姿勢および着座姿勢のどちらが好まれたかを調査したところ, 5 名が着座姿勢を好み, 1 名が起立姿勢を好んだ. 2 名はどちらの姿勢にも差異はないと回答した. このことから, 被験者が困難だと感じた起立姿勢に関しては学習による精度向上が強く表れ, 一方で安定していると感じた着座姿勢に関しては疲労による精度悪化が強く表れたと考えられる. これは, 被験者がスマートウォッチ操作に未習熟であったため, より学習の影響が顕著に出ている可能性がある.

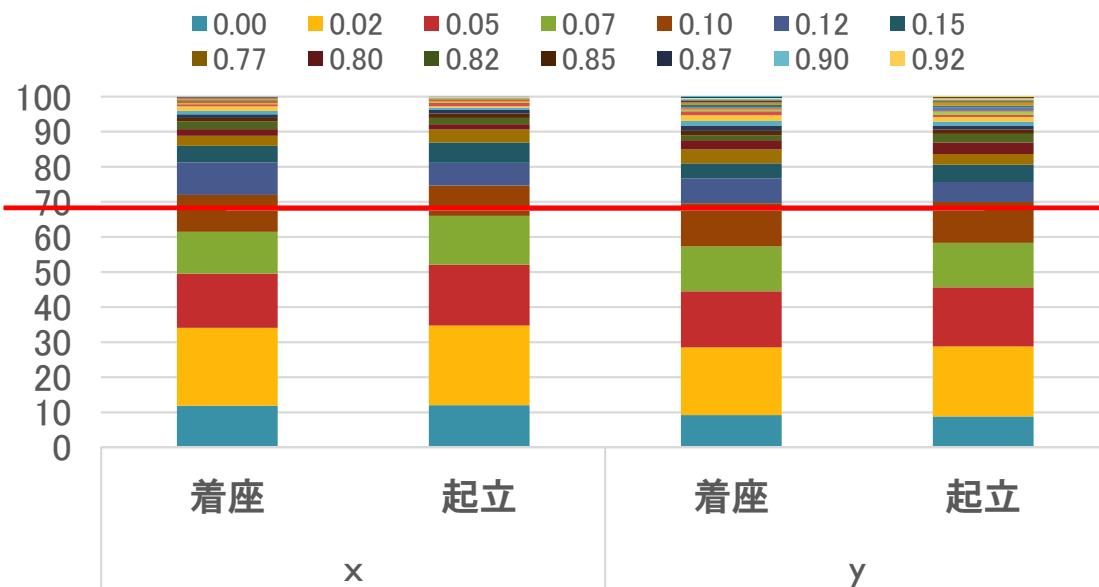


図 4.5: ターゲットからのずれの角度の分布.

4.3.4 ターゲットまでの距離および傾け操作の試行時間の関係

ターゲットまでの距離および傾け操作の試行時間の関係を調査した。結果を図 4.16, 4.17 に示す。これらの散布図に対して指数, 対数, 2 次から 6 次の多項式, 累乗の 8 種類の関数を用いて近似曲線を作成し, 決定計数を調査した。結果, すべての近似曲線に対して決定計数 $R^2 < 0.01$ を示したため, 傾け操作は各軸方向 $\pm 3.99^\circ$ の範囲にて一様な試行時間であることが分かった。

4.4 実験 1 についての議論

実験 1 の結果から, ターゲット位置および試行時間の関係, 最適な分割数について議論を行う。

4.4.1 ターゲット位置および試行時間の関係

実験結果から, 実験 1 においてはターゲット位置および試行時間の関係性を見出すことはできなかった。しかし, 画面外へ移動するカーソルは画面端にて静止するという特性を用いることによって, 画面端に対するポインティングの試行時間が減少する可能性が示唆された。すなわち, ターゲットが画面角に配置されているのであればユーザはそのターゲットの方向に大きく端末を傾けることによって細かい位置調整を行うことなくポインティングが可能となるため, 試行時間が減少するという仮説である。これは Tognazzini[Tog] によっても指摘さ

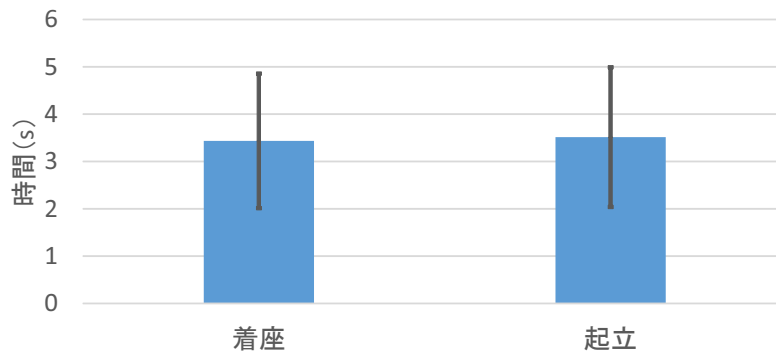


図 4.6: 1 試行当たりの試行時間.

表 4.1: 着座姿勢における標準偏差

被験者	x 軸	y 軸
All	5.00	6.23
P1	8.45	11.75
P2	2.37	2.96
P3	8.05	10.23
P4	2.85	3.01
P5	3.74	3.81
P6	5.05	5.44
P7	3.07	3.16
P8	2.23	2.32

表 4.2: 起立姿勢における標準偏差

被験者	x 軸	y 軸
All	4.85	6.35
P1	9.16	12.30
P2	2.64	4.44
P3	6.88	9.42
P4	2.81	3.16
P5	3.82	4.54
P6	4.03	4.15
P7	3.70	3.74
P8	2.07	2.78

れており、画面端にあるターゲットはカーソルが行き過ぎることがないため、Fitts の法則に基づいて考えた場合画面角および端方向に無限の大きさを持つターゲットとみなすことが可能なためである。画面端に位置するターゲットは 1 軸方向に無限の大きさを持ち、画面角に位置するターゲットは 2 軸方向に無限の大きさを持つと考えられ、これが試行時間の短縮に寄与するのであれば、よりポインティング回数の多くなるターゲットを画面端に配置するという設計指針が得られる可能性がある。

4.4.2 最適な分割数

実験結果から得られた精度から、x 軸、y 軸方向ともに 7.98° の範囲においては傾け操作を $(7.98/0.20) > 39$ 分割することが可能であるという結果が示唆された。従って、先行研究 [Rek96] のように傾け操作をアイテム選択に用いた場合、図 4.18 のように 2 次元にアイテムを配置することによって最大 1521 ($< (7.98/0.20) \times (7.98/0.20)$) 個のアイテムの中から選択を行うことが可能であり、指によるタップを用いた手法向けの GUI よりもはるかに多くの

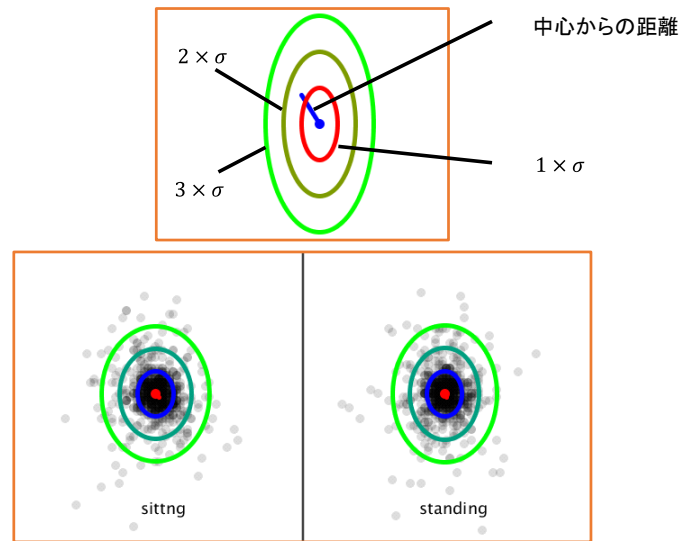


図 4.7: ターゲットの中心に対するカーソル位置の分布.

アイテムを表示することが可能となる．しかし，この分割数は操作可能である最大数であり，また，その操作には 3.0 s 以上の時間を要する．ペンデバイスの傾け操作について調査した先行研究 [XBR11] においては，分割数を減らすことによって試行時間が減少するという結果を得ているため，スマートウォッチにおける傾け操作も分割数を減らすことによって試行時間が減少する可能性がある．したがって分割数，すなわちターゲットの大きさおよび試行時間の関係性について調査を行い関係性を見出すことができれば，ユーザに要求可能な試行時間からターゲットの大きさを算出できる可能性がある．

4.5 実験 1 の事後調査

実験 1 終了後，被験者 8 名に対して傾け操作の限界角度について調査した．内容は，「スマートウォッチに対して傾け操作を行う場合，各軸方向にどの程度傾けを許容できるか．肉体的にも，画面の角度的にも許容できる範囲を教えてください．」というものであった．実際に被験者に腕を各軸方向に傾けてもらい，その角度を実験に用いた端末上にて動作するアプリケーションを用いて記録した．結果を図 4.19 に示す．x 軸方向に関しては，着座姿勢においては $+35.60^\circ$ および -22.30° ，起立姿勢においては $+34.41^\circ$ および -21.17° であった．また，y 軸方向に関しては，着座姿勢においては $+30.08^\circ$ および -24.62° ，起立姿勢においては $+31.56^\circ$ および -25.69° であった．

各被験者について各軸各方向の限界角度を図 4.20 に示す．いずれの被験者も，x 軸，y 軸ともに対象な被験者はおらず，個人差がある．ここに示す全ての被験者にとって扱うことが可能な角度の範囲は x 軸方向が $\pm 3.79^\circ$ ，y 軸方向が $\pm 2.94^\circ$ である．なお，これは 1 方向ずつ調査を行ったものであるため，斜め方向の傾け操作はまた異なった限界角度が示される可能性

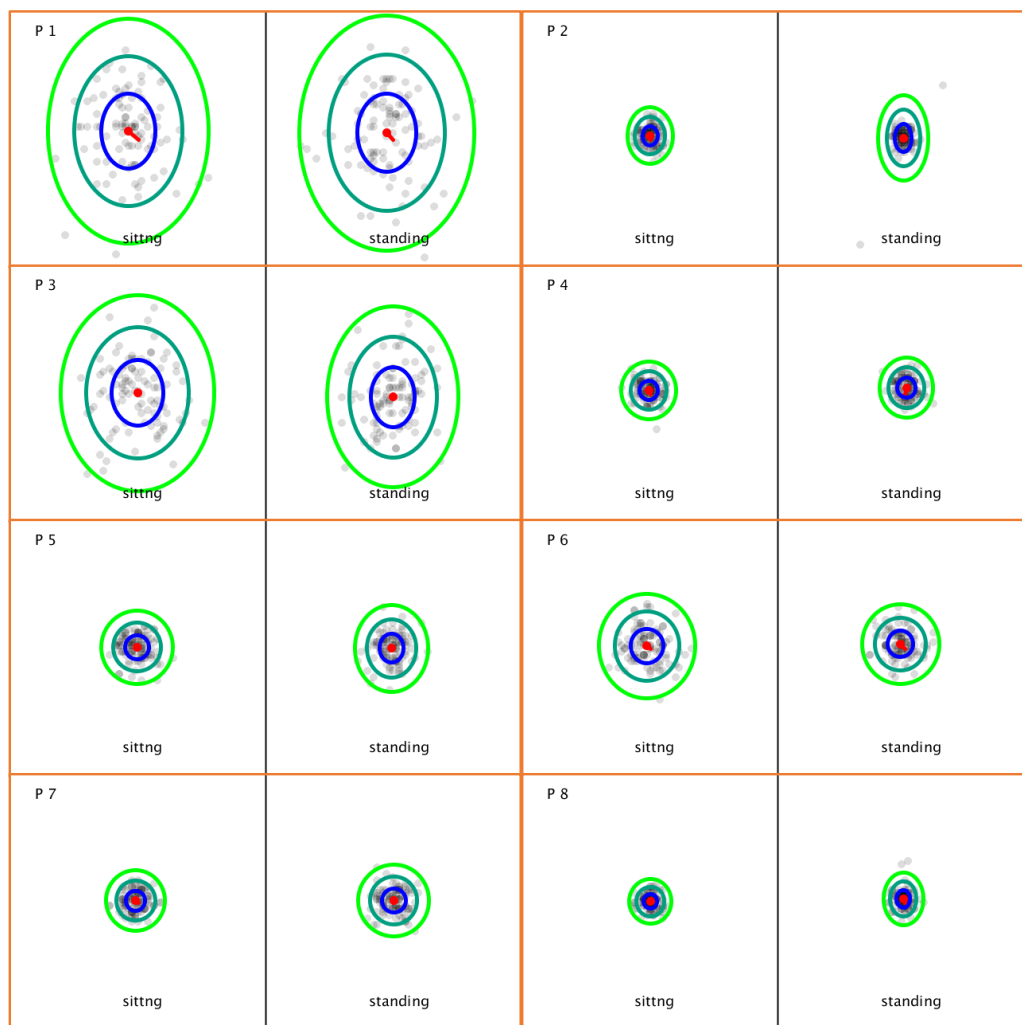


図 4.8: 被験者ごとのターゲットの中心に対するカーソル位置の分布.

がある.

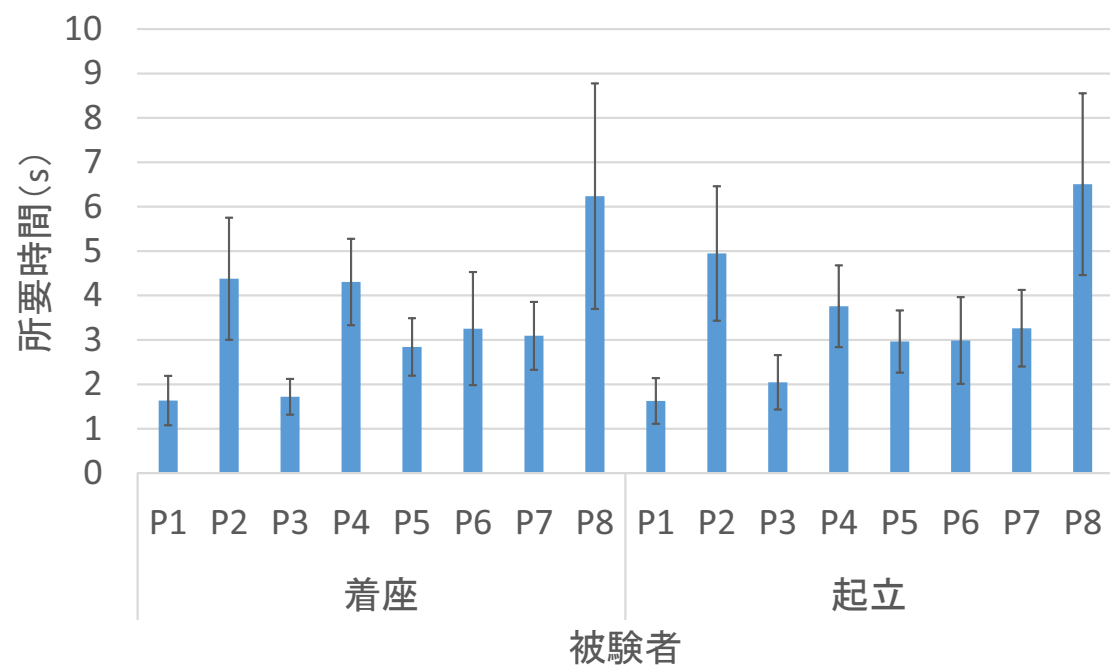


図 4.9: 被験者ごとの試行時間.

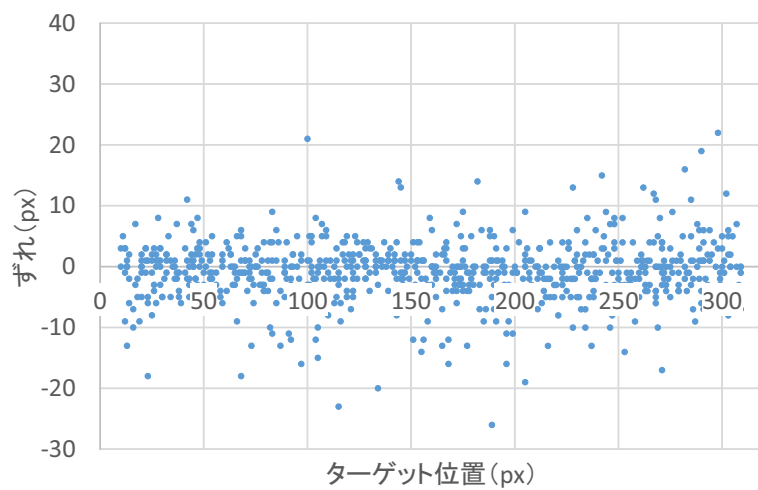


図 4.10: 着座条件における x 軸方向のターゲット位置によるずれ.

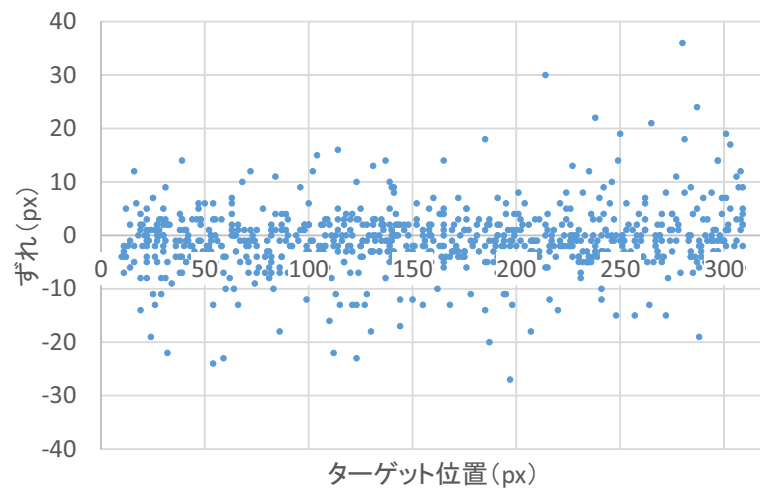


図 4.11: 着座条件における y 軸方向のターゲット位置によるずれ.

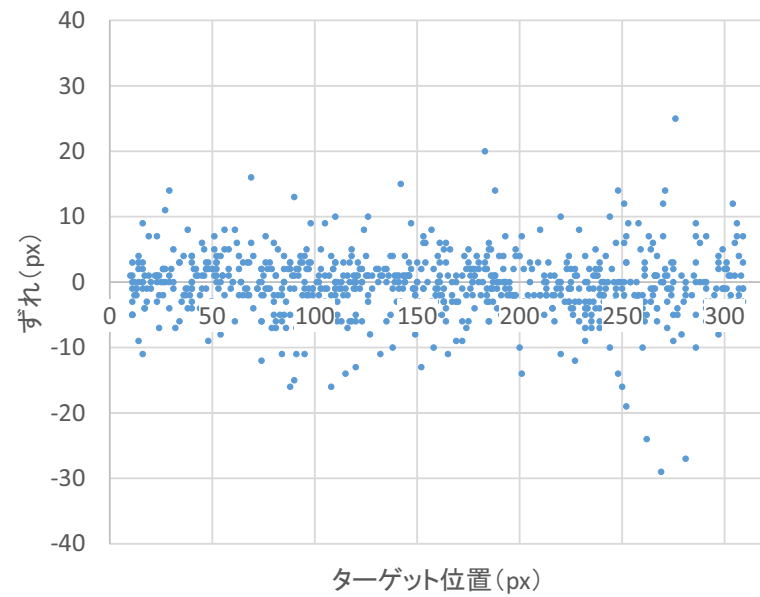


図 4.12: 起立条件における x 軸方向のターゲット位置によるずれ.

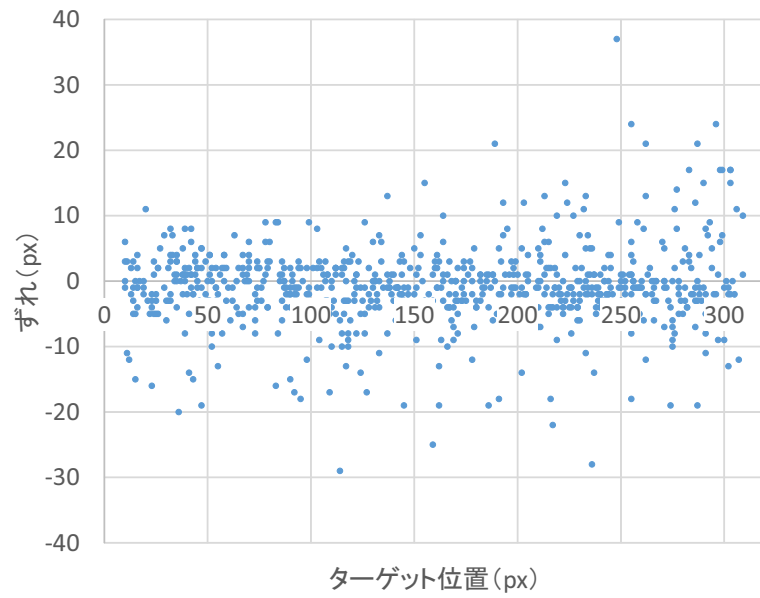


図 4.13: 起立条件における y 軸方向のターゲット位置によるずれ.

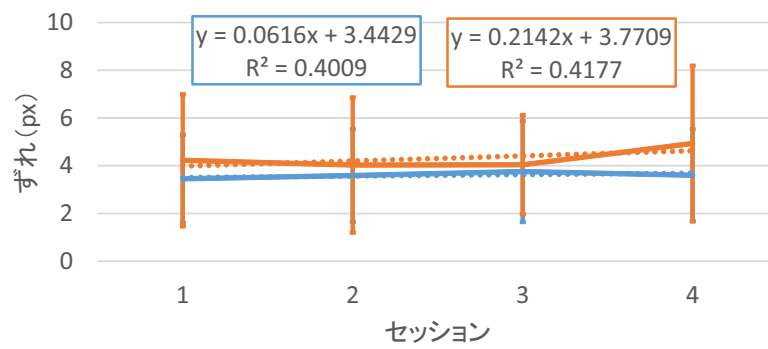


図 4.14: 着座条件におけるセッション毎のずれの距離.

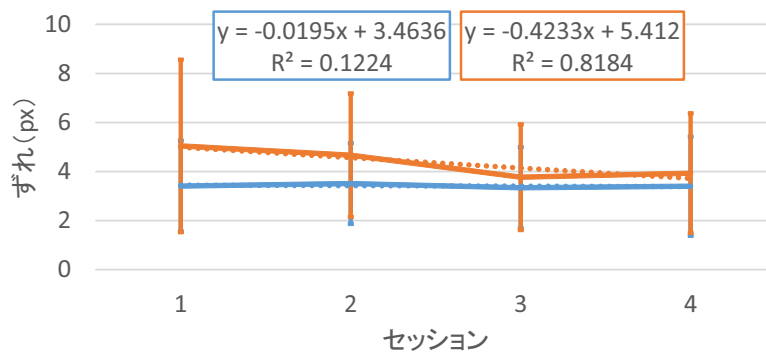


図 4.15: 起立条件におけるセッション毎のずれの距離.

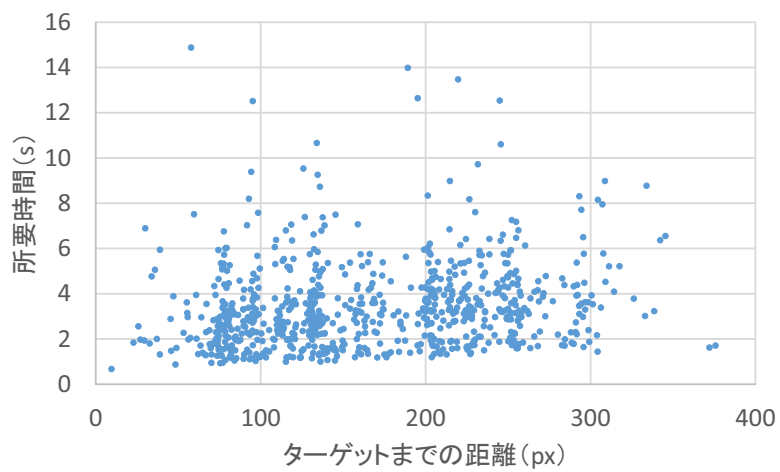


図 4.16: 着座条件におけるターゲットまでの距離による試行時間.

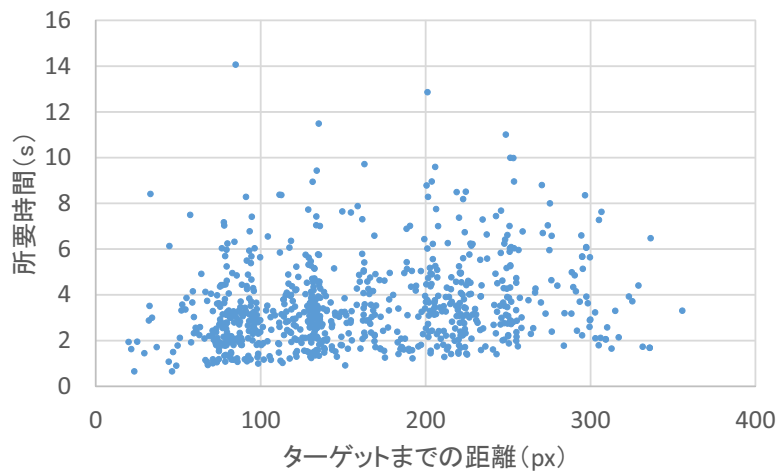


図 4.17: 起立条件におけるターゲットまでの距離による試行時間.

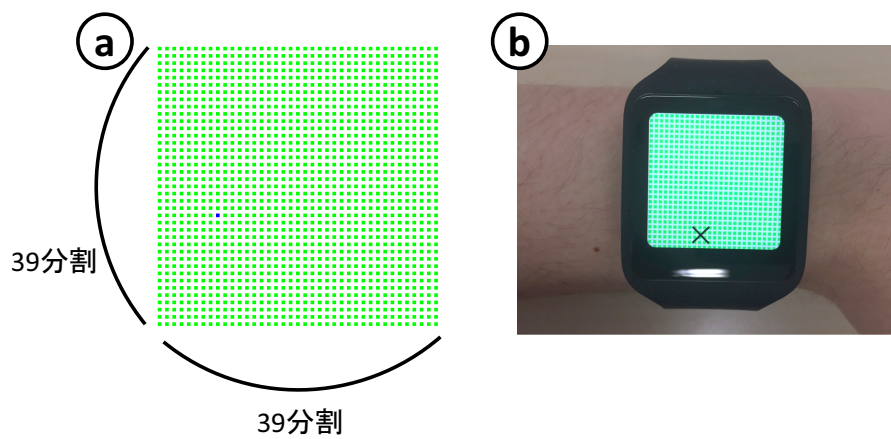


図 4.18: x 軸, y 軸ともに 39 分割した際のターゲットの配置. (a) 1521 個のアイテムが表示された画面. (b) 実際に腕に装着した際の様子.

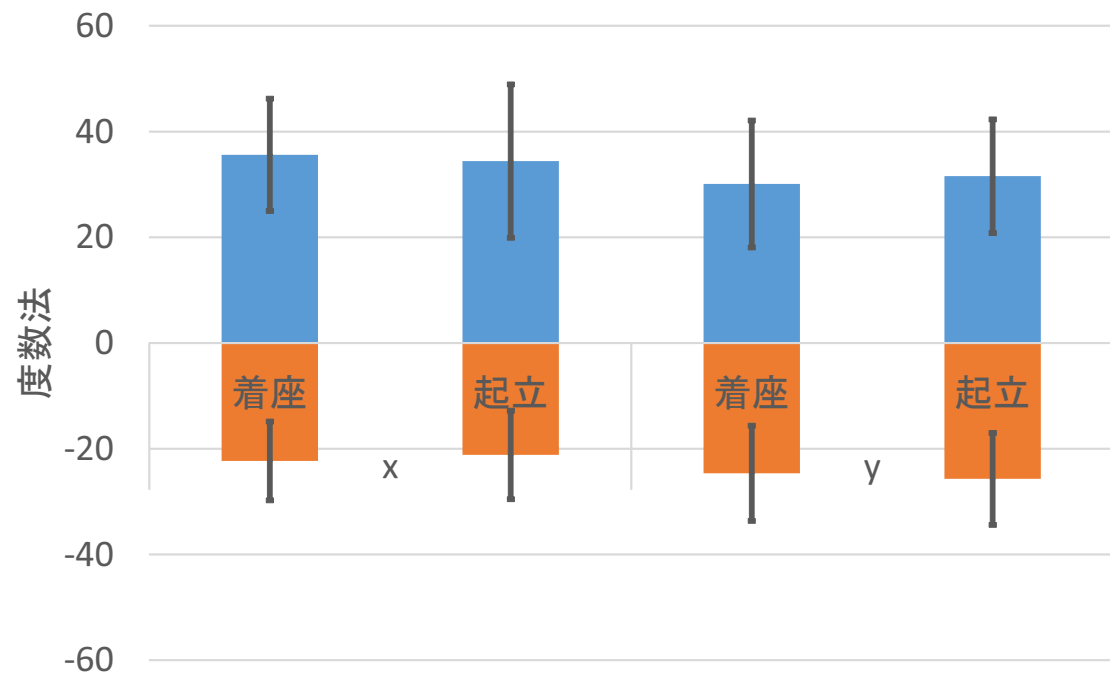


図 4.19: 各軸方向の傾け操作の限界角度.

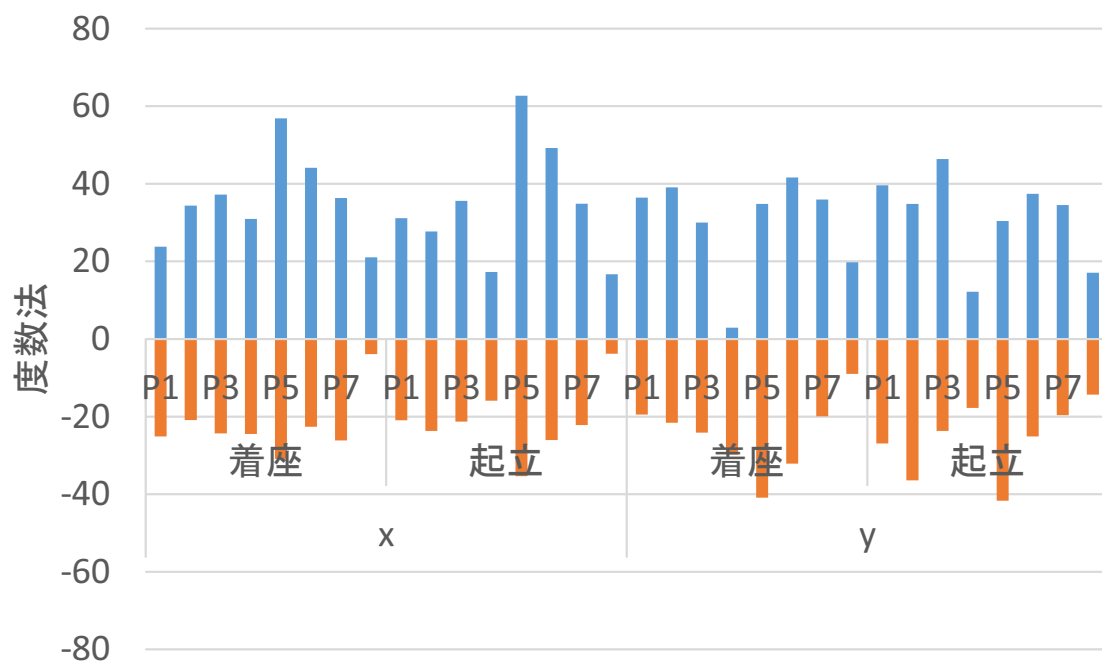


図 4.20: 被験者ごとの限界角度.

第5章 実験2

スマートウォッチに対する傾け操作の速度を調査するため、被験者実験を行った。この時、4.4 節にて示唆された可能性，すなわち，ターゲット位置および試行時間の関係，ターゲットの大きさおよび試行時間の関係について調査を行えるよう実験タスクを設計した。

5.1 実験設計

実験に参加した被験者，実験に用いた機器およびソフトウェア，実験タスクについて述べる。

5.1.1 被験者

被験者として大学生および大学院生 8 名（年齢 20 歳～24 歳，平均 23.1 歳）を雇用した。スマートフォンの利用暦は 23～66 ヶ月，平均 40.0 ヶ月であった。スマートウォッチを使用したことがある被験者は 0 人であった。全員が右利きであり，実験中はスマートウォッチを左手首に取り付け，右手によってタッチパネルに対する操作を行うよう指示した。全員実験 1 には参加していない被験者であった。実験 2 においては，これらの被験者を P1 から P8 と呼ぶ。

5.1.2 実験機器

実験には，3.1.2 節と同じ機器を用いた。

5.1.3 実験用ソフトウェア

実験には，3.1.3 節と同じカーソルを用いた。この時，実験 1 と同様に予備実験の結果を受け $cd_ratio = 2300$ としたため，x 軸，y 軸ともにカーソル位置が画面中央となる基準角度から $\pm 3.99^\circ$ 傾けることによりカーソルを画面端まで移動させることが可能となっている。従って，実験 2 においても x 軸，y 軸ともに 7.98° の範囲にて調査を行うこととなる。

5.1.4 タスク

被験者には，スマートウォッチの画面に表示されたターゲットをポインティングしてもらった。実験時のスマートウォッチの画面を図 5.1 に示す。被験者にはまず、図 5.1a に示す待機画



図 5.1: 実験時のスマートウォッチの画面. (a) 待機画面. (b) 準備画面. (c) タスク画面.

1	2	3
4	5	6
7	8	9

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31	32	33	34	35
36	37	38	39	40	41	42
43	44	45	46	47	48	49

図 5.2: 3×3 分割条件における領域番号. 図 5.3: 5×5 分割条件における領域番号. 図 5.4: 7×7 分割条件における領域番号.

面が表示されている間にスマートウォッチの画面を自然に視認できる姿勢をとってもらった. この時の画面の角度を基準角度として記録し, スマートウォッチに図 5.1b に示す準備画面を表示した. タスクは, 被験者が準備画面をタップすることによって開始された. タスク中の画面を図 5.1c に示す. 画面中の「x」がカーソル, 赤色の矩形がターゲットである. このとき, スマートウォッチの画面を 3×3 , 5×5 , 7×7 の 3 条件に分割したうちの 1 領域がターゲットとして表示される. これらの分割条件は, 実験端末に用いた SmartWatch 3 のメニュー画面が 3×1 分割されているため, これを横方向に拡張した 3×3 を基準とし, それに加えより小さなターゲットについての調査を 2 条件分行うために設定された. 図 5.2~5.4 に画面の分割およびその領域番号を示す. 領域ごとの特性を調査するにあたり, 青色にて示す領域を角, 緑色にて示す領域を端, 白色にて示す領域をその他と定義した.

実験 2 においては, カーソルは画面外に移動する際画面端にて停止することを念入りに伝え, 画面角や画面端のターゲットをポインティングする際にはカーソルの特徴を利用するよう教示を行った. すなわち, たとえば画面角のターゲットをポインティングする際にはそのターゲットの方向に大きく端末を傾けることによって細かい位置調整を行うことなくポインティングが可能であると教示を行った.

被験者には傾け操作を用いてカーソルの中心をターゲットに移動させ, カーソルをターゲッ

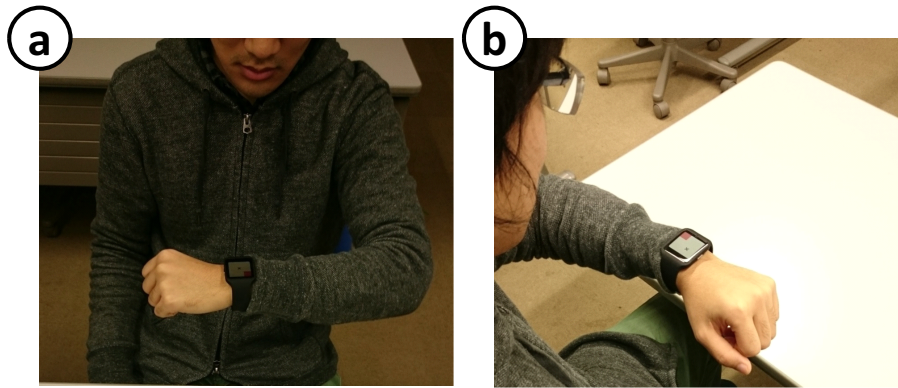


図 5.5: 実験中の姿勢. (a) 前方から見た様子. (b) 後方から見た様子.

トに重ねた状態にて画面の任意の位置をタップしてもらった. この1回のタップを1試行とした. この時被験者には, 精度を優先したうえで可能な限り素早く操作を行うよう教示を行った. ターゲットは一度タップを行うごとに, 画面内のランダムな位置に再表示された. 50試行を1セッションとし, 被験者には椅子に座った姿勢をとり, 左腕を宙に浮かせた状態にてタスクを行った. 実験中の姿勢を図5.5に示す. 被験者にはそれぞれの姿勢にて, 練習1セッションおよび本番2セッションの計3セッションを行ってもらったため, 被験者は合計450試行 ($3 \times 50 \times 3$) を行った.

被験者にはセッション間に, ポインティングを行いやすい, または行いにくいターゲットを理由付きで回答するよう指示を行った. また, 実験中には思ったことを口に出してもらうよう指示を行い, 逐次記録を行った. 全セッション終了後, 使用感についてのアンケートに回答してもらった. 実験およびアンケートの回答を合わせて被験者1人当たりの実験時間は合計で約1時間であり, 拘束時間に対する謝礼として1人当たり820円が支払われた.

5.2 実験結果

実験結果を示す. 結果には本番2セッション分のデータ2400試行分を用いた. なお, 試行時間に関して (平均 $\pm 3 \times$ 標準偏差) の範囲を外れる36試行を外れ値として除外した. これは実験中, 誤ってタッチパネルをタッチしてしまい, 意図しない場所に対してポインティングを行った被験者がいたためである.

各領域毎の試行時間およびエラー率を図5.6~5.8に示す. また, これらの試行時間を濃淡にて示した図を図5.9~5.11に示す. これらの試行時間について, 等分散性を調べるためバートレット検定を行った. 結果, 3×3 および 7×7 分割条件において $p < .05$ を示したため有意検定にクラスカル・ウォリス検定を, 5×5 分割条件については $p > .05$ を示したため分散分析を行った. 結果, すべての分割条件において $p > .05$ を示し, 領域間の有意差は見られなかった. 濃淡図を見ても, 極端に濃淡の差のある領域の組み合わせがないことから試行時間が領域にかかわらず一様であることがうかがえる.

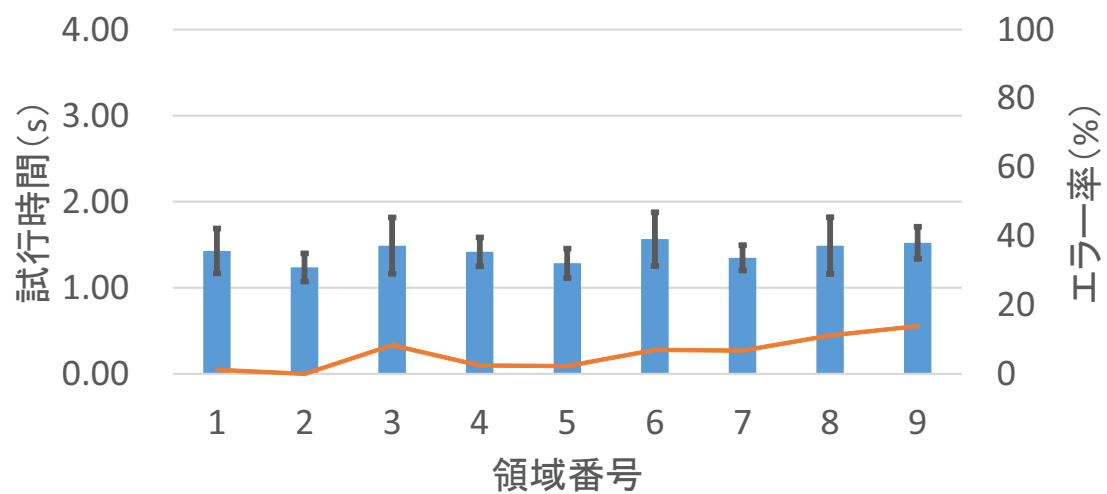


図 5.6: 3 × 3 分割条件における領域ごとの試行時間.

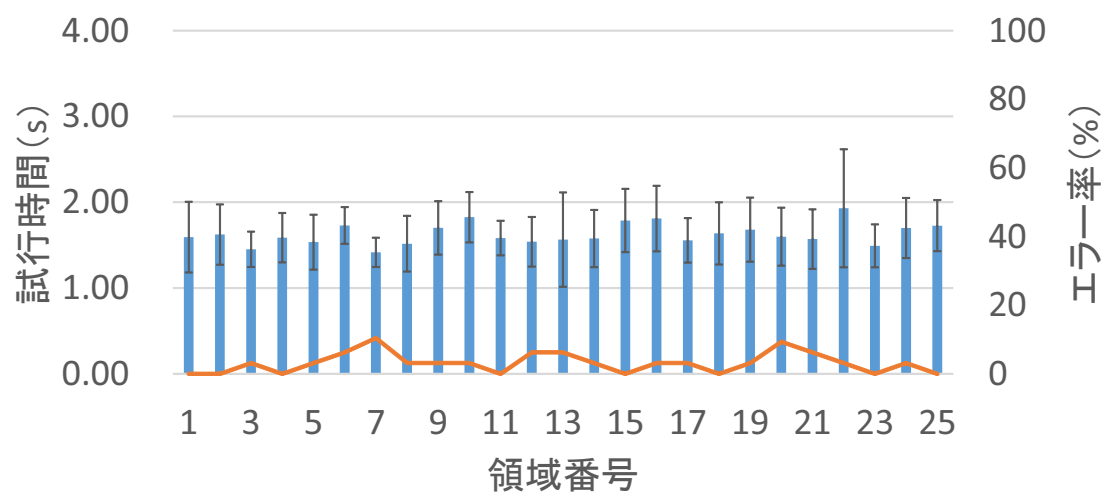


図 5.7: 5 × 5 分割条件における領域ごとの試行時間.

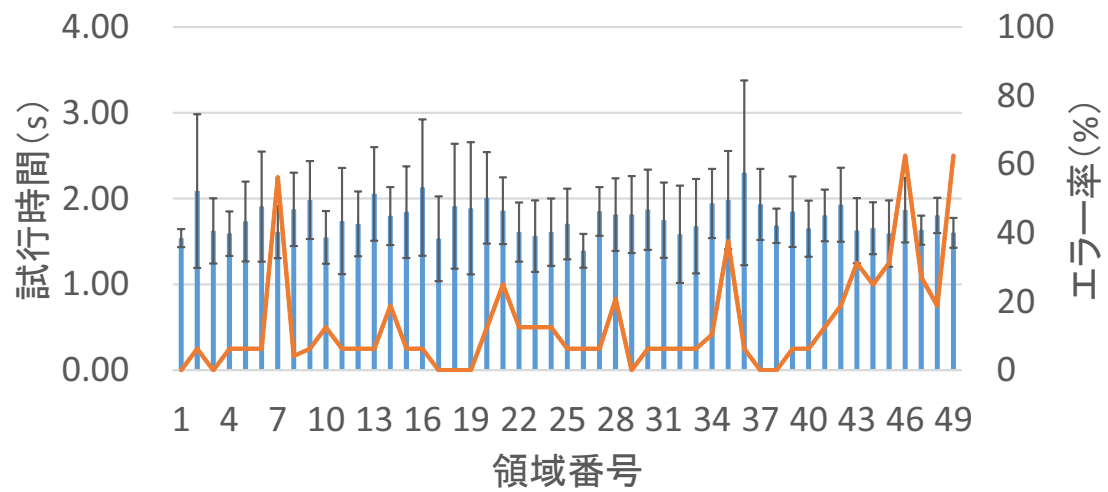


図 5.8: 7 × 7 分割条件における領域ごとの試行時間.

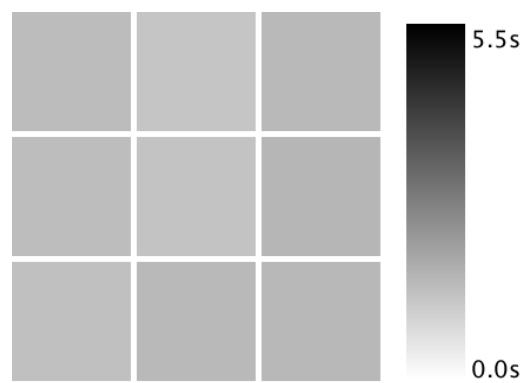


図 5.9: 3 × 3 分割条件における領域ごとの試行時間の濃淡図.

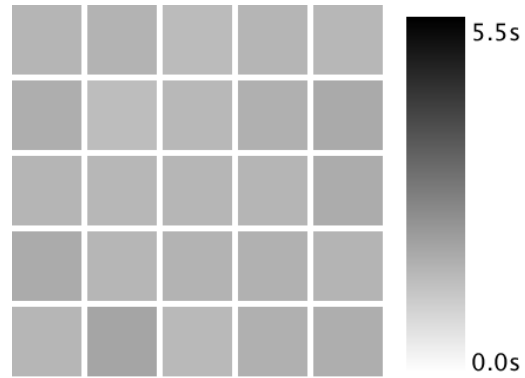


図 5.10: 5×5 分割条件における領域ごとの試行時間の濃淡図.

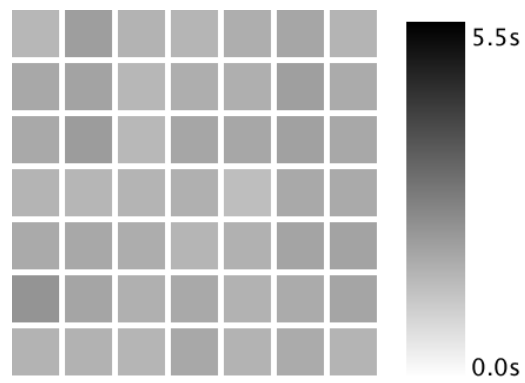


図 5.11: 7×7 分割条件における領域ごとの試行時間の濃淡図.

5.3 考察

被験者間の差，ターゲット位置および試行時間の関係，ターゲットの大きさおよび試行時間の関係についての考察を示す．

5.3.1 被験者間の差

有意検定を行った結果，すべての分割条件において有意差が見られなかった．これは被験者間の差が大きかったためであると考えられる．そこで被験者ごとの傾向を調べるため，各被験者の平均試行時間を各分割条件ごとに調査した．結果を図 5.12～5.14 に示す．それぞれの分割条件に対して，等分散性を調べるためバートレット検定を行った．結果，すべての分割条件において $p < .05$ を示したため，有意検定にクラスカル・ウォリス検定を，多重検定にスティール・ドゥワース検定を用いた．スティール・ドゥワース検定の結果， $p < .05$ を示した組み合わせに＊印を付した．検定の結果，被験者間の差が非常に大きいことが分かった．特に P3 および P7 は全ての分割条件においてほかの被験者よりも試行時間が長くなっている．

各被験者の特徴をとらえるため，それぞれの被験者について図 5.9～5.11 と同様の濃淡図を作成した．結果を図 5.15～5.17 に示す．P3 に関しては，実験後のアンケートにおけるカーソル速度，すなわち *cd_ratio* の 5 段階評価が全被験者中最も悪い 2 であったため，適切な *cd_ratio* を設定することにより改善される可能性がある．また P7 に関しては，ゲームにおける操作の習慣から，傾けた方向と逆方向にカーソルが動けばよりスムーズに操作できるとコメントしていた．実験中の観察からも，P7 が必要な方向と逆方向に腕を傾けてしまい操作に時間を要している場面がたびたび見られた．

5.3.2 カーソルの移動距離および試行時間の関係

カーソルの移動距離による試行時間の変化を図 5.18～5.20 に示す．このとき，ポインティングに成功した 741 (3×3 分割) + 765 (5×5 分割) + 687 (3×3 分割) = 2193 試行のみをデータとして用いた．分割条件ごとに相関係数を求めたところ，それぞれ 0.28, 0.26, 0.26 となりすべての分割条件において弱い相関が認められた．すなわち，全ての分割条件において，カーソルの移動距離が長くなると試行時間が長くなる傾向が見られた．

5.3.3 ターゲット位置および試行時間の関係

4.4.1 節にてあげた，ターゲット位置および試行時間の関係を図 5.21 に示す．各領域ごとに，試行時間について等分散性を調べるためバートレット検定を行った．結果，すべての分割条件において $p > .05$ を示したため，有意検定として分散分析を用いた．結果すべての分割条件において $p > .05$ を示したため，ターゲット位置間の有意差は見られなかった．

この原因として，画面の角や端を用いたためにカーソルの移動距離が大きくなっていることが考えられる．すなわち画面角や端を用いる際は，ターゲットにカーソルが入った瞬間に

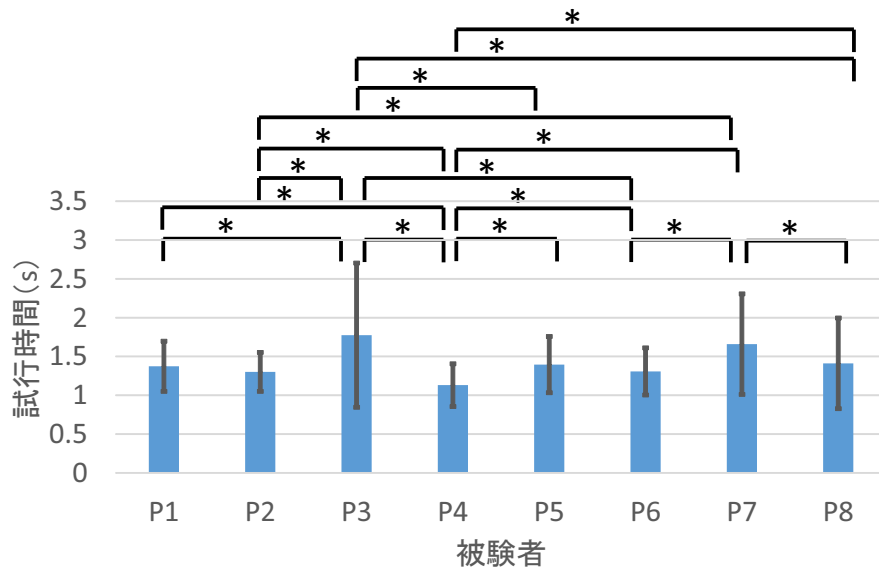


図 5.12: 3 × 3 分割条件における被験者ごとの試行時間。

タップを行うのではなく、カーソルがターゲットを横切るような動作を経たうえでポインティングを行うため、カーソルの移動距離が増加する。その移動距離の増加が5.3.2節にて示したように試行時間の増加の原因となり、結果的に画面内部のターゲットと同程度の試行時間となっていると考えられる。

また、被験者のコメントおよびアンケートにおいて、画面角や端を用いた際、カーソルを戻す際に画面角や端に吸い付くような印象を受けたと述べた被験者が3名（P3、P4、P7）おり、そのうちP7はその違和感から意図的に画面の角や端を使うことを避けていた。これは、基準角度に端末を傾けた際にカーソルが画面中央に位置するように実装を行ったためである。その結果、画面の角や端にてカーソルが静止するまで腕を傾けた場合、ある範囲の角度においては腕を基準角に向けて傾けてもカーソルの位置が変わらない、すなわちカーソルが画面の角や端に吸い付いているような挙動が発生することとなった。一方で画面角や端を積極的に利用し、その特性から内側の領域よりも画面角や端の方がポインティングが容易であると回答した被験者が5名おり、うち2名は画面角や端の挙動に違和感を覚えた被験者であった。これに加え内側の領域に比べて画面角や端の試行時間が有意に短い被験者も2名いるため、画面角や画面端にターゲットを配置する有用性が示唆された。各被験者ごとの各分割条件におけるターゲット位置および試行時間の関係を付録Cとして示す。

5.3.4 ターゲットの大きさおよび試行時間の関係

ターゲットの大きさおよび試行時間の関係を図 5.22 に示す。ターゲットの大きさには、各分割条件におけるターゲットの1辺の長さを用いた。従って、図の106.7pxは3 × 3 分割、64.0px

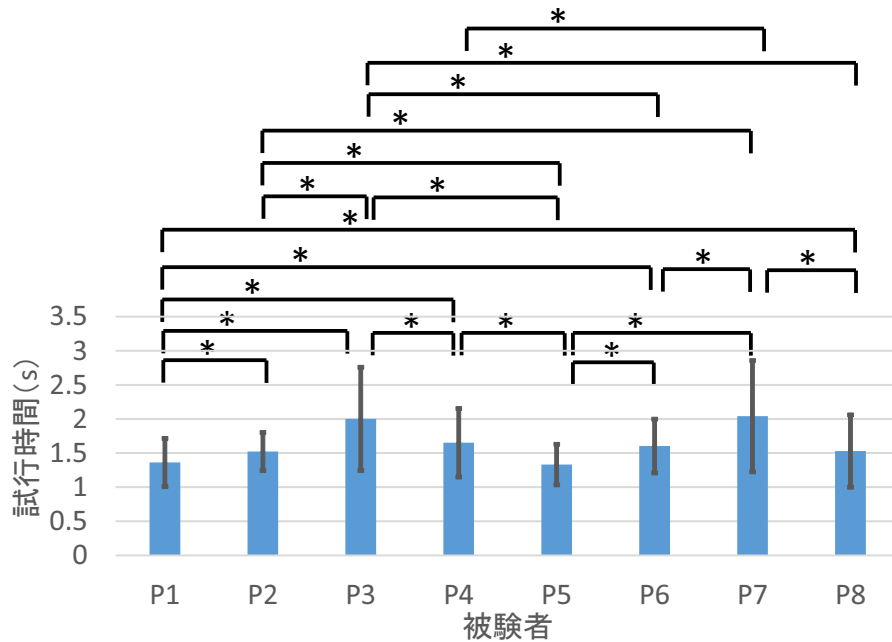


図 5.13: 5 × 5 分割条件における被験者ごとの試行時間.

は 5 × 5 分割, 45.7px は 7 × 7 分割条件をそれぞれ表している. この結果を線形近似した結果, $R^2 = 0.26$ すなわち $|R| > 0.50$ と高めの相関が示された. すなわち得られた線形近似式を用いることにより, ユーザに要求する試行時間からターゲットの大きさの指標を得ることが可能となった.

5.4 実験 2 についての議論

画面角および端へのターゲットの配置および傾け操作の身体的特性についての議論を示す.

5.4.1 画面角および端へのターゲットの配置

4.4.1 節にて, 画面端や角にて静止するカーソルの特性から, 画面角や端にターゲットを配置することの有用性が示唆された. すなわち, 例えば画面角にターゲットが存在する場合, ユーザはその方向に大きく腕を傾けることによって細かい操作を行うことなくターゲットをポインティングすることができる. しかし 3.1.3 節にて述べたように, 実験に用いたカーソルは基準角にて画面中央に表示されるよう実装されている. このため, 画面角や端を用いてポインティングを行った場合, 腕を基準角に戻しても少しの間カーソルが動かず, 画面角や端に吸い付くような印象を与えてしまい, 意図的に画面角や端を用いないように操作を行う被験者がいた (5.3.3 節). これに対する改良案を述べる. 現在の問題は $(x, y) = (160 + cd_ratio \times \sin \theta_x, 160 + cd_ratio \times \sin \theta_y)$

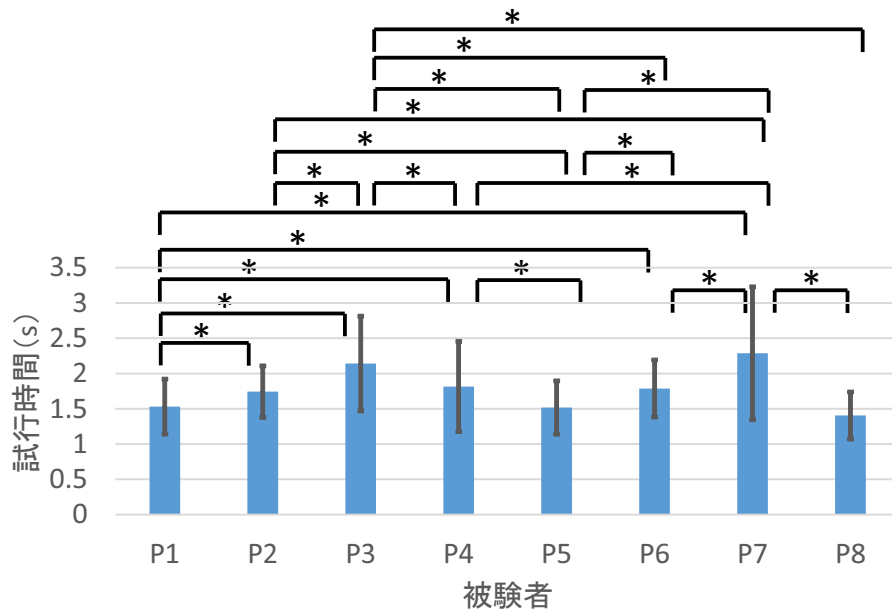


図 5.14: 7 × 7 分割条件における被験者ごとの試行時間.

にて表されるカーソル位置が画面の範囲外となることである。従って、アプローチとして (x, y) が画面外である場合、それが画面角もしくは画面端となるように cd_ratio もしくは基準角に対してキャリブレーションを行う方法を考える。具体的には以下の2手法が考えられる。

cd_ratio のキャリブレーション (x, y) が画面外となるのは、 cd_ratio が大きすぎるためであると考えられる。従って、 cd_ratio を動的に減少させることにより、画面外となった (x, y) を常に画面角もしくは画面端と扱うことが可能となる。具体的には、 x, y が画面外となるとき、その値が画面角もしくは画面端となるよう cd_ratio の値を変化させる。ただしこの場合、基準角を一定に保つことは可能であるが、傾け操作の範囲が変化しユーザに混乱を与える可能性がある。

基準角のキャリブレーション (x, y) が画面外となるのは、基準角の値によるものだと考えることができる。従って、基準角を動的に変更することによって画面外となった (x, y) を常に画面角もしくは画面端と扱うことが可能となる。具体的には、 x, y が画面外となるとき、その値が画面角もしくは画面端となるよう基準角の値を変化させる。ただしこの場合、傾け操作の範囲を一定に保つことは可能であるが、カーソルが画面中央に位置する際の腕の角度が変化しユーザに混乱を与える可能性がある。

これらのアプローチはどちらも利点および欠点をもつため、現在の手法と合わせて比較を行う必要がある。

5.4.2 傾け操作の身体的特性

実験 2 を通し、傾け操作の身体的特性が 2 点明らかになった。

y 軸方向の操作の容易性

実験 1 で困難であるとのコメントが得られた y 軸方向の操作であるが、実験 2 に参加した被験者 8 名は全員 x 軸方向よりも y 軸方向のほうが操作が容易であると回答した。全員が「y 軸方向の操作は手首を動かすだけでよいので、動きが少なく容易である」という旨をコメントした。

この理由として、実験 1 は実験 2 に比べ 1 回の試行時間が長く肘を動かす速度が遅かったため肘への負担が小さかったこと、および起立姿勢においては体全体を傾けることが可能であったため、肘を動かさずとも x 軸方向の傾け操作が可能であったことが考えられる。すなわち、素早くかつ部分的な身体の動きを用いて傾け操作を行う際には、y 軸方向の操作が x 軸方向の操作に比べて容易であるという仮説を立てることができる。この仮説を確かめるためには、両実験を同一の被験者に対して実施する必要がある。

x 軸方向の操作の非対称性

実験中ポインティングが容易であった領域および困難であった領域について回答を求めた結果、画面右側のポインティングが左側に比べて困難だと回答した被験者が 2 名いた。これについて 1 名の被験者は「左側はこぶしを上げる動きであり肘の動きのみで可能であるが、右側は肘とともに肩も動かさなければならないので困難だった」とコメントした。またもう 1 名は「デバイスの位置を動かさないように傾けようとしてしまうため、自然と肘を上げるような動作を行ってしまうため腕が辛くなる」とコメントした。一方で「左に傾ける時が最もやりにくく感じた」とコメントした被験者が 1 名いた。このように被験者に応じて操作の容易性が非対称となるのは 4.5 節の結果とも合致している。異常の結果から、傾け操作に用いることのできる範囲はユーザによって異なることが明らかとなった。従って、傾け操作に用いる角度の範囲は様々な被験者の特性を考慮し決定する必要性が示唆された。

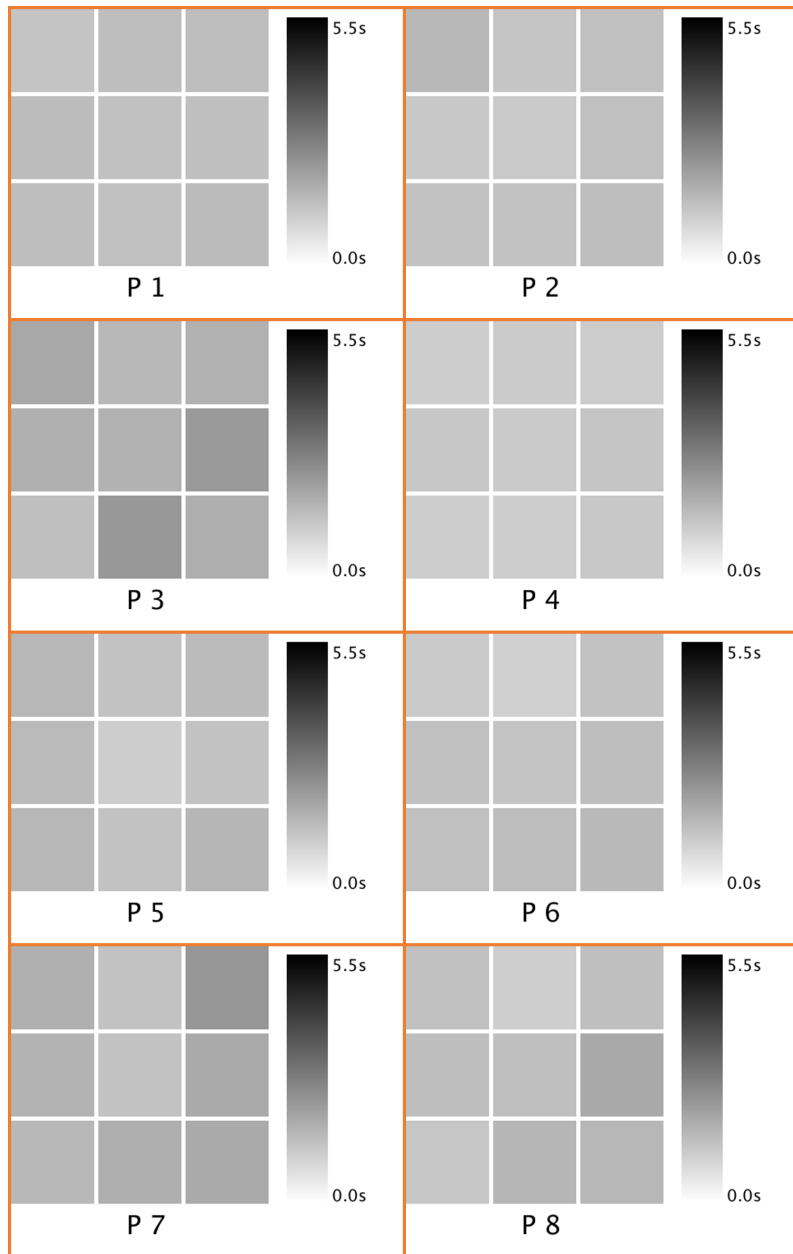


図 5.15: 3 × 3 分割条件における被験者ごとの試行時間の濃淡図.

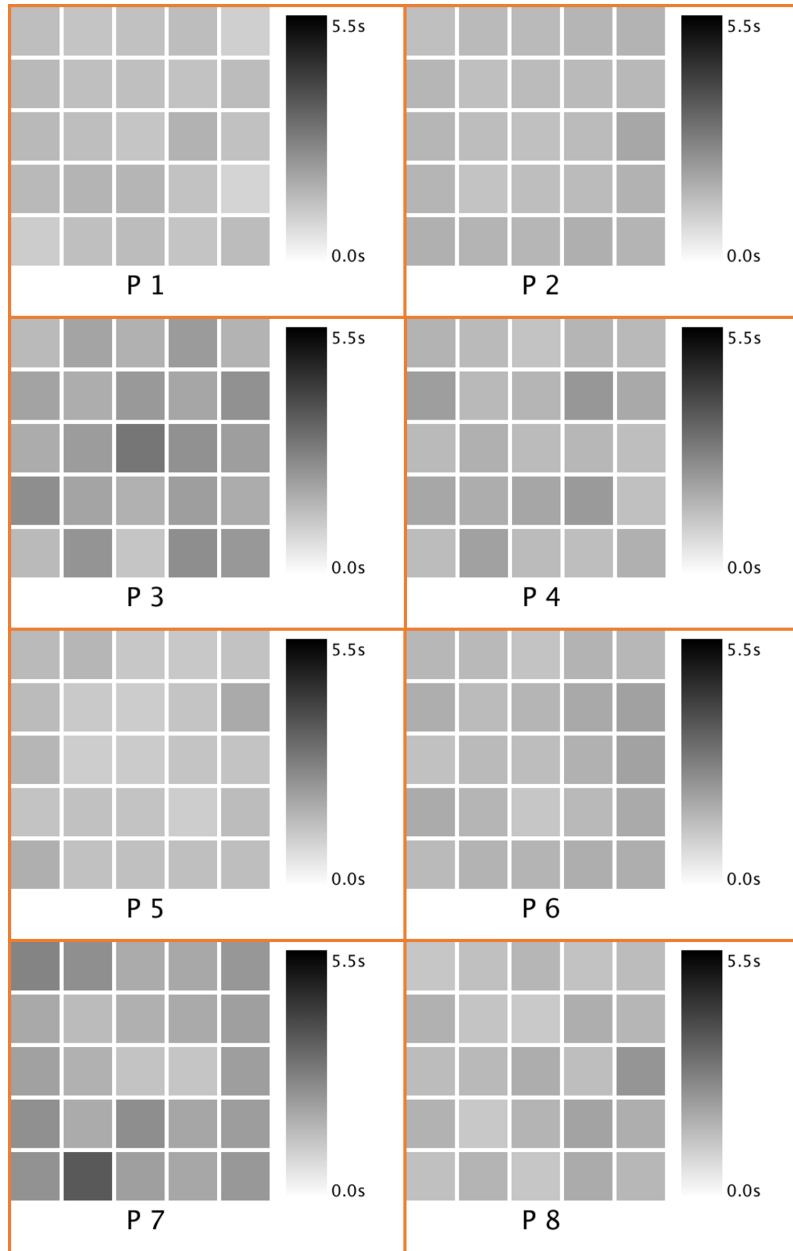


図 5.16: 5 × 5 分割条件における被験者ごとの試行時間の濃淡図.

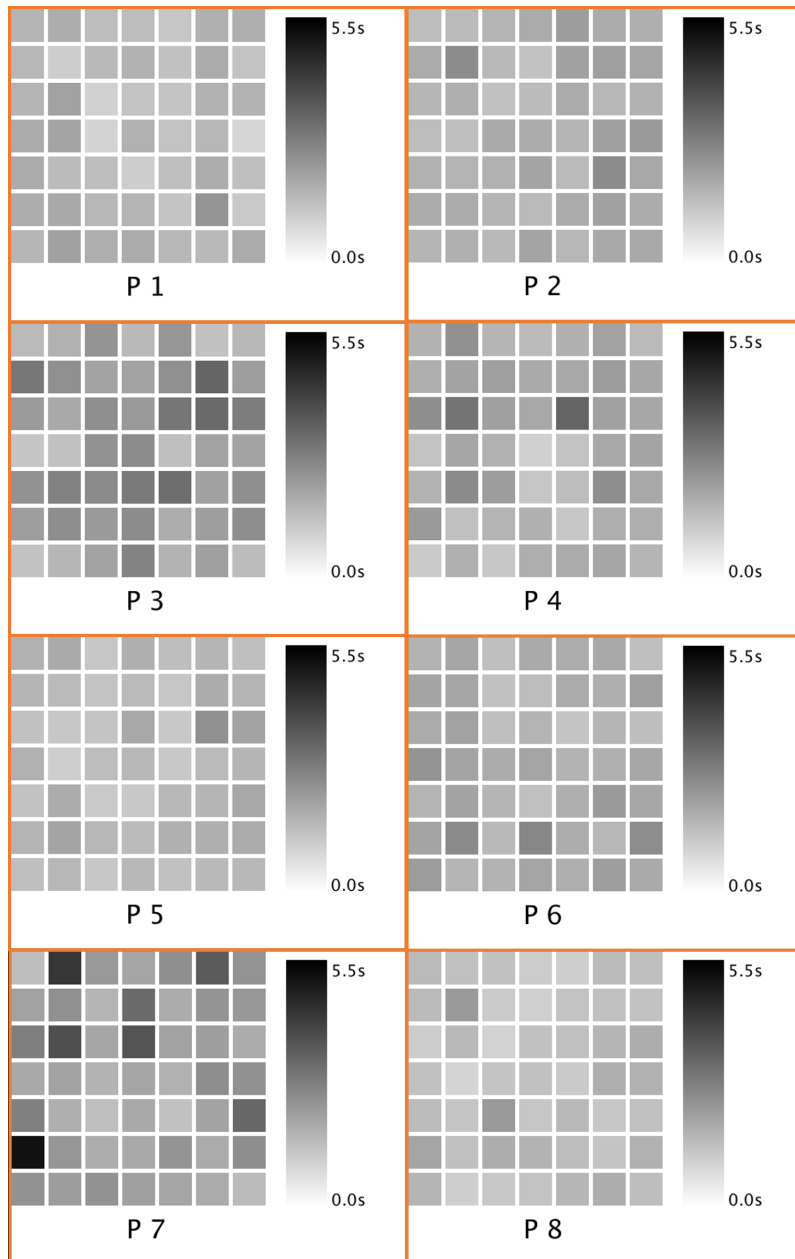


図 5.17: 7 × 7 分割条件における被験者ごとの試行時間の濃淡図.

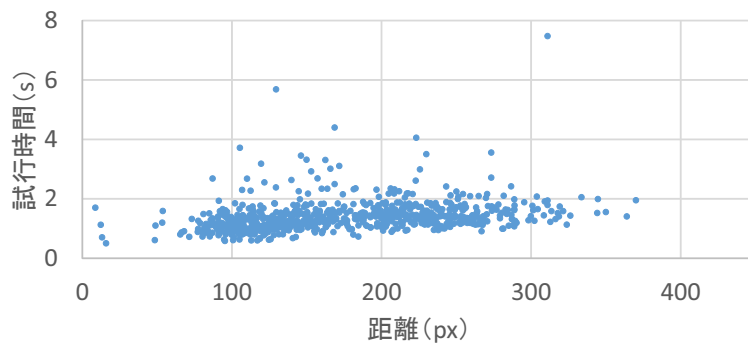


図 5.18: 3×3 分割条件におけるカーソルの移動距離および試行時間.

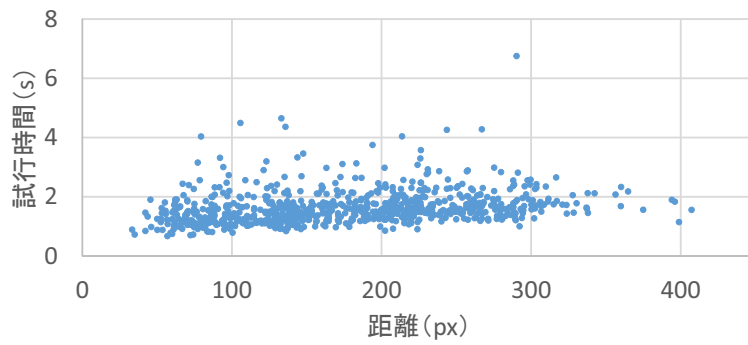


図 5.19: 5×5 分割条件におけるカーソルの移動距離および試行時間.

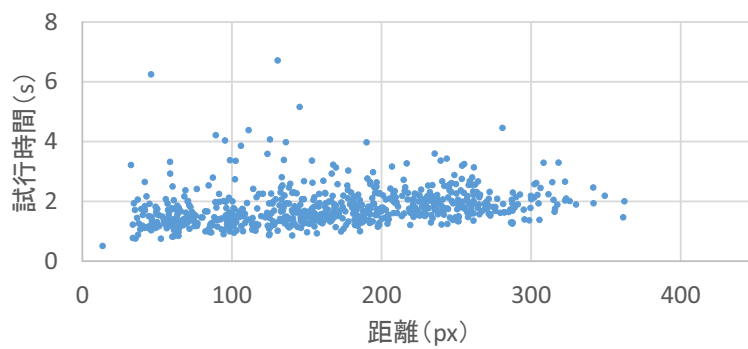


図 5.20: 7×7 分割条件におけるカーソルの移動距離および試行時間.

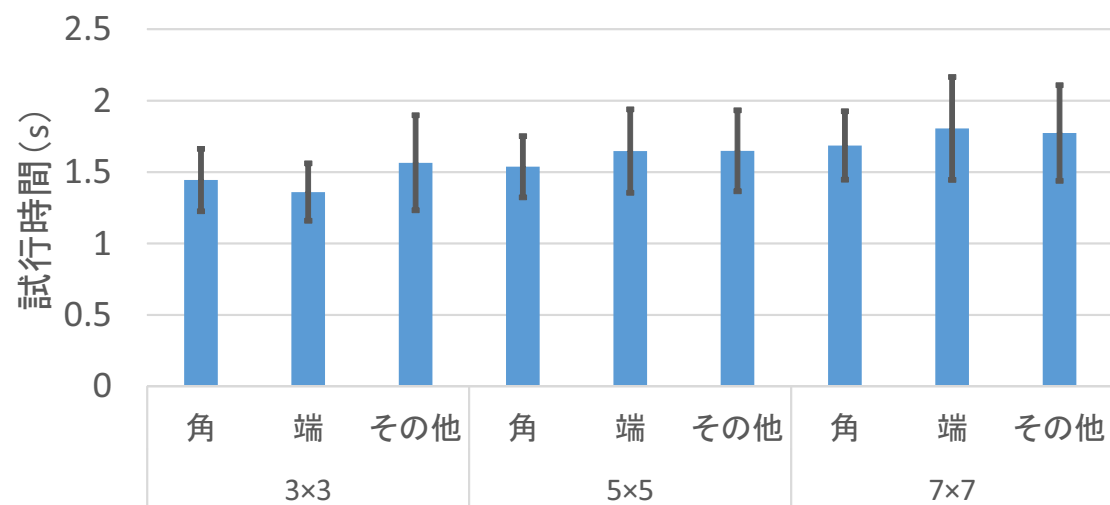


図 5.21: 各分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

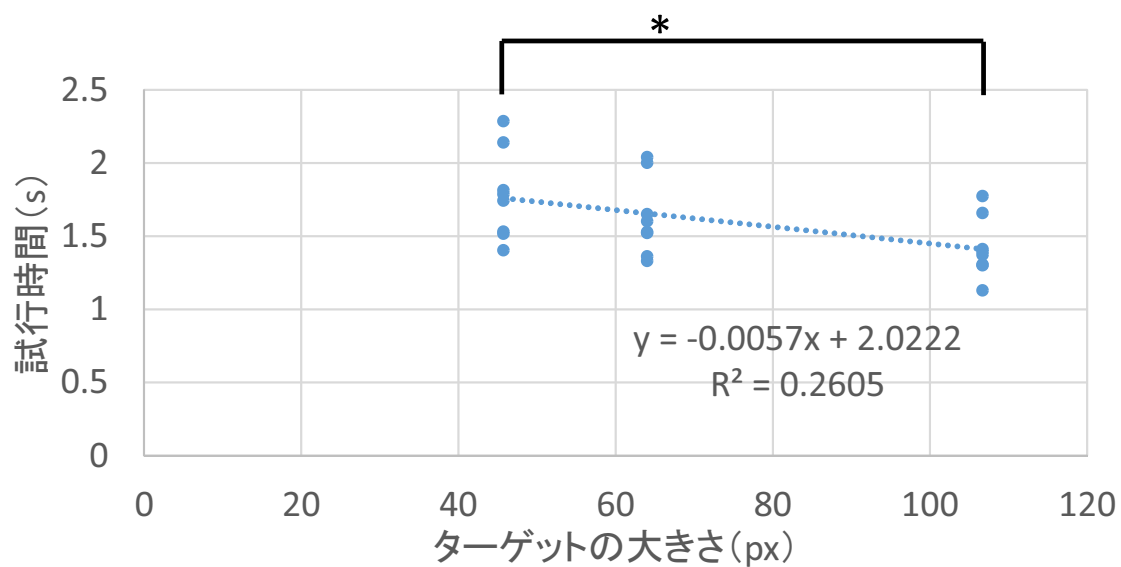


図 5.22: ターゲットの大きさごとの試行時間.

第6章 傾け操作の適用例

実験1, 実験2より得られた知見を元に, 傾け操作の設計指針を示す. また, その指針に従いスマートウォッチ向けの文字入力手法を実装し, 性能評価を行った.

6.1 設計指針

2つの実験から得られた知見を元に, 傾け操作の適用例としてソフトウェアキーボードを実装した. スマートウォッチは画面が小さいため, 指を用いたタップを用いて文字入力を行う場合には Fat Finger 問題 [SRC05] により入力が困難であり, 特にターゲット数が多く, またその大きさが小さくなりがちなソフトウェアキーボードを用いた文字入力はその問題が顕著になる. しかし傾け操作は実験1の結果から分かるように精度が高い, すなわち小さなターゲットの選択が可能であり, また指にて画面を遮蔽することがない.

実験から得られた設計指針を以下に示す.

- 実験1の結果より, y 軸方向の精度が悪いため, x 軸方向に比べ y 軸方向の *cd_ratio* を小さく設定する.
- 実験2のアンケートより, x 軸方向に比べ y 軸方向の操作が好まれたことから, y 軸方向に比べ x 軸方向の操作量が少なくなるようターゲットの配置を行う.

これらの指針を元に設計したソフトウェアキーボードを図6.1に示す. まず2つ目の指針より, キーの数が横方向よりも縦方向の方が多くなるように設計した. このとき, 横長配置である QWERTY キーボードに着目した. 横長である QWERTY キーボードを 90° 傾けることによって縦長キーボードとする手法に QAZ キーボード [箱田 14] が存在する. QAZ キーボードは縦長のキーボードを設計する際ユーザの学習コストを最小限にするため, QWERTY キーボードを反時計回りに 90° 回転させている. 本研究もそれにならい, QWERTY キーボードを反時計回りに 90° 回転させたキーボードをスマートウォッチ上に実装した. 文字入力に必要なスペースキーおよびエンターキーは図6.1aに示す位置に実装を行った. 本実装におけるキーは1辺が25.6pxの正方形であり, 実験2の結果より, このキーボードは1分間に27.5文字の速度での入力を見込むことが可能である.

本研究にて実装したキーボードは, 3.1.3節と同様のカーソルを用いてキーを選択する. 図6.1においては「Q」のキーが選択されており, 選択されたキーを赤く表示することによってユーザに対してフィードバックを与える. このキーボードにおけるカーソルの *cd_ratio* は1つ目の指針を元に, y 軸方向の *cd_ratio* が x 軸方向の *cd_ratio* より小さくなるよう設計した.

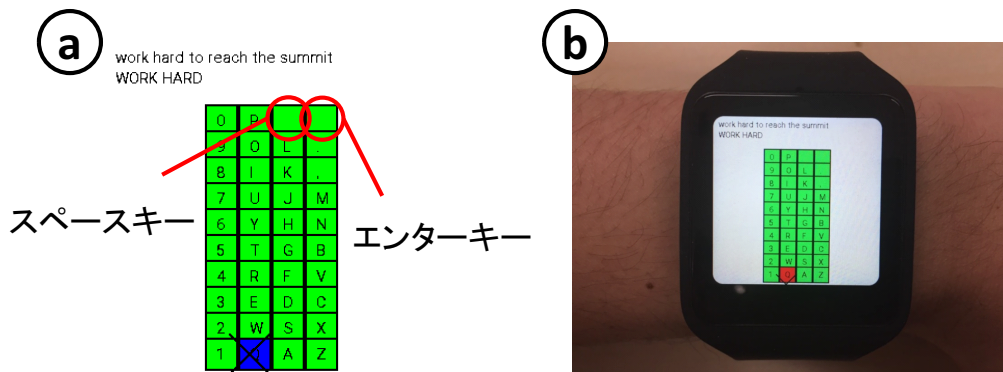


図 6.1: 傾け操作を用いて操作する縦型 QWERTY キーボード. (a) 実装したキーボードが表示された画面. (b) 実際に腕に装着した際の様子.

具体的には、今回実装したキーに対する要求入力精度を x 軸方向 0.32° 、y 軸方向 0.85° となるよう設計した。これは実験 1 の結果を考慮しても、十分な精度にて入力が可能な設計である。

スマートウォッチにおける文字入力手法は数多くの先行研究が存在する。これらの手法は端末を装着していない手によるタッチジェスチャを用いてスマートウォッチ上における文字入力を実現しており、両手による操作が必要となる。これらの手法に対する本研究の有用性として、キーの選択には端末を装着した腕のみを用いる、すなわち、片手にてキーの選択を行えることがあげられる。したがって、入力の決定操作をも端末を装着した手によって行うことができる。片手のみを用いた文字入力が可能となる。本研究では片手のみを用いた文字入力を実現するため、端末を装着した手に Bluetooth レシーバ (GH-BHARC) を持ち、中央の再生/停止ボタンの押下にて決定操作を行うこととした。すなわち、ユーザは非利き手に装着したスマートウォッチに対する傾け操作を用いてキーを選択し、非利き手に把持した Bluetooth レシーバの再生/停止ボタンの押下によって入力を決定することで、片手のみを用いた文字入力を行うことができる。提案手法を使用している様子を図 6.2 に示す。

6.2 性能評価

実装したキーボードの性能評価を行った。被験者は著者 1 名であった。タスクとして、5 つのフレーズを提案手法を用いて入力した。このときのフレーズとして、MacKenzie ら [MS03] によって提供されている 500 の英語のフレーズからランダムに 5 つを用いた。個々のフレーズはすべて小文字にて記述された単語からなり、句読点および数字を含まない。またフレーズ内の単語と単語の間は空白文字で区切られている。被験者はタスクを行う前に、提案手法を用いて混乱なく入力が行えるようになるまで練習を行った。

評価の指標として、文字入力速度の指標である 1 分あたりの文字入力速度 (Words Per Minute, WPM) [AS09] を用いた。これは 5 文字を 1 単語とした入力速度指標であり、本実験においては入力を求められたフレーズの空白を含めた文字数を用いて 1 フレーズ当たりの WPM を算



図 6.2: 提案手法による文字入力の様子.

出した.

実験の結果, 入力速度は 5.4WPM (=1 分間 27.0 文字) であり, ほぼ理論値の速度にて入力が可能であった. 同じくスマートウォッチ向けの文字入力手法である ZoomBoard[OHOW13] の 9.3WPM や Flickey[石井 15] の 8.8WPM (large 条件), ZShift[LSC⁺15] の 7.2WPM (large 条件) よりも入力速度は遅いが, これらの手法と異なり片手による文字入力を実現した. また, 本研究と同様にスマートウォッチに対する傾け操作を用いた文字入力手法である InclineType[GV15] の 6.0WPM よりも素早く入力を行うことが可能であった.

入力速度を向上させる方法として, スペースキーの配置が考えられる. 今回スペースキーを最上段に配置したが, この位置は頻出単語である冠詞の「a」や「the」の最終文字である「e」から遠い位置にあり, 長い距離のカーソル移動を多く求められることとなった. これは 5.3.2 節の結果から, 入力速度の低下に寄与していることが考えられる. 従って, スペースキーを従来の QWERTY キーボードと同様に「V」「B」「N」に隣接した位置に配置することによりカーソルの移動距離を減少させ, 入力速度を向上させることができると考えられる.

第7章 結論および今後の課題

本研究においては、腕に装着した超小型タッチパネル端末に対する傾け操作の特性を調査するため、傾け操作によって位置が決定されるカーソルを用いてポインティング実験を行った。その結果から、目的の角度に腕を傾ける際の精度がどのように分布するか、そしてターゲットの位置や大きさが操作にかかる時間にどのような影響を及ぼすかを調査した。結果、傾け操作の精度は 0.20° であり、ターゲットの大きさが操作時間に影響を与えることが判明した。またこれらの実験から得られた知見を元に傾け操作の設計指針として、x 軸方向に比べ y 軸方向の *cd_ratio* を小さく設定する、y 軸方向に比べ x 軸方向の操作量が少なくなるようターゲットの配置を行うという2つの設計指針を見出した。この指針に従い、スマートウォッチ向けの文字入力手法として縦型 QWERTY キーボードを実装し、性能評価を行った。結果、文字入力速度は 5.4WPM であった。今後は議論にて述べたソフトウェアキーボードを用いた性能評価実験を行い、本研究にて判明した知見がどの程度生かされているかの調査を行う。

謝辞

本研究を行うにあたり、指導教員である志築文太郎先生には、研究の進め方、論文執筆の方法、研究発表に関して数多くのご指導と助言をいただきました。また、田中二郎先生、高橋伸先生、嵯峨智先生には、チームこそ異なりますが、研究室内における発表練習の際にはチームの議論とは違った新たな視点から有益な助言を多数いただきました。三末和男先生には、現在は異なる研究室に属しておりますが、CSセミナー等にて様々なご指摘をいただきました。先生方に心より感謝申し上げます。

また、研究室の皆様には、研究活動および日常生活の両面において大変お世話になりました。3年間、切磋琢磨しあい、研究に励むことができました。加えて、度々、長時間の被験者実験にもご協力いただきありがとうございました。この場を借りて、心より感謝いたします。

家族には、経済面、精神面において幾度となく支えていただきました。心より感謝申し上げます。皆様のおかげでここまで研究を続けることができ、また、多くの方と出会う機会をいただきました。

友人たちには、1人暮らしで辛い思いをした際に支えていただきました。また、急なお願いにも関わらず、被験者として実験に協力していただきありがとうございました。この場を借りて、心よりお礼申し上げます。

最後になりましたが、大学生活を通じてお世話になった皆様に、心から感謝の気持ちと御礼を申し上げたく、謝辞に代えさせていただきます。

参考文献

- [AS09] Ahmed Sabbir Arif and Wolfgang Stuerzlinger. Analysis of text entry performance metrics. In *Proceedings of the IEEE Toronto International Conference on Science and Technology for Humanity*, pp. 100–105. IEEE, 2009.
- [BC12] Kevin Browne and Anand Christopher. An empirical evaluation of user interfaces for a mobile video game. *Entertainment Computing*, pp. 1–10, 2012.
- [CGF14] Xiang 'Anthony' Chen, Tovi Grossman, and George Fitzmaurice. Swipeboard: A text entry technique for ultra-small interfaces that supports novice to expert transitions. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, pp. 615–620, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [Che15] Wei-Hung Chen. Blowatch: Blowable and Hands-free Interaction for Smartwatches. *CHI EA '15*, pp. 103–108. ACM, 2015.
- [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. *CHI '15*, pp. 1499–1508. ACM, 2015.
- [CMBMS09] Andrew Crossan, Mark McGill, Stephen Brewster, and Roderick Murray-Smith. Head Tilting for Interaction in Mobile Contexts. *MobileHCI '09*, pp. 6:1–6:10. ACM, 2009.
- [CMSK07] Sung-Jung Cho, Roderick Murray-Smith, and Yeun-Bae Kim. Multi-context Photo Browsing on Mobile Devices Based on Tilt Dynamics. *MobileHCI '07*, pp. 190–197. ACM, 2007.
- [CWBMS08] Andrew Crossan, John Williamson, Stephen Brewster, and Rod Murray-Smith. Wrist Rotation for Interaction in Mobile Contexts. *MobileHCI '08*, pp. 435–438. ACM, 2008.
- [FC09] Stephen Fitchett and Andy Cockburn. Evaluating Reading and Analysis Tasks on Mobile Devices: A Case Study of Tilt and Flick Scrolling. *OZCHI '09*, pp. 225–232. ACM, 2009.

- [FWSS15] Rui Fukui, Masahiko Watanabe, Masamichi Shimosaka, and Tomomasa Sato. Hand Shape Classification in Various Pronation Angles using a Wearable Wrist Contour Sensor. Vol. 29, pp. 3–11. Taylor & Francis, 2015.
- [GCCV08] Paul Gilbertson, Paul Coulton, Fadi Chehimi, and Tamas Vajk. Using “Tilt” As an Interface to Control “No-button” 3-D Mobile Games. *Comput. Entertain.*, Vol. 6, No. 3, pp. 1–13, November 2008.
- [GV15] Timo Götzelmann and Pere-Pau Vázquez. Inclinetyping: An accelerometer-based typing approach for smartwatches. In *Proceedings of the XVI International Conference on Human Computer Interaction*, Interacción ’15, pp. 59:1–59:4, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [HBO05] Anders Henrysson, Mark Billinghurst, and Mark Ollila. Virtual object manipulation using a mobile phone. In *Proceedings of the 2005 International Conference on Augmented Tele-existence*, ICAT ’05, pp. 164–171, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [HHIL15] Jonggi Hong, Seongkook Heo, Poika Isokoski, and Geehyuk Lee. SplitBoard: A simple split soft keyboard for wristwatch-sized touch screens. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’15, pp. 1233–1236, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [HMB07] Anders Henrysson, Joe Marshall, and Mark Billinghurst. Experiments in 3d interaction for mobile phone ar. In *Proceedings of the 5th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australia and Southeast Asia*, GRAPHITE ’07, pp. 187–194, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [HPSH00] Ken Hinckley, Jeff Pierce, Mike Sinclair, and Eric Horvitz. Sensing Techniques for Mobile Interaction. *UIST* ’00, pp. 91–100. ACM, 2000.
- [Hyn12] Tuomas Hynninen. First-person shooter controls on touchscreen devices: A heuristic evaluation of three games on the iPod touch. In *Department of Computer Science*, M.Sc. Thesis. University of Tampere, 2012.
- [JAA⁺10] Eleanor Jones, Jason Alexander, Andreas Andreou, Pourang Irani, and Sriram Subramanian. Gestext: Accelerometer-based gestural text-entry systems. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’10, pp. 2173–2182, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [KD14] A. Komninou and M. Dunlop. Text input on a smart watch. *Pervasive Computing, IEEE*, Vol. 13, No. 4, pp. 50–58, Oct 2014.
- [Lab] Thalmic Labs. Myo Store - Thalmic Labs. <https://store.myo.com/>.

- [LKM07] Hyun-Jean Lee, Madhur Khandelwal, and Ali Mazalek. Tilting Table: A Movable Screen. TEI '07, pp. 93–96. ACM, 2007.
- [LSC⁺15] Luis A. Leiva, Alireza Sahami, Alejandro Catala, Niels Henze, and Albrecht Schmidt. Text entry on tiny qwerty soft keyboards. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 669–678, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [MM13] Stephania Medryk and Scott MacKenzie, I. A Comparison of Accelerometer and Touch-based Input for Mobile Gaming. In *Proceedings of the International Conference on Multimedia and Human-Computer Interaction - MHCI 2013*, pp. 117.1–117.8. International ASET, 2013.
- [MS03] I. Scott MacKenzie and R. William Soukoreff. Phrase sets for evaluating text entry techniques. In *CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '03, pp. 754–755, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [MT12] I. Scott MacKenzie and Robert J. Teather. Fittstilt: The application of fitts' law to tilt-based interaction. In *Proceedings of the 7th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Making Sense Through Design*, NordiCHI '12, pp. 568–577, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [OARSM15] Santiago Ortega-Avila, Bogdana Rakova, Sajid Sadi, and Pranav Mistry. Non-invasive Optical Detection of Hand Gestures. pp. 179–180. ACM, 2015.
- [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 SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, pp. 2799–2802, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [OO05] I. Oakley and S. O'Modhrain. Tilt to scroll: evaluating a motion based vibrotactile mobile interface. In *Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. World Haptics 2005. First Joint*, pp. 40–49, March 2005.
- [PCS⁺02] Kurt Partridge, Saurav Chatterjee, Vibha Sazawal, Gaetano Borriello, and Roy Want. TiltType: Accelerometer-supported Text Entry for Very Small Devices. UIST '02, pp. 201–204. ACM, 2002.
- [PKB06] Pekka Parhi, Amy K. Karlson, and Benjamin B. Bederson. Target size study for one-handed thumb use on small touchscreen devices. In *Proceedings of the 8th Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '06, pp. 203–210, New York, NY, USA, 2006. ACM.

- [Rek96] Jun Rekimoto. Tilting Operations for Small Screen Interfaces. UIST '96, pp. 167–168. ACM, 1996.
- [RGIS09] Mahfuz Rahman, Sean Gustafson, Pourang Irani, and Sriram Subramanian. Tilt Techniques: Investigating the Dexterity of Wrist-based Input. CHI '09, pp. 1943–1952. ACM, 2009.
- [SP09] H.H. Sad and F. Poirier. Evaluation and modeling of user performance for pointing and scrolling tasks on handheld devices using tilt sensor. In *Advances in Computer-Human Interactions, 2009. ACHI '09. Second International Conferences on*, pp. 295–300, Feb 2009.
- [SRC05] Katie A. Siek, Yvonne Rogers, and Kay H. Connelly. Fat Finger Worries: How Older and Younger Users Physically Interact with PDAs. pp. 267–280, 2005.
- [SSRG12] Dominik Schmidt, Julian Seifert, Enrico Rukzio, and Hans Gellersen. A Cross-device Interaction Style for Mobiles and Surfaces. DIS '12, pp. 318–327. ACM, 2012.
- [SWB02] Vibha Sazawal, Roy Want, and Gaetano Borriello. The unigesture approach one-handed text entry for small devices. In *Human Computer Interaction with Mobile Devices*, Vol. 2411 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 256–270. Springer Berlin Heidelberg, 2002.
- [TM14] Robert J. Teather and I. Scott MacKenzie. Position vs. Velocity Control for Tilt-based Interaction. GI '14, pp. 51–58. Canadian Information Processing Society, 2014.
- [Tog] Bruce Tognazzini. AskTog: A Quiz Designed to Give You Fitts. <http://www.asktog.com/columns/022DesignedToGiveFitts.html>.
- [VSF09] Luis Valente, Clarisse Sieckenius de Souza, and Bruno Feijó. Turn off the graphics: designing non-visual interfaces for mobile phone games. *Journal of the Brazilian Computer Society*, Vol. 15, pp. 45 – 58, 03 2009.
- [WB03] Daniel Wigdor and Ravin Balakrishnan. TiltText: Using Tilt for Text Input to Mobile Phones. UIST '03, pp. 81–90. ACM, 2003.
- [WKTA15] Mathias Wilhelm, Daniel Krakowczyk, Frank Trollmann, and Sahin Albayrak. ering: Multiple finger gesture recognition with one ring using an electric field. *WOAR '15*, pp. 7:1–7:6, 2015.
- [WZC06] Jingtao Wang, Shumin Zhai, and John Canny. Camera phone based motion sensing: Interaction techniques, applications and performance study. In *Proceedings of the*

19th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '06, pp. 101–110, New York, NY, USA, 2006. ACM.

- [XBR11] Yizhong Xin, Xiaojun Bi, and Xiangshi Ren. Acquiring and Pointing: An Empirical Study of Pen-tilt-based Interaction. CHI '11, pp. 849–858. ACM, 2011.
- [Zha04] Shumin Zhai. Characterizing computer input with fitts' law parameters: The information and non-information aspects of pointing. *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, Vol. 61, No. 6, pp. 791–809, December 2004.
- [原 14] 原清貴, 梅澤猛, 大澤範高. 腕時計型端末におけるズーム・スクロールを用いたタッチ入力. インタラクシオン 2014, pp. 317–320. 一般社団法人情報処理学会, 2014.
- [深津 13] 深津佳智, 箱田博之, 野口杏奈, 志築文太郎, 田中二郎. 凹凸付きスマートフォンケースにおけるタッチ精度の評価. 日本ソフトウェア科学会第 30 回大会論文集, pp. 325–335. 日本ソフトウェア科学会, 2013.
- [石井 15] 石井晃, 箱田博之, 志築文太郎, 田中二郎. Flickey: 超小型タッチパネル端末におけるフリック操作を活用した QWERTY キーボード. 情報処理学会研究報告, Vol.2015-HCI-164. 情報処理学会, 2015.
- [大西 07] 大西健史, 荒瀬由紀, 原隆浩, 上向俊晃, 西尾章治郎. 携帯電話ユーザのための加速度センサを用いた Web 閲覧システム. DEWS '07. 電子情報通信学会データ工学研究専門委員会, 2007.
- [塚田 02] 塚田浩二, 安村通晃. Ubi-finger : モバイル指向ジェスチャ入力デバイスの研究. 情報処理学会論文誌, Vol. 43, No. 12, pp. 3675–3684, 2002.
- [箱田 14] 箱田博之, 志築文太郎, 田中二郎. QAZ キーボード : タッチパネル端末向け縦型 QWERTY キーボード. 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 (WISS2014) , pp. 91–96. 日本ソフトウェア科学会, 2014.

付 録 A 実験 1 において使用した書類

第 4 章の実験 1 にて用いた書類を付録として以下に示す.

精度評価実験のお願い

文責：大西 主紗

この度は実験にご協力いただき、ありがとうございます。

- 本実験の目的は、タッチジェスチャチームにて提案された、「**腕に装着した超小型タッチパネル端末に対する傾け操作の精度評価**」です。
- 実験中に、写真および動画の撮影、音声の録音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、動画および音声を発表において利用する場合は、本人の確認を得た上で、研究目的においてのみ利用いたします。
- この実験によって得られたデータは、個人が特定できないように処理いたします。
- 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。
- 学内外において発表する論文に実験内容を利用することがありますが、いかなる場合においても協力者のプライバシーは保全されます。

平成 年 月 日

被験者	所属	署名
説明者	所属 システム情報工学研究科 CS 専攻	署名

実験に関する事前アンケート

文責：大西 主紗

1. 年齢，性別，利き手についてお答えください。

年齢： 歳 性別： 男・女 利き手： 右・左

2. 普段スマートウォッチ等のウェアラブルデバイスを使用していますか？

(例いスマートウォッチ 3)

3. 普段使用しているスマートフォンの機種は何ですか？

(例：iPhone4S, docomo Galaxy S II, docomo AQUOS PHONE ZETA SH-01F)

4. スマートフォンの利用歴はどのくらいですか？

 年 カ月

実験に関する説明

- スマートウォッチを傾ける操作を用いて、ターゲットにカーソルを合わせる操作（ポインティング）を行っていただきます。

- 実験のながれについて説明します。

準備

- 非利き手にスマートウォッチを装着してください。
- この時、スマートウォッチが手首にしっかり固定されるようバンドを調節してください。

タスク

- 以下の手順にてタスクを行っていただきます。
 1. スマートウォッチの画面を自然に視認できるような姿勢に左手を移動させてください。
 2. 画面の表示が「WAITING」から「READY」に変化します。
 3. 「READY」と表示された画面をタップすることで、タスクが開始されます。
 4. 左腕を傾けることにより、画面上に「×」として表示されるカーソルが移動します。
 5. カーソルを「○」として表示されるターゲットに移動させてください。
 6. ※このとき、カーソルとターゲットが完全に重なるよう努力してください。
 7. カーソルとターゲットが完全に重なっている状態にて、右手の人差し指を用いてスマートウォッチの画面をタップしてください。
 8. ※右手と左手が接触しないよう注意してください。
 9. 一定回数ポインティングを行うと、画面に「WAITING」と表示されます。
 10. 1-9 までを 1 タスクと呼びます。タスク間には休憩を取ることが可能です。
 11. 4 回（練習 2 回、本番 6 回）タスクを繰り返してください。
 12. 2 種類の姿勢（起立、着座）で 1-11 を行ってください。

記録

- それぞれの姿勢について、画面をどの程度傾けられるかを記録します。

アンケート

- 実験についてのアンケートに回答していただきます。

- スマートウォッチを傾ける操作を用いて、ターゲットにカーソルを合わせる操作（ポインティング）を行っていただきます。

- スマートウォッチを傾ける操作を用いて、ターゲットにカーソルを合わせる操作（ポインティング）を行っていただきます。

□ 以下に実験中の姿勢を示します。

起立

- 壁やイス等を用いて、体を支えることなく直立してください。
- 体等を用いて、左手の肘から先を支えないでください。

着座

- イスの背もたれに触れないよう、浅く腰掛けてください。
- 机や壁等を用いて、上半身を支えないでください。
- 体や足、机等を用いて、左手の肘から先を支えないでください。

実験に関するアンケート

文責：大西 主紗

1. それぞれの姿勢について教えてください

姿勢	順位	順位付けの理由
起立		
着座		

2. カーソルの速度はどうでしたか？

1・2・3・4・5

理由

アンケートは以上になります。ご協力ありがとうございました。

付 録 **B** 実験 2 において使用した書類

第 5 章の実験 2 にて用いた書類を付録として以下に示す.

**腕に装着した超小型タッチパネル端末に対する傾け操作の
特性調査実験のお願い**

文責：大西 主紗

この度は実験にご協力いただき、ありがとうございます。

- 本実験の目的は、タッチジェスチャチームにて提案された、「**腕に装着した超小型タッチパネル端末に対する傾け操作の特性調査**」です。
- 実験中に、写真および動画の撮影、音声の録音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、動画および音声を発表において利用する場合は、本人の確認を得た上で、研究目的においてのみ利用いたします。
- この実験によって得られたデータは、個人が特定できないように処理いたします。
- 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。
- 学内外において発表する論文に実験内容を利用することがありますが、いかなる場合においても協力者のプライバシーは保全されます。

平成 年 月 日

被験者	所属 _____	署名 _____
説明者	所属 システム情報工学研究科 CS 専攻 _____	署名 _____

実験に関する事前アンケート

文責：大西 主紗

1. 年齢，性別，利き手についてお答えください。

年齢： 歳 性別： 男・女 利き手： 右・左

2. 普段スマートウォッチ等のウェアラブルデバイスを使用していますか？

(例いスマートウォッチ 3)

3. 普段使用しているスマートフォンの機種は何ですか？

(例：iPhone4S, docomo Galaxy S II, docomo AQUOS PHONE ZETA SH-01F)

4. スマートフォンの利用歴はどのくらいですか？

 年 カ月

実験に関する説明

- スマートウォッチを傾ける操作を用いて、ターゲットにカーソルを合わせる操作（ポインティング）を行っていただきます。

- 実験のながれについて説明します。

準備

- 非利き手にスマートウォッチを装着してください。
- この時、スマートウォッチが手首にしっかり固定されるようバンドを調節してください。

タスク

- 以下の手順にてタスクを行っていただきます。
 1. スマートウォッチの画面を自然に視認できるような姿勢に左手を移動させてください。
 2. 画面の表示が「WAITING」から「READY」に変化します。
 3. 「READY」と表示された画面をタップすることで、タスクが開始されます。
 4. 左腕を傾けることにより、画面上に「×」として表示されるカーソルが移動します。
 5. カーソルを赤い■として表示されるターゲットに移動させてください。
 6. カーソルの中心とターゲットが重なっている状態にて、右手の人差し指を用いてスマートウォッチの画面をタップしてください。
※右手と左手が接触しないよう注意してください。
※4-6の動作を「ポインティング」と呼びます。
 7. 50回ポインティングを行うと、画面に「WAITING」と表示されます。
 8. 1-9までを1セッションと呼びます。セッション間には最低2分間の休憩をとっていただきます。
 9. 3回（練習1回、本番2回）タスクを繰り返してください。
 10. 実験中感じた事について、調査を行います
 11. 1-11を、3種類のターゲットサイズ条件にて行っていただきます。

アンケート

- 実験についてのアンケートに回答していただきます。

以下に実験中の姿勢を示します。

- イスの背もたれに触れないよう、浅く腰掛けてください。
- 机や壁等を用いて、上半身を支えないでください。
- 体や足、机等を用いて、左手の肘から先を支えないでください。

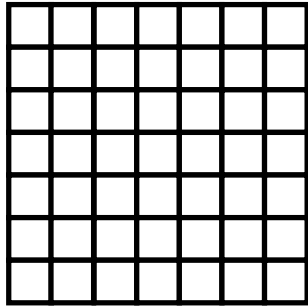
実験に関するアンケート

文責：大西 主紗

1. 出現したターゲットのうち、ポインティングが容易であったターゲットに○を、困難だったターゲットに×をつけてください。

理由

理由



理由

2. カーソルの速度はどうでしたか？

1・2・3・4・5

理由

3. 縦方向と横方向どちらが動かしやすかったですか？

縦・横

理由

アンケートは以上になります。ご協力ありがとうございました。

付 録 C 実験 2 における，各被験者ごとの各分割条件におけるターゲット位置および試行時間の関係

実験 2 における，各被験者ごとの各分割条件におけるターゲット位置および試行時間の関係を図 C.1～C.24 に示す．このとき，各領域ごとに，試行時間について等分散性を調べるためバートレット検定を行った． $p > .05$ を示したたものについては有意検定に分散分析を用い，多重比較にテューキーの検定を用いた．それ以外のものについては有意検定にクラスカル・ウォリス検定を，多重比較に多重検定にスティーラー・ドゥワース検定を用いた．多重検定の結果， $p < .05$ となった組み合わせに * 印を付した．

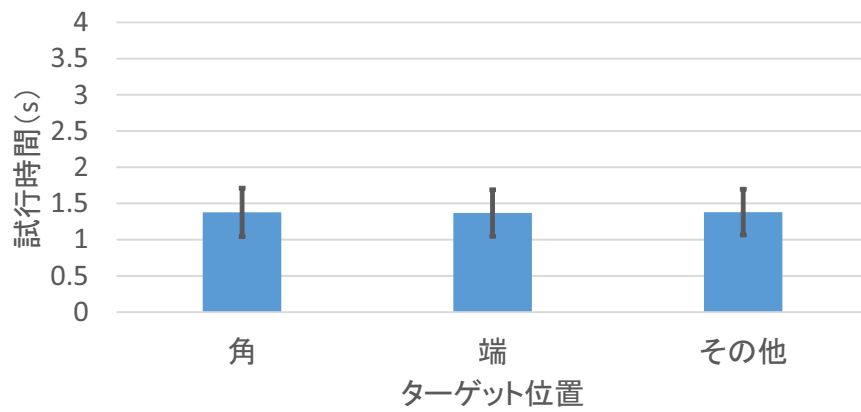


図 C.1: P1 の 3 × 3 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

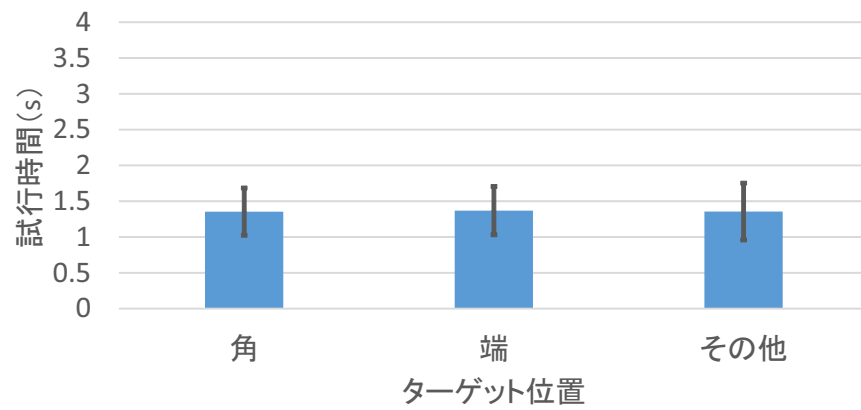


図 C.2: P1 の 5 × 5 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

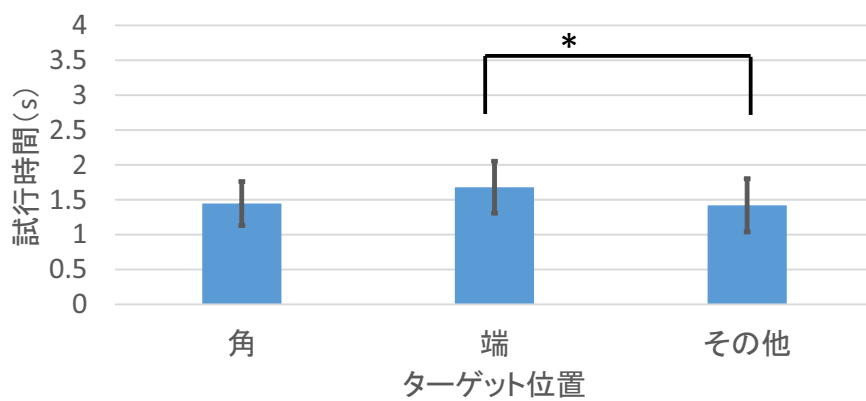


図 C.3: P1 の 7 × 7 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

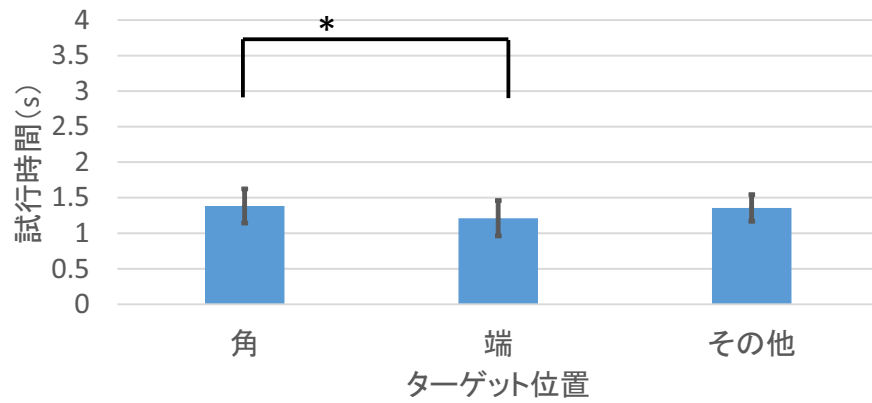


図 C.4: P2 の 3×3 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

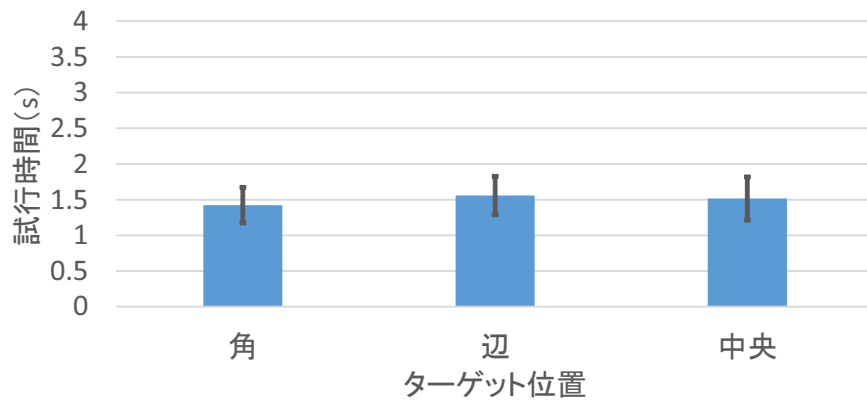


図 C.5: P2 の 5×5 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

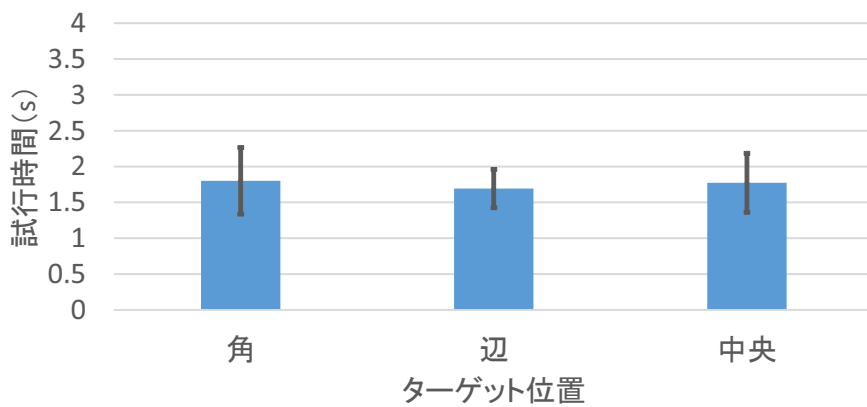


図 C.6: P2 の 7×7 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

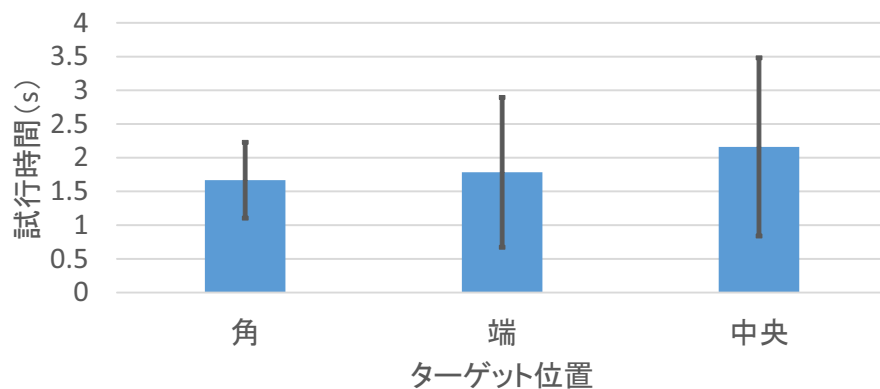


図 C.7: P3 の 3×3 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

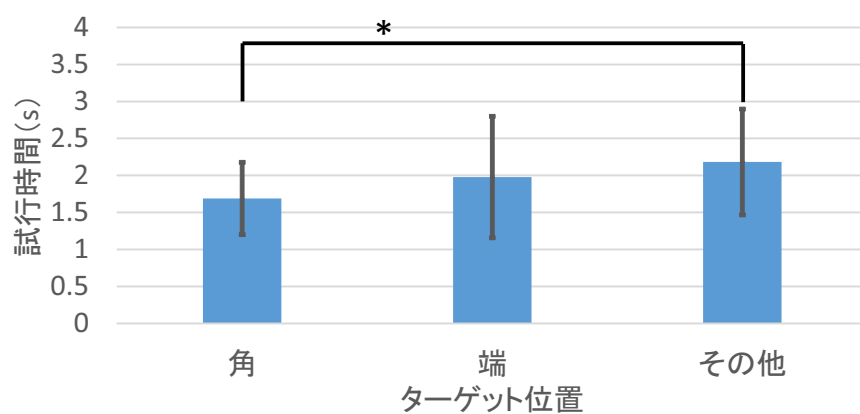


図 C.8: P3 の 5×5 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

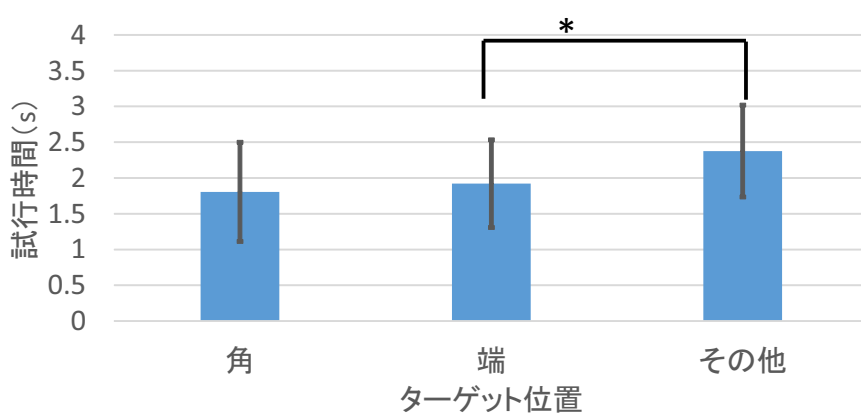


図 C.9: P3 の 7×7 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

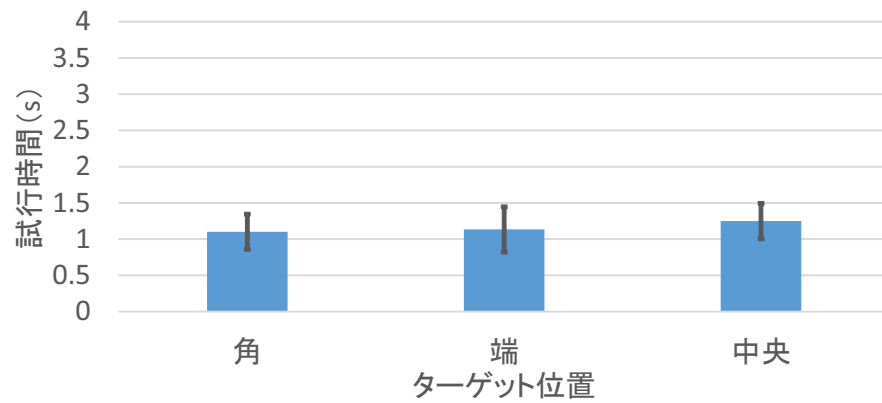


図 C.10: P4 の 3 × 3 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

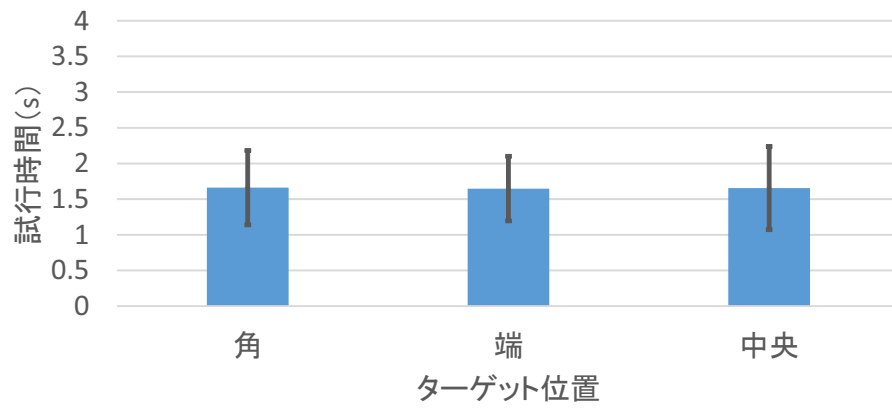


図 C.11: P4 の 5 × 5 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

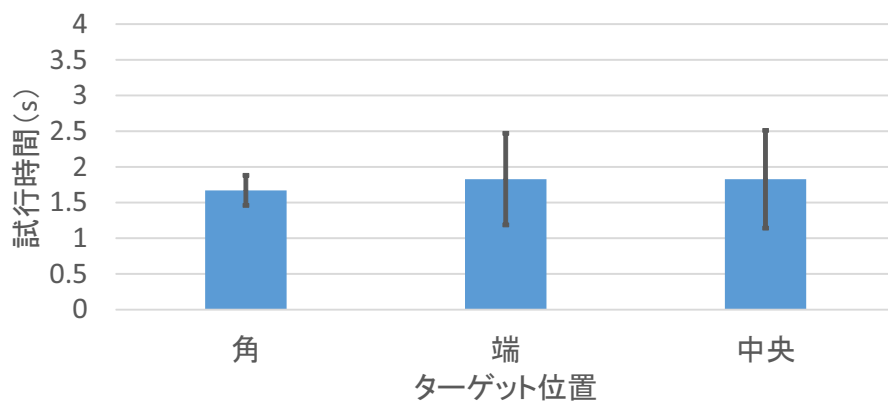


図 C.12: P4 の 7 × 7 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

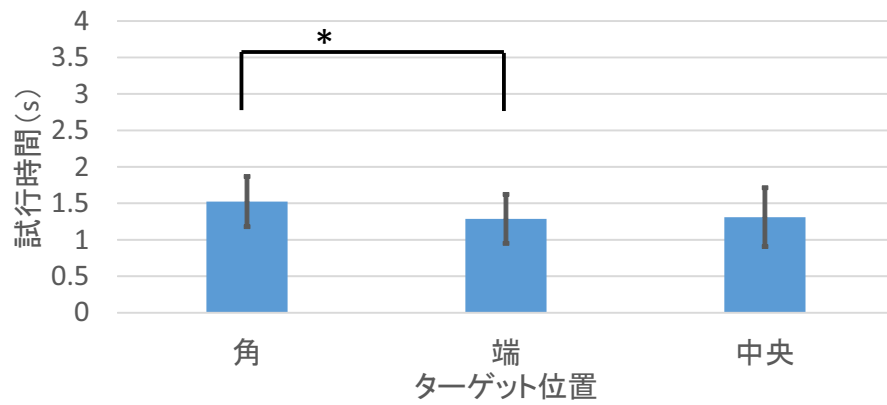


図 C.13: P5 の 3×3 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

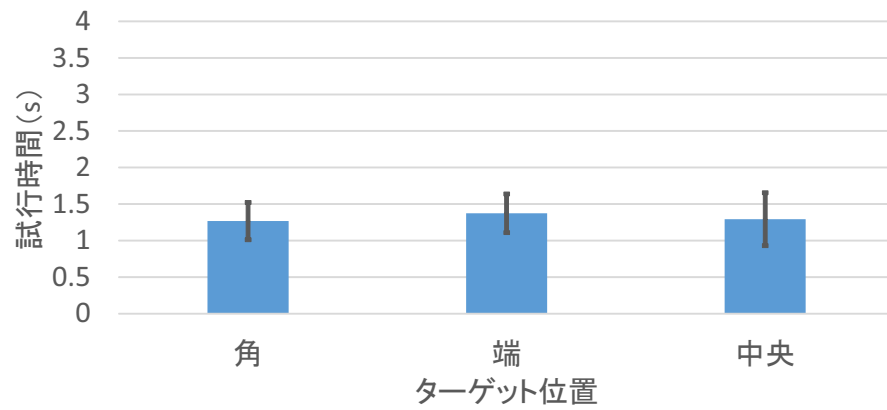


図 C.14: P5 の 5×5 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

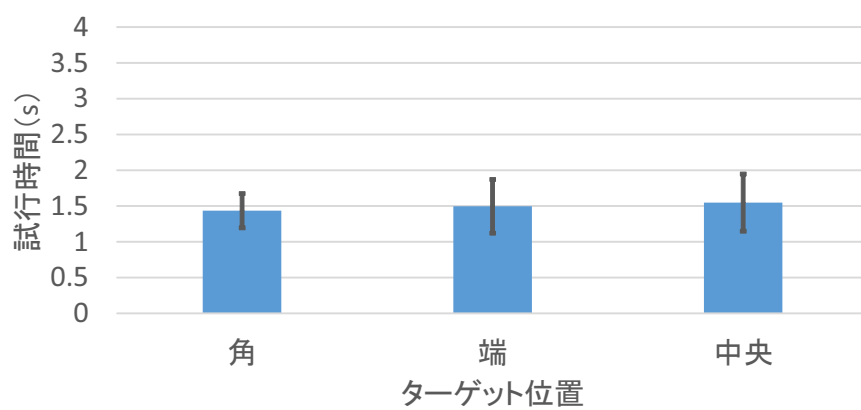


図 C.15: P5 の 7×7 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

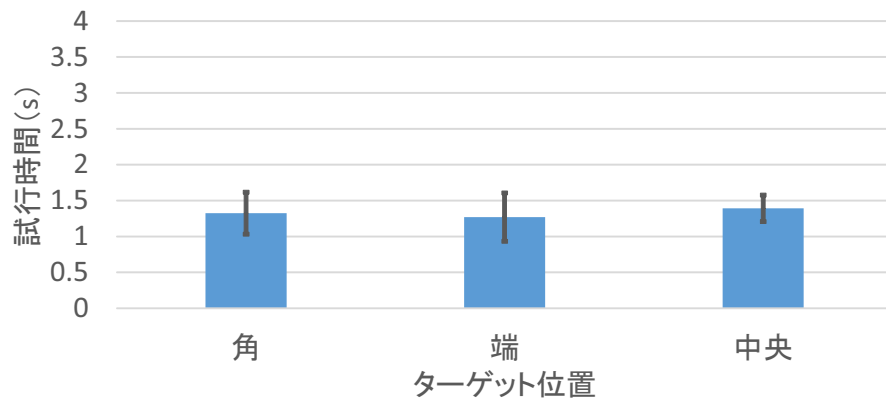


図 C.16: P6 の 3×3 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

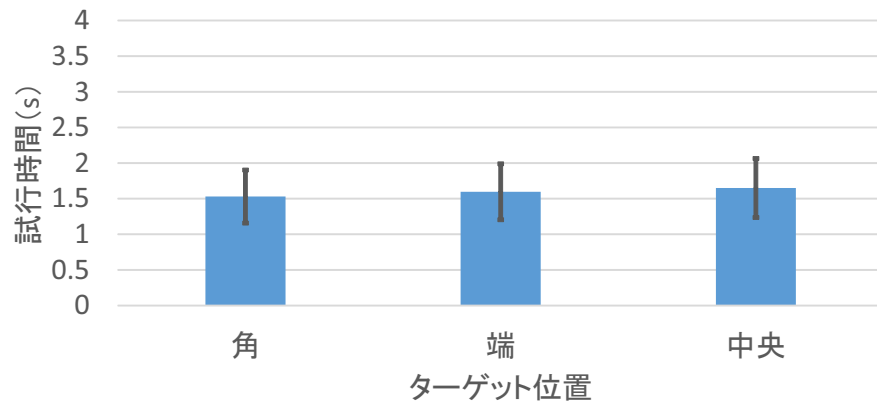


図 C.17: P6 の 5×5 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

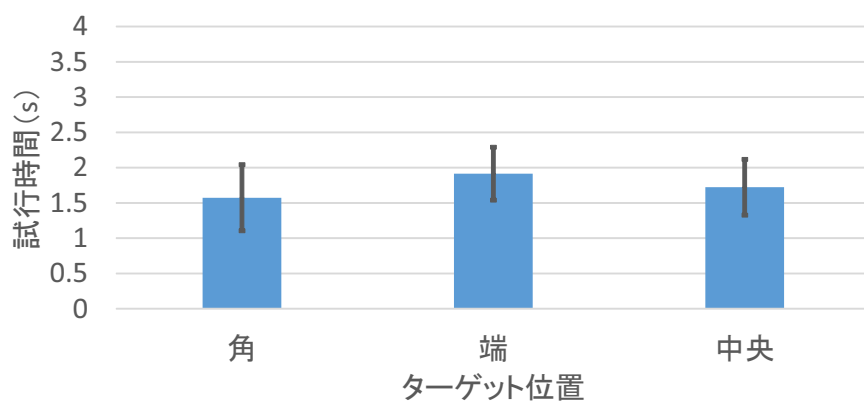


図 C.18: P6 の 7×7 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

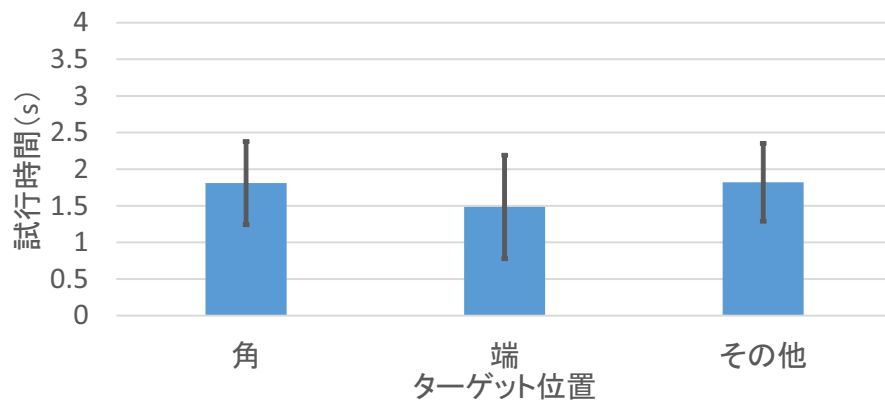


図 C.19: P7 の 3 × 3 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

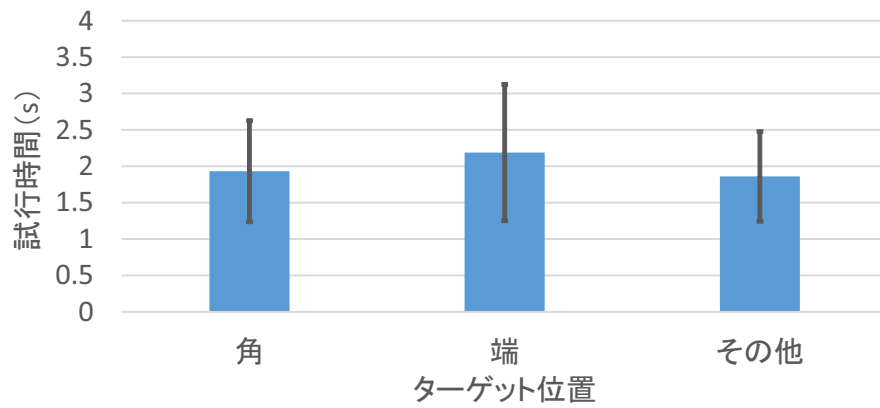


図 C.20: P7 の 5 × 5 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

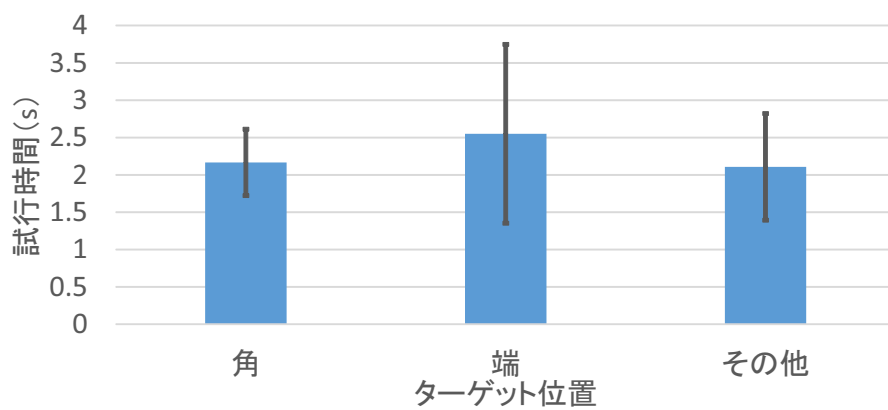


図 C.21: P7 の 7 × 7 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

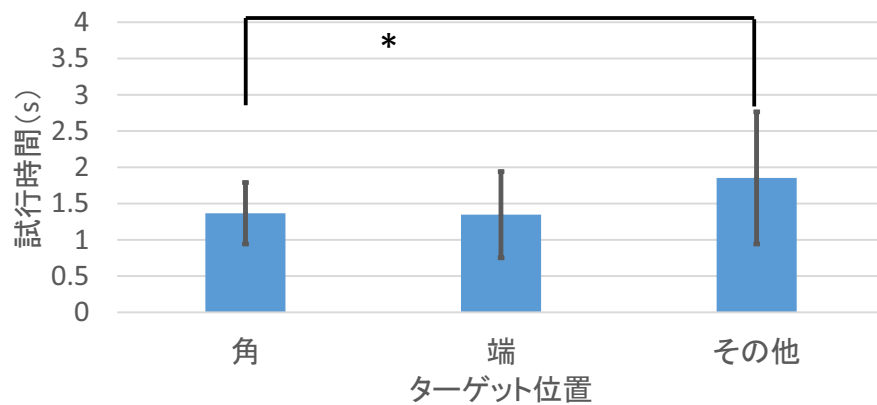


図 C.22: P8 の 3×3 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

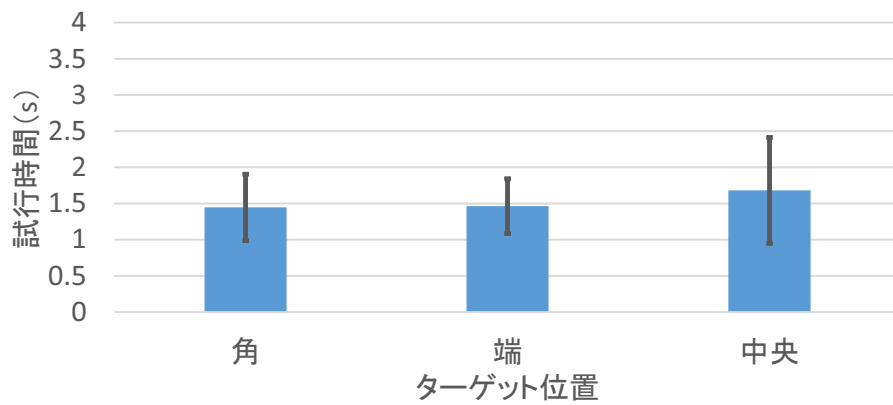


図 C.23: P8 の 5×5 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.

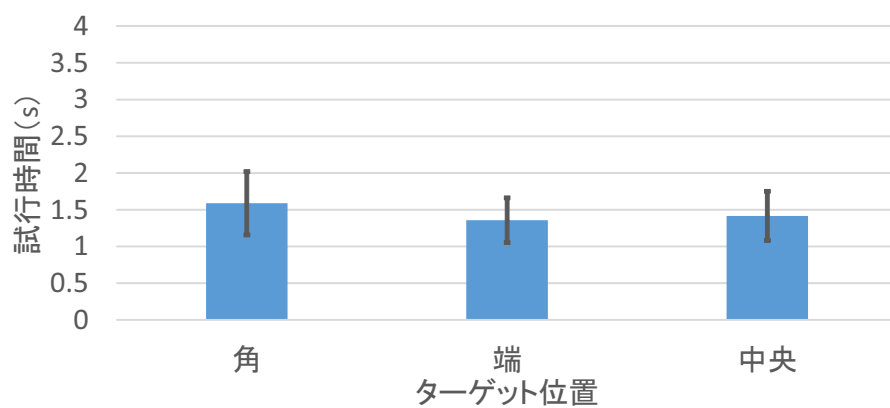


図 C.24: P8 の 7×7 分割条件におけるターゲット位置ごとの試行時間.