

筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

卒業研究論文

フィッツの法則に基づく視線を用いた
ターゲット選択手法

礒本 俊弥

指導教員 志築 文太郎

2018年 1月

概要

フィッツの法則に基づく視線を用いたターゲット選択手法を実現する。本手法を用いることにより視線を用いた操作手法において凝視に要する時間を短縮できる。本手法は、フィッツの法則から推測される視線移動に要する時間と実際の視線移動に要する時間を比較し、その差が小さい時にターゲット選択を行う。本手法は、ターゲット選択のための視線移動がフィッツの法則に従っていることを前提とするため、まず、この関係を調査した。調査の結果、エラー修正を行った後の寄与率 r^2 が 0.90 であった。その後、実験結果を用いて本手法の設計を行い、評価実験を行った。結果、ターゲット選択時の凝視に要する時間は先行研究と比較し 80%以上減少し、ミダスタッチ問題が生じる割合は、10%であった。本研究においては、本手法の概要、実装を行うための実験、実装方法および評価実験を述べる。また、本手法の改善点および今後の展望を述べる。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	目的とアプローチ	1
1.3	貢献	2
1.4	本論文の構成	2
第2章	関連研究	4
2.1	視線と他の操作手法を組み合わせた研究	4
2.2	視線と凝視を用いた研究	5
2.3	視線の動きのみを用いた研究	5
2.4	フィッツの法則と視線を用いた操作手法の関係	6
2.5	本研究の位置づけ	7
第3章	本手法の概要	8
3.1	フィッツの法則	8
3.2	フィッツの法則に基づく視線を用いたターゲット選択手法	9
第4章	実験1：フィッツの法則と視線を用いた操作手法の関係	10
4.1	目的	10
4.2	機器	10
4.3	実験参加者	10
4.4	収集データ	12
4.5	手順	12
4.6	結果	14
4.6.1	エラー修正	16
4.6.2	視線を用いたターゲット選択のフィッツの法則への寄与率	16
第5章	実装	21
5.1	概要	21
5.2	視線移動の検出	21
5.3	定数決定のためのキャリブレーション	22
第6章	実験2：本手法の性能評価	23

6.1	目的	23
6.2	機器	23
6.3	実験参加者	25
6.4	収集データ	25
6.5	手順	25
6.6	結果	27
6.6.1	凝視に要する時間	29
6.6.2	ミダタッチ問題	32
第7章	議論	35
7.1	本手法の制限	35
7.2	フィッツの法則と視線を用いた操作手法	35
7.3	定数決定のためのキャリブレーションの自動化	36
第8章	今後の展望	37
8.1	操作手法の拡張	37
8.2	フィッツの法則を用いた動くおよび変形するターゲットの選択	37
第9章	おわりに	39
	謝辞	40
	参考文献	41
付録A	実験1に用いた各種書類	46
A.1	実験同意書	47
A.2	実験前アンケート	48
A.3	実験中アンケート	49
付録B	実験2に用いた各種書類	54
B.1	実験同意書	55
B.2	実験前アンケート	56
B.3	実験中アンケート	57
B.4	意図した選択をすることが難しかったおよび選択が出来なかったターゲットの位置に関するアンケート	61
B.5	手法比較アンケート	62

目次

3.1	フィッツの法則の概要	9
4.1	実験 1 の実施環境	11
4.2	マルチディレクショナルポインティングタスク. 赤色の円は実験参加者が視線を移すターゲットを示す. ターゲット周囲の数字および矢印はターゲットの表示順序を示す	13
4.3	実験時に行ったアンケート結果	15
4.4	視線-ターゲット間の距離と時間の関係. 赤色のグラフは誤認識が生じた際の試行を表す. 青色のグラフは正常な試行を示す. 緑色の領域は視線がターゲットに近づいている最中の関係を示し, 黄色の領域は注視が行われている領域を示す	17
4.5	全体および各実験参加者毎のエラー修正前後の r^2 . 青色のグラフはエラー修正前の r^2 を示し, 赤色のグラフはエラー修正後の r^2 を示す	18
4.6	式 4.2 を d 用いて計算された MT と実際に視線移動に要した時間の関係. 青色のグラフは MT を示し, 赤色の点は実際に視線移動に要した時間を示す	19
6.1	実験 2 の実施環境	24
6.2	実験に用いる画面. 青色の円はアイコン, 赤色の円は選択するターゲット, および, 緑色は選択されたアイコンを示す	26
6.3	実験時に行ったアンケート結果	28
6.4	全セッション終了時に行った各手法の比較アンケート	29
6.5	提案手法時の選択ができなかったターゲットの位置に関するアンケート結果. 回答が多かったターゲットの位置を濃い色とする	30
6.6	従来手法時の選択ができなかったターゲットの位置に関するアンケート結果. 回答が多かったターゲットの位置を濃い色とする	30
6.7	提案手法における各実験参加者ごとの凝視に要した時間	31
6.8	従来手法における各実験参加者ごとの凝視に要した時間	31
6.9	提案手法におけるターゲット幅条件ごとの実験結果. 左) 凝視に要した時間. 中) ミダスタッチの生じた割合. 右) 何も選択されなかった試行の割合	32
6.10	提案手法における各実験参加者ごとのミダスタッチが生じた割合	33
6.11	従来手法における各実験参加者ごとのミダスタッチが生じた割合	33

表 目 次

4.1 各 ID に対する，修正前および修正後それぞれの視線移動に要した時間 . . .	20
--	----

第1章 はじめに

本論文は、視線をコンピュータの操作手法として用いる際、中でもクリックのような決定を行う操作（以下、ターゲット選択）手法を示す。本章においては、まず背景として視線を用いた操作手法がどのように使用されているか、また、どのような問題があるかを述べる。次に、本研究の目的と、課題を解決するためのアプローチを示す。その後、本研究の貢献を述べ、最後に本論文の構成を述べる。

1.1 背景

パーソナルコンピュータ、スマートフォンやタブレット端末などの情報端末が普及してきた。それと同時に情報端末の操作手法が研究および開発されている。例えば、マウスやタッチ패드などの装置を用いた操作手法や、タッチ패드を用いた画面に直接触れることによる操作手法である。これらは、主に手を用いた操作手法であり、手を使うことが不可能な上肢不自由者や、マウスなどの装置を使用することが難しいと感じるユーザは使用できない。このようなユーザを対象とした操作手法として、手を用いない、かつ日常的な動作を用いた操作手法が提案されている。例として、発話により情報端末の操作を行う音声認識や、操作対象へ視線を移すことにより情報端末の操作を行う視線認識を用いた手法がある。これらの中でも、手を用いないかつ、日常的な動作として、本研究は視線を用いた操作手法に着目する。視線を認識しディスプレイ上のどこを見ているかを推測可能な装置が存在する。特に、Tobii 社が販売している Tobii EyeX [Tob17] や The Eye Tribe 社が販売していた The Eye Tribe [The16] は1万円前後にて購入可能である。操作対象へ視線を移すことは、マウスを用いてポインタを移すことより、素早いことがわかっている [SJ00]。視線を操作手法として用いることにより、マウスやタッチ패드などの装置を用いたカーソル移動に比べ、素早くカーソル移動を行うことが可能である。その反面、視線を操作手法として用いる場合、クリックのような決定を行う操作が難しい。

1.2 目的とアプローチ

本研究にて、視線を用いたターゲット選択手法を実現する。視線を用いない操作手法においては、ターゲット選択はマウスを用いた操作手法における左クリックや、タッチジェスチャを用いた操作手法におけるターゲット表示位置へのタッチにより行われている。視線を用いた操作手法においては、大きく分けて2通りのターゲット選択手法がある。1つは、視線を用

いてカーソル移動を行った後に，前述のような視線を用いないターゲット選択を行う手法である．もう1つは，視線を用いてカーソル移動を行った後に，そのまま一定時間以上見つめること（以下，凝視）によりターゲット選択を行う手法である．前者のようなターゲット選択に視線を用いないターゲット選択手法を用いるものは，操作に手を用いる必要がある．後者は，視線のみを用いたターゲット選択手法であるが，凝視に時間を要するため，視線を用いた操作手法の利点であるカーソル移動の素早さを損なってしまう．カーソル移動の素早さという利点を活かすために，凝視に要する時間を短縮する手法は先行研究において多く研究されている．凝視に要する時間を短縮しすぎると，視線が入ったターゲットすべてが選択されてしまう問題（ミダスタッチ）が生じる．

本研究においても，凝視に要する時間を短縮する手法を示す．凝視に要する時間の短縮には，ポインティング手法の性能評価を行う際に用いられるフィッツの法則を用いる．フィッツの法則を用いることによりターゲット選択に要する時間を推測できる．この推測された時間と実際のターゲット選択のための視線移動に要した時間を比較し，その差が小さい時にターゲット選択を行う．本手法に要する凝視時間は，フィッツの法則から推測された時間と実際に要した視線移動の時間の差未満となる．

本手法を実現するために，まずターゲット選択のための視線移動がフィッツの法則に基づいているかを実験を通じ調査する．次に，調査結果を用いて本手法の設計を行い，実装を行う．最後に，本手法の性能を，凝視に要した時間およびミダスタッチが生じた割合の2つの観点から評価する．

1.3 貢献

本研究の貢献を以下に示す．

- 視線移動を用いた操作手法とフィッツの法則の関係の調査（4章）
- 実験1の結果を用いて，本手法の設計および実装（3章および5章）
- 評価実験を用いた本手法の性能評価（6章）

1.4 本論文の構成

1章では，本研究の背景，本研究の目的とアプローチ，および本研究の貢献を示す．2章では，本研究に関連する研究および手法を述べ，本研究の位置づけを行う．3章では，本手法の概要を述べる．4章では，本手法の実装を行うために実施した，ターゲット選択のための視線移動とフィッツの法則の関係を調査した実験に関して述べる．5章では，4章の結果をうけ，本手法の実装方法に関して述べる．6章では，実装した本手法に対し，評価実験を行うことにより本手法の性能を述べる．7章では，本手法において現在わかっている問題点や改善述べる．8章では，本手法の展望を述べる．9章では，本研究の結論を述べる．

また，付録 A にて，実験 1 に用いた各種書類を示す．付録 B にて，実験 2 に用いた各種書類を示す．

第2章 関連研究

視線を用いた操作手法は、マウスのような装置を用いた既存の操作手法に比べ素早くカーソルをターゲットへ移動（ポインティング）させることが可能である。Sibertら [SJ00] は、視線およびマウスを用いた操作手法それぞれのポインティングに要する時間を調査し、マウスより視線を用いた操作手法が素早くポインティング可能であると示した。Feitら [FWT⁺17] は、視線を用いた操作手法において、インタフェースの設計を行う際のグラフィカルユーザインタフェース（GUI）の大きさや配置などの設計指針を提示した。このように視線を用いた操作手法に関する研究は行われている。

本章において、視線と他の操作手法を組み合わせた研究、視線と凝視を用いた研究、視線の動きのみを用いた研究を述べる。さらに、フィッツの法則と視線を用いた操作手法の関係を調査している研究を述べる。最後に、本研究の位置づけを述べる。

2.1 視線と他の操作手法を組み合わせた研究

ターゲット選択および操作をマウスによるクリックやディスプレイへのタッチなどの従来の操作手法と組み合わせた研究が行われている。これは、素早いポインティングが視線を用いた操作手法の利点である一方、視線のみでは細かな操作を行うことが難しいためである。Gaze+Gesture [CXH15] は、視線および空中における手の動きを用いた操作手法である。視線を用いたポインティングを行った後に、Leap Motion [Lea17] を用いて検出した手の動きを用いてターゲットの操作を行う。Gaze+RST [TABG15] は、視線を用いたポインティングを行った後に、マウスおよびタッチ操作を用いてターゲットの移動や回転、リサイズを行う手法である。Pfeufferら [PG16] は、情報端末の中でもタブレット端末に対する視線を用いた操作手法に関して、視線を用いた操作が不得意とする細かな操作を、タブレット端末のタッチディスプレイへのタッチを用いて行う手法を示している。Gaze-touch [PACG14] は、視線とタッチディスプレイへの複数箇所のタッチを組み合わせて、複数のターゲットを操作する手法である。

これらの手法は、視線を用いたポインティングを行った後に、マウスやタッチなどの手を用いた操作を必要とする。本手法は視線の動きのみを用いた操作手法であるため、手を用いない点において上記の研究とは異なる。

2.2 視線と凝視を用いた研究

上記以外の視線を用いた操作手法に関する研究は、主に視線を用いてポインティングを行った後にターゲットを見つめること（凝視）によりターゲット選択を行っている。Jacob [Jac91] は、凝視を用いた操作手法を示すと同時に、視線が入ったターゲットがユーザの意図とは関係なく選択されてしまう（ミダタッチ）問題を述べている。凝視時間を短縮させるとミダタッチの発生率が上昇する。近年の凝視を用いた操作手法に関する研究は、ミダタッチが生じないかつ、ターゲット選択のために行う凝視に要する時間を短縮する手法を示している。OptiDwell [NDA⁺17] は、凝視を用いた操作手法であり、ユーザごとおよび、ターゲットとなるボタンごとに動的に凝視時間を最適化するモデルを構築している。実験の結果、凝視時間が 200 ms の場合は約 26%、300 ms の場合は 21% の割合でミダタッチが生じた。凝視時間として 400 ms が最も使いやすい時間としている。Mott ら [MWW17] は、凝視を用いたタイピング手法を示している。この手法は単語予測を行い、次に入力される確率の高い文字の入力に要する凝視時間を短縮することにより、素早いタイピングを実現している。

本研究も上記の研究と同様に凝視をターゲット選択に用いる。本手法は、少ないミダタッチにおいて凝視に要する時間を上記の研究より短縮したターゲット選択手法である。これはターゲット選択を凝視のみにて行うのではなく、視線の移動自体をターゲット選択に用いるためである。

2.3 視線の動きのみを用いた研究

凝視を用いずに視線の動きのみを用いた操作手法も研究が行われている。凝視を用いない手法は凝視を用いた手法に比べ、素早い選択が可能であるが、用途が限られているものが多い。凝視を用いないタイピング手法の研究が行われている。Filteryedping [PPT15] は、視線が入ったキーから、入力される単語を複数予測し表示する。その後、ユーザが予測された単語へ視線を移すことにより単語入力を行う。Liu ら [LZL⁺15] らは、視線の動きのみを用いたポインティング手法を示した。まず、入力したいキーに視線を移し、その後表示されるマークに視線を移し、再び入力したいキーに視線を移すことにより、視線を移したキーの入力を行う。EyeSwipe [KFJ⁺16] は、“target reverse crossing” [FCB14] を視線を用いた操作手法へ適応し、凝視を用いたタイピングより素早いタイピング手法を提示している。“target reverse crossing” は、ターゲットへポインタが入るときと出るときの方向からクリックを行うか区別する手法である。GazeEverywhere [SDRD17] は、追跡眼球運動を使用したターゲット選択手法である。追跡眼球運動とは、ターゲットの動きに合わせて視線を滑らかに動かすことである。まず、ターゲットへ視線を移し、その後、ターゲットの横に表示される追跡眼球運動が生じる速度にて動く円を、視線にて追跡することにターゲット選択を行う。Orbits [EVBG15] は、視線を用いたスマートウォッチの操作手法である。ターゲット周りに小さなマークを円状に移動させ、そのマークに対する追跡眼球運動をターゲット選択に用いている。

先行研究は、制限された用途に対して凝視が不要な操作手法をである。本研究はターゲット選択のための凝視に時間を要するが、その用途を制限しない。

2.4 フィッツの法則と視線を用いた操作手法の関係

フィッツの法則は，操作手法の性能評価が可能な法則である [Fit54]．その用途は，マウスを用いたポインティングだけではなく，様々な操作手法の性能評価に用いられている．MacKenzie [Mac15] は，フィッツの法則を用いてタッチパッドの操作手法を評価している．Ramcharitarら [RT17] は，ゲームに用いられるコントローラの操作手法とフィッツの法則の関係を調査している．また，FittsFace [CM17] は，顔を用いた操作手法の性能評価手法であり，フィッツの法則をもとに設計されている．Zhangら [ZM07] は，視線を用いた操作手法の性能をフィッツの法則を用いて評価している．評価した視線を用いた操作手法は，凝視および視線を用いたポインティングとキー入力を組み合わせた手法である．同時にマウスを用いた操作手法も評価し，視線を用いた操作手法と比較した．視線を用いた操作手法はマウスを用いた操作手法に比べ，ポインティングが素早かったが，凝視を用いた操作手法は性能が低いことを示した．これらの研究は，フィッツの法則を操作手法の性能評価に用いているが，本研究はフィッツの法則を視線を用いたターゲット選択に用いる．

マウスやタッチパッドなどを用いた操作手法に加え，視線を用いた操作手法とフィッツの法則の関係を調査している研究が行われている．視線を用いた操作手法がフィッツの法則に従っているかを調査するためには寄与率を表す r^2 を用いる． r^2 が大きいほど，フィッツの法則に従っている．Wareら [WM87] は，視線と凝視を用いた操作手法がフィッツの法則に従っていると述べた．Vertegaal [Ver08] は，凝視を用いた操作手法，視線とマウスを用いた操作手法，マウスを用いた操作手法，および，スタイラスを用いた操作手法の性能を評価している．凝視および視線とマウスを用いた操作手法は，マウスおよびスタイラスを用いた操作手法に比べ，素早く操作可能であることを示した．また，その際の r^2 は，マウスが $r^2 = 0.99$ ，スタイラスが $r^2 = 0.98$ ，視線とマウスが $r^2 = 0.87$ および凝視が $r^2 = 0.86$ であることを示した．Miniotas [Min00] は，視線およびマウスを用いた操作手法それぞれ同じ実験を行い，それぞれの操作手法のフィッツの法則への r^2 を求めている．視線およびマウスを用いた操作手法ともに r^2 は 0.98 以上であり，フィッツの法則に従っていることを示した．Murataら [MKMF15] は，様々なターゲットの形および移動の方向に対する視線を用いた操作手法と，フィッツの法則の関係を調査している．

本研究は，先行研究と同様に視線を用いた操作手法とフィッツの法則の関係を調査する．本研究は，先行研究より広い実験条件にて視線を用いた操作手法とフィッツの法則の関係を調査する．Miniotas [Min00] がターゲット幅を 2 条件およびターゲット間距離を 4 条件にて実験を行っているのに対し，本研究はターゲット幅条件およびターゲット間距離条件それぞれを 5 条件とする．また，最新の視線認識装置および広く使われている大きさのディスプレイを用いる．フィッツの法則と視線を用いた操作手法の関係を調査している先行研究は，視線を用いた操作手法として，視線によるポインティングとマウスやキーボードなどを用いたターゲット選択および，凝視を用いたターゲット選択を組み合わせた操作手法を用いている．本研究において，本手法を実装するためにフィッツの法則と視線を用いた操作手法の関係を調査する．本手法は視線移動をポインティングだけではなくターゲット選択にも用いているため，視線の移動によるターゲット選択とフィッツの法則の関係性を調査する．その結果を用い

て本手法を設計する．

2.5 本研究の位置づけ

本研究は，2.2 節にて示した研究と同様に，視線を用いた操作手法の中でも，凝視をターゲット選択に用いる手法である．本手法は，少ないミダタッチが生じるが，2.2 節にて示した研究より，凝視に要する時間が短い．凝視時間を短縮する手法および凝視を行わない手法は，用途が視線を用いたタイピングに限られているものが多い．しかし，本手法は用途を限らずに使用可能である．本研究は，フィッツの法則を視線を用いた操作手法へ応用し，凝視に要する時間を短縮する．そのため，フィッツの法則と視線を用いた操作手法の関係を調査する．先行研究にて行われている視線を用いた操作手法とフィッツの法則の関係の調査は，ポインティングに視線移動を用いて，ターゲット選択に他の操作手法や凝視を用いているものである．本研究にて行う，視線を用いた操作手法とフィッツの法則の関係の調査は，ポインティングおよびターゲット選択両方を視線移動にて行うものである．そのため，先行研究にて行われている調査と異なる．

第3章 本手法の概要

本手法は、フィッツの法則に基づく視線を用いたターゲット選択手法である。本手法を用いることにより視線を用いた操作手法において凝視に要する時間を短縮できる。本手法は、凝視に要する時間を短縮するためにフィッツの法則を用いる。本章においては、フィッツの法則に関して述べた後に、本手法の概要に関して述べる。

3.1 フィッツの法則

本手法は、フィッツの法則 [Fit54, fS12] というポインティング手法の性能評価が可能な法則を基に設計されている。フィッツの法則は式 3.1 を用いて表される。

$$MT = a + b \log_2(D/W + 1) \quad (3.1)$$

式 3.1 はフィッツの法則を表す際の標準的な式である。式 3.1 に用いられる各係数は以下の通りである。

- MT (Moving Time): ポインティングを行うターゲットまで、ポインタを移動させるのに要するフィッツの法則から推測される時間
- ターゲット間距離 D (Distance): ポインタがある場所から、ポインティングを行うターゲットの中心までの距離
- ターゲット幅 W (Width): ポインティングを行うターゲットの幅
- $\log_2(D/W + 1)$: ID (Index of Difficulty) と呼ばれる、目標達成の困難度を表す指数
- a, b : ユーザや装置に依存する定数

ID は、目標達成の困難度を示す指標であるため、 ID が大きくなる（ターゲット幅 D が大きくもしくはターゲット幅 W が小さくなる）ほどポインティングが難しくなる。性能評価には、 ID および移動に要した時間 T が用いられる。性能を評価する指標として、評価指数 (IP : Index of Performance もしくは TP : Throughput) があり、これは式 3.2 から求められる。

$$IP = \frac{\text{目標達成困難度}}{\text{移動に要した時間}} = \frac{ID}{T} \quad (3.2)$$

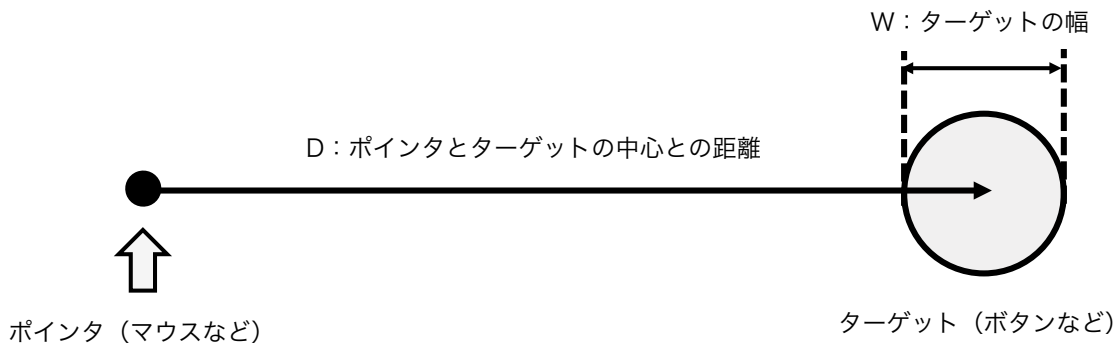


図 3.1: フィッツの法則の概要

IP は高いほど性能が良いとされ、目標達成の困難度が大きく移動に要した時間が小さいほど大きくなる。

また、フィッツの法則の概要を、図 3.1 に示す。図 3.1 におけるポインタはマウスカーソルを表し、ターゲットはボタンやアイコンなどを表す。フィッツの法則を用いることにより、ポインティングにおけるターゲットの幅およびターゲットまでの距離から、ターゲット選択に要する時間を推測できる。本手法は、このフィッツの法則から求めた時間を用いて凝視に要する時間を短縮する。

3.2 フィッツの法則に基づく視線を用いたターゲット選択手法

本手法は、ターゲット選択を凝視のみに行うのではなく、視線の移動自体をターゲット選択に用いるため、凝視に要する時間を短縮できる。フィッツの法則を表す式 3.1 より推測される MT と、実際にターゲット選択に要した時間の差が閾値より小さい時に、その視線の動きをターゲット選択のための視線移動とみなし、ターゲット選択を行う。また、本手法を用いることにより、ミダスタッチの発生を抑えることができる。本研究において、意図した視線の動きと、意図しない視線の動きではターゲット選択に要する時間に違いがあると仮説をたて、その違いを用いてミダスタッチの発生を抑える。意図した視線の動きとは、ターゲットを選択しようとして視線がターゲットへ移ることである。また、意図しない視線の動きとは、意図して視線をターゲットへ移す際に、違うターゲット上を視線が通過することである。本手法は、情報端末に用いられるアイコンやボタンなどをターゲットと想定している。

第4章 実験1：フィッツの法則と視線を用いた操作手法の関係

本章において、フィッツの法則と視線を用いた操作手法の関係を調査し、その結果に関して述べる。

4.1 目的

実験1の目的は、フィッツの法則と視線を用いた操作手法、特に、視線移動のみをターゲット選択に用いた操作手法との関係を調査することである。また、調査の結果を用いて本手法の設計を行う。

4.2 機器

実験には、視線認識デバイスとして Tobii 社より販売されている Tobii EyeX [Tob17] を用いる。Tobii EyeX はユーザがメガネやコンタクトを着用しているかに関わらず、視線の認識が可能である。ディスプレイは、24 inch, 1920×1080 pixels であり、画面に実験参加者などが映り込まないようにノングレアタイプ (DELL 社製 G2410) を用いた。Tobii EyeX は図 4.1 のようにディスプレイ下部のフレームに取り付けて使用する。モニタスタンドはディスプレイの高さを変更できるものを用いた。これは、ディスプレイの高さを変更することによりディスプレイと実験参加者の頭との角度を調節し、Tobii EyeX が実験参加者の視線を認識することを可能とするためである。ディスプレイと実験参加者間の距離は約 60 cm とした (図 4.1)。これは Tobii EyeX が認識可能としている距離である [Tob17]。Tobii EyeX の認識精度はユーザの眼に対しての光に影響を受ける [Lig17] ため、実験に用いた部屋への環境光をブラインドにて遮り、人工的な照明による明かりのみとした。ディスプレイは白色の壁の前に配置した。これは実験とは関係の無い物が実験参加者の視界に映り込むことを避けるためである。

4.3 実験参加者

実験1には16名の男性を実験参加者として雇用した (P1-P16)。実験参加者の年齢は20歳から24歳であり (平均 22.0 歳)、全ての実験参加者は視線認識デバイスの使用経験がなかった。実験参加者に実験参加前に、普段の目の状態 (裸眼、メガネ、コンタクト) にて実

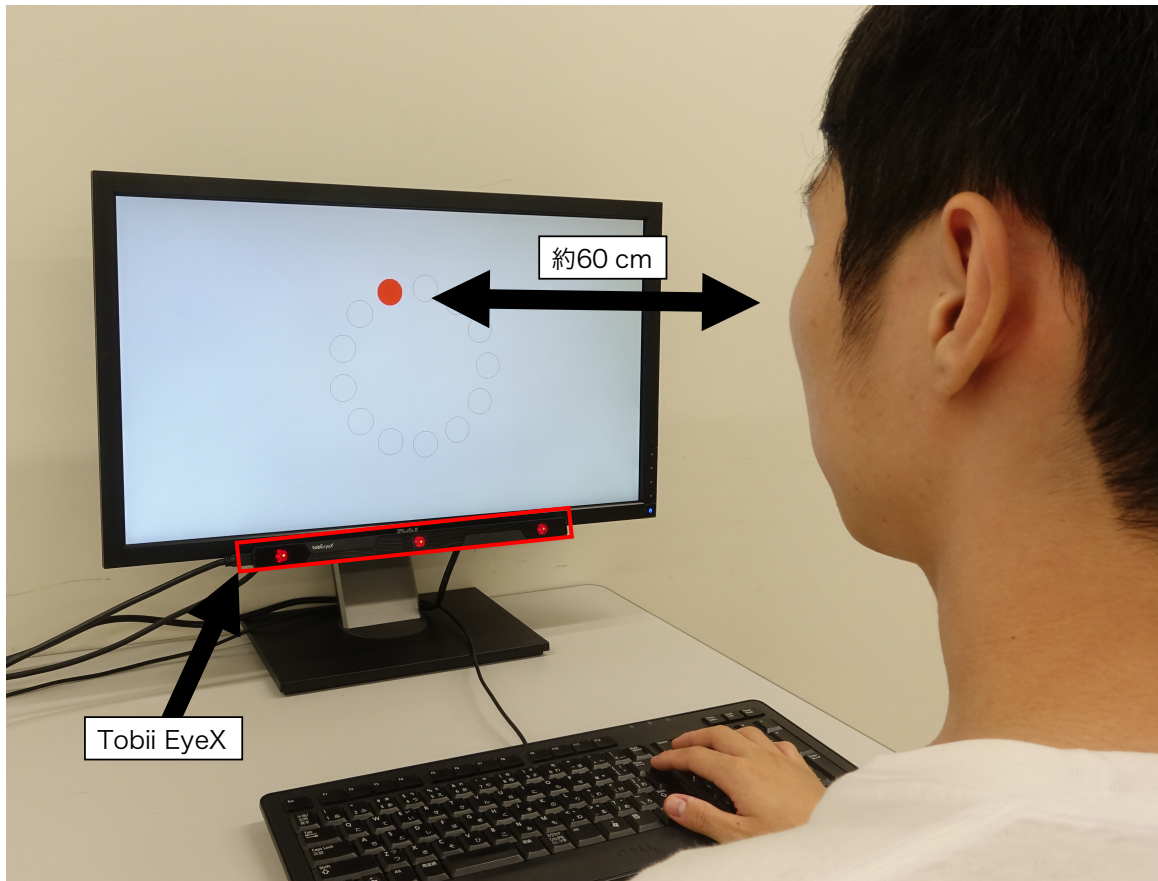


図 4.1: 実験 1 の実施環境

験に参加するよう指示した．実験参加者のうち7名が裸眼（P1–P7），5名がメガネ（P8–12）および4名がコンタクトレンズ（P13–P16）を着用していた．また，実験前日の睡眠時間，実験日の目および体の疲労度に関して，5を「疲れていない」，1を「かなり疲れている」とした5段階のリッカート尺度を用いた事前アンケートを実験開始時に行った．アンケートより，実験前日の睡眠時間は平均7時間（標準偏差：0.97）であった．

4.4 収集データ

実験から収集し解析に用いるデータは以下の通りである．

- Tobii EyeX から得られる，タイムスタンプおよび視線の座標
- 視線の移動に要した時間

4.5 手順

実験タスクはISO 9241-411 [fS12] に記載されてあるマルチディレクショナルポインティングタスク（図 4.2）を用いた．実験画面は図 4.2 のように13個の円を用い，そのうち赤色に表示されている円がターゲットを表す．フィッツの法則は，ターゲット幅およびターゲット間距離からターゲット選択に要する時間を推測することが可能な法則であるため，ターゲット幅およびターゲット間距離それぞれに複数条件を用いた．実験1においては以下の5条件を用いた．

ターゲット間距離 (D): 2, 4, 6, 8, 10 inch

ターゲット幅 (W): 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00 inch

実験参加者は図 4.2 に記されている順番通りに合計14回ターゲットに視線を移す．1つ前のターゲットから表示されているターゲットへの移動を1試行とした．図 4.2 の1–13番のターゲットへ視線を移すことを1試行とし，13試行を行うことを1タスクとした．0番のターゲットへ視線を移すことは試行として計算せず，タスク開始のトリガである．つまり，0番から1番のターゲットへ視線を動かすことが1回目の試行となり，12番から13番のターゲットへ視線を動かすことが13回目の試行となる．ターゲット幅5条件およびターゲット間距離5条件それぞれ25条件のタスク全てを行うことを1セッションとし，これを5セッション行った．合計試行数は，26,000試行（13試行×25条件×5セッション×実験参加者16名）であった．ターゲット内に視線が移されると，直ちに次のターゲットが表示される．ターゲット間距離を一定に保つため，ターゲットは図 4.2 内の数字順のように対角線上に表示された．また，ターゲット幅およびターゲット間距離の組み合わせはランダムに設定された．実験参加者に実験開始前に，ターゲット選択時にターゲットの中心を意識的に素早く見るよう，また，セッション中は頭と体を極力動かさないよう指示した．セッション開始前には，Tobii EyeX から提供

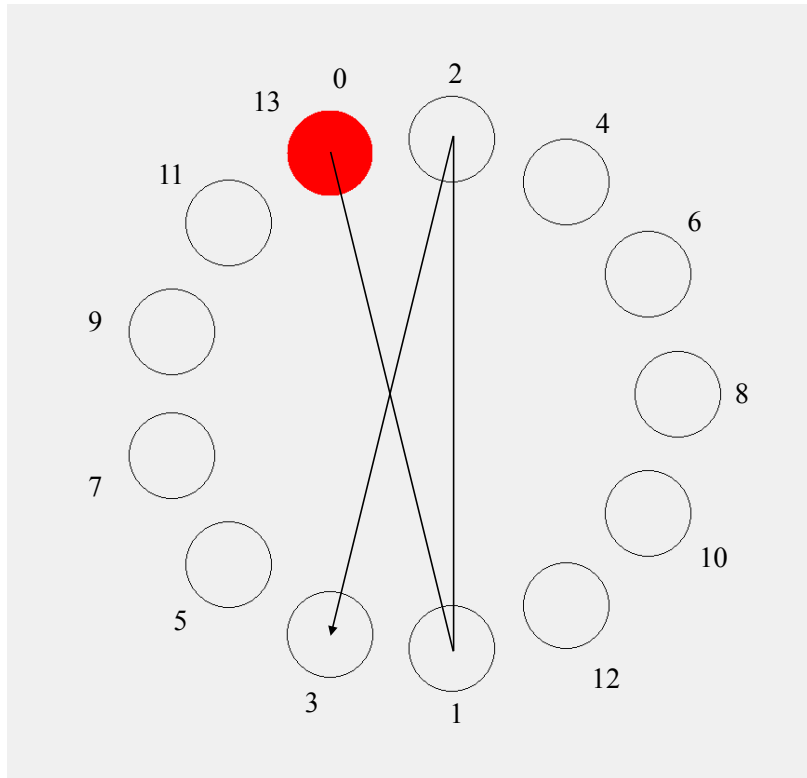


図 4.2: マルチディレクショナルポインティングタスク. 赤色の円は実験参加者が視線を移すターゲットを示す. ターゲット周囲の数字および矢印はターゲットの表示順序を示す

されているキャリブレーションを行った。キャリブレーションは必要に応じて実験参加者および Tobii EyeX の位置関係を調整しながら複数回行われた。タスクは、実験参加者の手元に置かれたキーボードの Enter キーを押すと開始される。1 タスクが終了すると、ターゲットの表示がなくなる。また、タスク間には、実験による目の疲労を抑えるために任意の休憩を設けた。次のタスクは、再び Enter キーを押すことにより開始した。1 セッション (25 タスク) が終了すると、該当セッションに関して、ターゲット選択はスムーズに行われたか、実験に集中できたか、目、体および精神的な疲れに関して 5 段階のリッカート尺度を用いてアンケートを行った。その後少なくとも 5 分以上の休憩を設け、必要に応じてより長い時間の休憩を設けた。実験は、平均約 55 分を要し、実験参加者には謝礼として 820 円が支払われた。

4.6 結果

実験前および、セッション終了後に行ったアンケートの結果を図 4.3 に示す。実験から得られたデータを用いて、視線を用いたターゲット選択手法がフィッツの法則に基づいているか調べた。実験から得られたデータは、視線の移動に要した時間の標準偏差が、その平均より大きく、明らかな外れ値を含んでいることがわかった。例えば、ターゲット幅 W およびターゲット間距離 D がそれぞれ、1.00 inch および 10.0 inch であったとき、視線の移動に要した時間の平均および標準偏差はそれぞれ 729 ms および 861 ms であった。これは、実験参加者がターゲットを見ているにもかかわらず、視線認識装置の認識精度が低いことにより誤認識が生じたことが原因だと考えられる。そのため、視線を用いた操作手法のフィッツの法則への寄与率を求める前に、まず誤認識の修正を行った。誤認識の修正は注視を検出することにより行った。

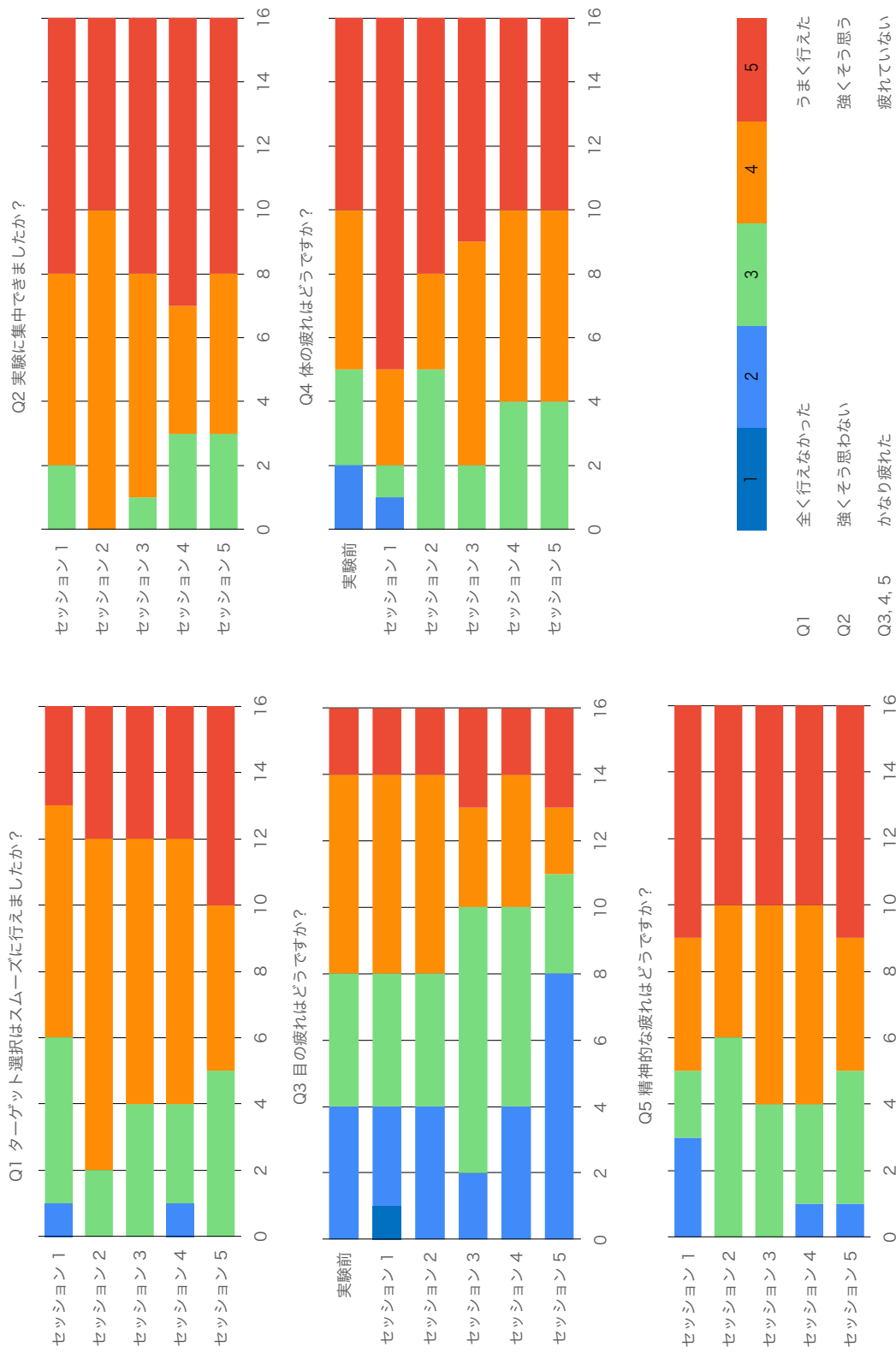


図 4.3: 実験時に行ったアンケート結果

4.6.1 エラー修正

実験から得られた試行はいくつかの誤った試行を含んでいた。これらは明らかに多くの時間を視線移動に要していた。実験 1 において視線移動に要した時間は、選択するターゲットが表示された時間からそのターゲットに視線が入るまでの時間である。したがって視線認識の精度の影響によって、実験参加者がターゲットを見ている（視線をターゲットに入れている）にも関わらず、視線がターゲット内に入っていないと認識されると適切な時間を得ることができない。実際に、実験参加者から得たコメントによると、「ターゲットを見たが正しく認識されていないように感じた。その際は、1 度ターゲットから視線を外し、再び視線をターゲット内に入れると認識された」と言うものがあった。これは、Tobii EyeX へのキャリブレーションを行った後に、体および頭が動いたことにより認識精度が減少したためと考えられる。このような原因によって生じた誤った試行を正常な試行に修正するために、実験から得た試行毎のデータに対し以下の手順でエラー修正を行った。

図 4.4 に正常に試行が完了した際（青色の波形）、および誤認識が生じた際（赤色の波形）の試行における、視線-ターゲット間の距離と時間の関係を示す。誤認識が生じた際の試行は、実験参加者からのコメントにあるように、ターゲットに視線を移した後に、1 度視線を外し、再び視線を移すことにより試行が終了している。実験参加者がターゲットに視線を移す際に、ある程度視線が近づくまでは視線-ターゲット間の距離が急激に縮まり、その後、視線-ターゲット間の距離の減少率が小さくなることがわかった（図 4.4 緑色の領域）。これは、試行を正常に終えた際、および誤認識が生じた際ともに見られた。これより、視線-ターゲット間の距離が急激に減少し、視線-ターゲット間の距離の減少率が小さくなった際を、実験参加者の視線がターゲットに近づいているとみなすことが可能である。さらに、実験参加者の視線がターゲットに近づいた後に、ターゲット付近に視線がとどまることがわかった（図 4.4 黄色の領域）。正常に試行を終えた際は、視線が短い時間とどまった後に試行が終了している。しかし、誤認識が生じた際の試行は、ターゲット付近に視線がとどまる時間が長い。そこで、本研究において、視線がターゲット付近に一定時間以上留まっている時間を実験参加者がターゲットを注視している時間と仮定した。この際は注視を行っているともみなすことが可能な 100 ms を一定時間とした。実験から得た全データより、各試行ごとに注視をしている点を検出した。視線の動き始めから実験参加者が注視を始めるまでの時間を、ターゲット選択のための視線移動に要した時間とし、この時間を用いて解析を行った。表 4.1 に各 ID に対するエラー修正を行ったデータおよびエラー修正を行う前のデータを示す。表 4.1 が示すように、エラー修正後は各 ID に対する視線移動に要した時間は減少していることがわかる。

4.6.2 視線を用いたターゲット選択のフィッツの法則への寄与率

エラー修正を行った実験結果を用いて、視線を用いたターゲット選択のフィッツの法則への r^2 を計算した。 r^2 はエラー修正前および後のデータを用いて回帰分析を行い算出した。図 4.5 にエラー修正前および後の全体および、各実験参加者における r^2 を示す。実験結果より r^2 はエラー修正前が 0.68、エラー修正後が 0.90 であり、エラー修正前後にマン・ホイットニ検定

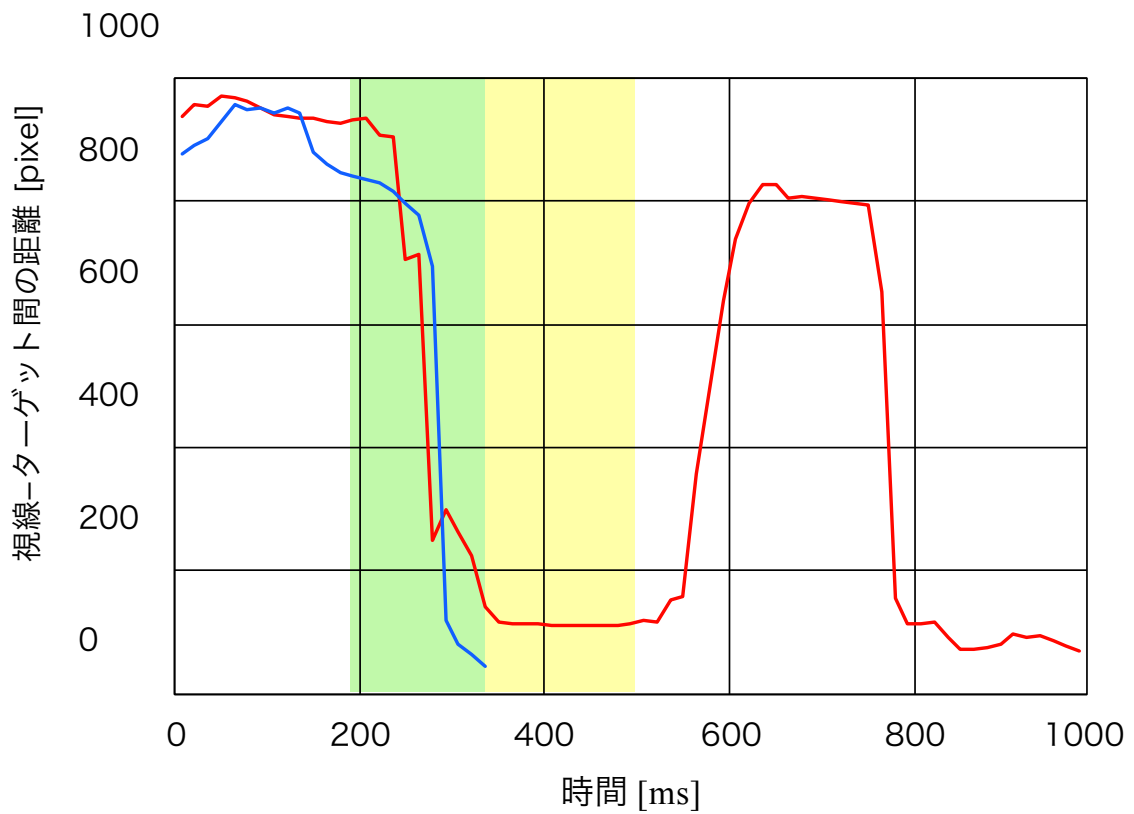


図 4.4: 視線-ターゲット間の距離と時間の関係．赤色のグラフは誤認識が生じた際の試行を表す．青色のグラフは正常な試行を示す．緑色の領域は視線がターゲットに近づいている最中の関係を示し，黄色の領域は注視が行われている領域を示す

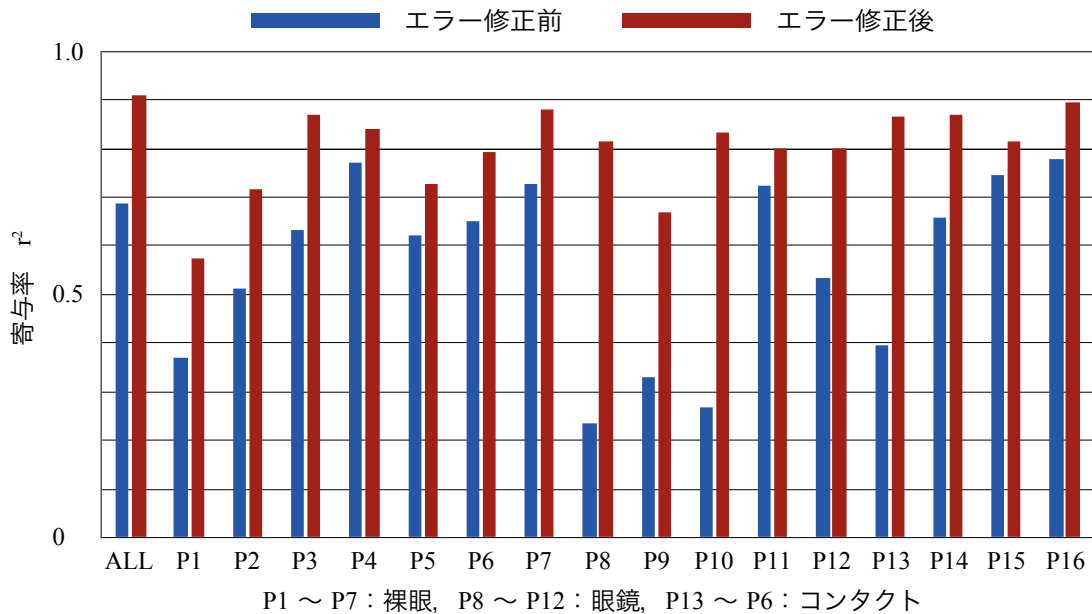


図 4.5: 全体および各実験参加者毎のエラー修正前後の r^2 . 青色のグラフはエラー修正前の r^2 を示し, 赤色のグラフはエラー修正後の r^2 を示す

の結果より有意差があることがわかった ($p = 0.00 < 0.05$) . また, 回帰分析を行った際に算出した回帰直線の切片 (a) および傾き (b) はエラー修正前がそれぞれ 0.133, 0.192 であり, エラー修正後がそれぞれ 0.142, 0.098 であった . エラー修正後の a および b の標準偏差は, 0.03 および 0.02 であった . それぞれを式 3.1 に当てはめると, エラー修正前および後がそれぞれ式 4.1 および式 4.2 に表される .

$$MT = 0.192 + 0.133 \log_2(D/W + 1) \quad (4.1)$$

$$MT = 0.142 + 0.098 \log_2(D/W + 1) \quad (4.2)$$

図 4.6 に式 4.2 を用いて計算された MT と実際に視線の移動に要した時間の関係を示したものを表す . x 軸は実験に用いたターゲット幅 (W) およびターゲット間距離 (D) 条件から計算された ID を表す ($W = 2.00$ inch かつ $D = 2.00$ inch 時の $ID = 1.00$ が最小) . また, y 軸は時間を表す . 各 ID 時の MT と実際の視線移動に要した時間の差 (図 4.6 の青色の波形と赤色の点の距離) に対し, スミルノフ・グラブス検定を行い外れ値を算出した ($p = 0.05$) . W と D の組み合わせが (W, D) = (2.00 inch, 2.00 inch), (2.00 inch, 4.00 inch), (1.75 inch, 4.00 inch) の 3 組が外れ値であった . さらに, 本手法を設計するために, エラー修正を行った

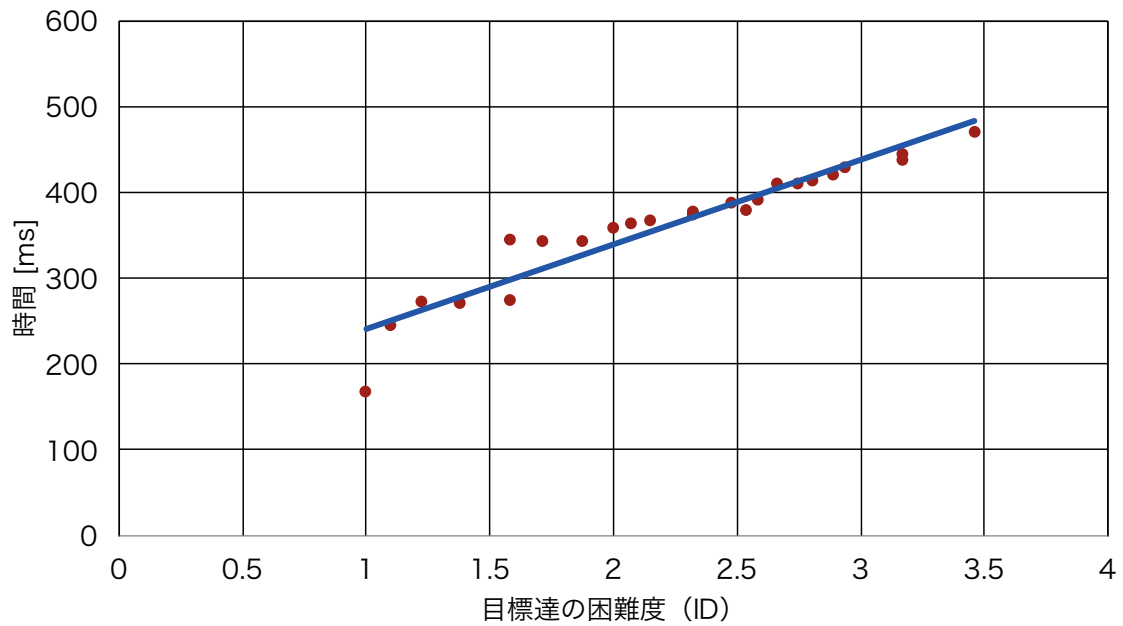


図 4.6: 式 4.2 を d 用いて計算された MT と実際に視線移動に要した時間の関係．青色のグラフは MT を示し，赤色の点は実際に視線移動に要した時間を示す

データから，さらにターゲット幅およびターゲット間距離条件を制限した場合の r^2 も計算した． W と D の組み合わせが $(W, D) = (2.00 \text{ inch}, 2.00 \text{ inch}), (2.00 \text{ inch}, 4.00 \text{ inch}), (1.75 \text{ inch}, 4.00 \text{ inch})$ の 3 組が外れ値であったため，これら 3 組み合わせを制限した場合の r^2 も求めた．結果は r^2 が 0.950 であり，式 3.1a および b は 0.167 および 0.089 であった．

表 4.1: 各 ID に対する , 修正前および修正後それぞれの視線移動に要した時間

W [inch]	D [inch]	ID	修正前 [ms]	修正後 [ms]
2.00	2.00	1.0000	246.75	167.41
1.75	2.00	1.0995	375.43	245.42
1.50	2.00	1.2224	425.21	271.77
1.25	2.00	1.3785	461.63	270.11
1.25	2.00	1.5850	553.85	274.03
2.00	4.00	1.5850	383.37	344.40
1.75	4.00	1.7162	384.01	342.73
1.50	4.00	1.8745	400.00	343.11
2.00	6.00	2.0000	402.54	358.75
1.25	4.00	2.0704	470.79	363.58
1.75	6.00	2.1468	425.54	367.98
1.25	4.00	2.3219	541.86	373.71
1.50	6.00	2.3219	454.32	376.60
2.00	8.00	2.3219	430.56	378.13
1.75	8.00	2.4780	464.04	387.56
1.25	6.00	2.5361	509.75	380.01
2.00	10.0	2.5850	470.00	391.17
1.50	8.00	2.6630	514.59	410.93
1.75	10.0	2.7472	504.36	410.45
1.25	6.00	2.8074	647.73	413.99
1.25	8.00	2.8875	556.63	420.78
1.50	10.0	2.9386	575.64	429.51
1.25	8.00	3.1699	687.18	444.36
1.25	10.0	3.1699	638.02	436.84
1.25	10.0	3.4594	729.02	471.15

第5章 実装

本章において，本手法の実装方法に関して述べる．

5.1 概要

本手法は，フィッツの法則から推測された視線移動に要する時間と，実際にターゲット選択のための視線移動に要した時間を比較し，その時間差が小さい時にターゲット選択を行う手法である．したがって，本手法を実現するためには，意図した視線移動の検出および式 3.1 の定数 a および b を決定するためのキャリブレーションを実装する必要がある．

5.2 視線移動の検出

視線の移動検出は，実環境を想定した際に，視線がどこにあるかに関わらず選択を行うために必要である．本手法はフィッツの法則におけるターゲット間距離を，視線の移動開始点からターゲットの中心までの距離としている．その距離を用いてターゲット選択に要する時間を推測する．また，実際の視線移動に要する時間は，視線の移動開始時からターゲットに視線が入った時間とする．移動検出の方法には，Tobii EyeX から取得される視線の座標を用いて，1 サンプル前の座標からの移動距離を用いる．視線移動の検出には，視線の移動開始，移動中および移動終了の3つの状態を用いる．これらの状態は，4章にて述べた，ターゲットに視線を移す際の視線-ターゲット間の距離の関係から決定した．まず視線が一定場所に留まっている点を注視している点とし，そこからある程度動いたとき（移動距離 d_1 とする）を視線の移動開始とみなす．移動開始時からさらにある程度動いたとき（移動距離 d_2 とする）を移動中とみなす．移動開始時に移動距離が d_1 より小さくなったときは，再度その点を注視しているとみなす．移動中に移動距離が d_2 より小さくなったとき移動終了とみなす．移動終了時に移動距離が d_2 より大きくなった際は再度移動中とみなす．移動終了時に視線がターゲットに入ったときに，移動開始時から移動終了までの時間とフィッツの法則から求められた時間を比較する．フィッツの法則に用いる値は，視線の移動開始時の座標から移動終了時の座標までの距離および，視線が入ったターゲットの幅である．この時間差が小さくなったときに視線が入っているターゲットに対して選択を行う．ターゲット選択を行うかどうかの判定は，視線の移動終了時に行い，視線の移動終了時に視線が入っているターゲットに対し判定を行う．視線の移動終了時と同時にターゲットが選択された場合は凝視時間が0秒であり，移動終了時から，ターゲット選択が行われるまでの時間が凝視に要する時間となる．3つの移動状

態を用いることにより，3章にて述べた，仮説を検証できる．例えば，あるターゲットを選択する際に，視線の移動開始位置からターゲットまでにターゲットとなりうる対象が存在していた場合，その対象を通過する（対象に視線が入る）際は，視線は移動中であるとみなすため，意図しないターゲット選択が生じない．

5.3 定数決定のためのキャリブレーション

本手法はフィッツの法則を表す式 3.1 の定数を各ユーザごとに求める必要がある．これは，各ユーザごとに式 3.1 の定数が異なると考えられるためである．これらを求めるために，実験 1 に用いたマルチディレクショナルポインティングタスクを使用し，キャリブレーションを行う．キャリブレーションは，13 個のターゲット選択をターゲット間距離 (D) 3 条件およびターゲット幅 (W) 3 条件の組み合わせを用いて行う．本手法へのキャリブレーションに用いるターゲットの条件は以下の条件を用いる．

ターゲット間距離 (D): 6, 8, 10 inch

ターゲット幅 (W): 1.00, 1.25, 1.50 inch

これらは 4 章にて述べた実験結果から決定し， W と D の組み合わせが $(W, D) = (2.00 \text{ inch}, 2.00 \text{ inch})$, $(2.00 \text{ inch}, 4.00 \text{ inch})$, $(1.75 \text{ inch}, 4.00 \text{ inch})$ の 3 組が外れ値であったため， $D = 2.00, 4.00 \text{ inch}$ および $W = 2.00, 1.75 \text{ inch}$ の 4 条件を除いたものである．

第6章 実験2：本手法の性能評価

本章において，本手法の性能を評価するために行った実験と結果に関して述べる．

6.1 目的

本手法の性能評価を行うための実験を行った．実験結果から評価を行う項目は凝視に要した時間およびミダタッチが生じる割合である．実験2において，本手法を提案手法と表現し，従来の凝視を用いた手法を従来手法と表現する．提案手法と従来手法の比較のため，提案手法および従来手法それぞれを同じ実験を行い，その結果を評価した．従来手法の凝視に必要な時間を400 msとした．これは，OptiDwell [NDA⁺17] が，凝視時間として最も使用しやすいと主張している時間である．OptiDwell は，凝視を用いたターゲット選択手法を示している最新の研究であるため採用した．

6.2 機器

実験には，視線認識デバイスとして Tobii 社より販売されている Tobii EyeX [Tob17] を用いた．Tobii EyeX はユーザがメガネおよびコンタクトを着用しているかに関わらず，視線を認識することが可能である．実験環境を図 6.1 に示す．ディスプレイは，24 inch，1920×1080 pixels であり，画面に実験参加者などが映り込まないようにノングレアタイプ（DELL 社製 G2410）を用いた．Tobii EyeX は図 6.1 のようにディスプレイ下部のフレームに取り付けて使用する．モニタスタンドはディスプレイの高さを変更できるものを用いた．これは，ディスプレイの高さを変更することによりディスプレイと実験参加者の頭との角度を調節し，Tobii EyeX が実験参加者の視線を認識することを可能とするためである．また，実験1の際に Tobii EyeX の認識精度を高く保てなかった問題に加えて，実験1の実験参加者より「頭と体を動かさないように意識することが疲れた」という意見があったため，実験2においては実験参加者の頭を株式会社ナモト貿易が販売している頭部固定機 [Chi14] にて動かさないように固定した．ディスプレイと実験参加者間の距離は60 cm 程度とする．これは Tobii EyeX が認識可能としている距離である [Tob17]．Tobii EyeX の認識精度はユーザの眼に対しての光に影響を受ける [Lig17] ため，実験に用いた部屋は環境光をブラインドにて遮り，人工的な照明による明かりのみとした．ディスプレイは白色の壁の前に配置した．これは実験参加者の視界に実験とは関係の無い物が映り込むことを避けるためである．

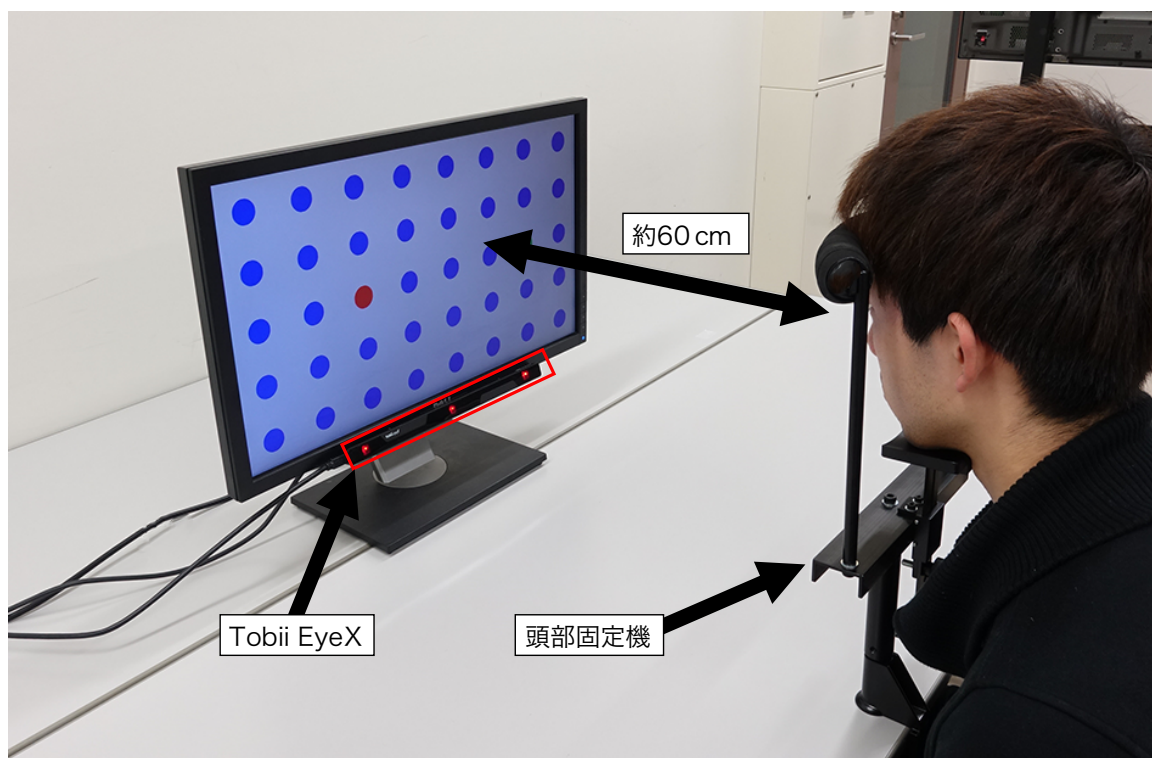


図 6.1: 実験 2 の実施環境

6.3 実験参加者

実験参加者は大学生および大学院生の男性 17 人 (P1–P17) である。実験参加者の年齢は 20 歳から 24 歳 (平均 22 歳) であった。また、実験 1 に参加した実験参加者のうち 8 人が、実験 2 にも参加した。実験 1 に参加した実験参加者のみ、視線認識デバイスの使用経験があり、実験 1 での経験のみであった。実験参加者は実験参加時に、普段の目の状態 (裸眼、メガネ、コンタクト) にて実験に参加するよう指示され、8 名が裸眼 (P1–P8)、7 名がメガネ (P9–P14, P17) および、2 名がコンタクトレンズ (P15, P16) を着用していた。また、実験日の睡眠時間、実験日の目および体の疲労度に関して、5 が「疲れていない」、1 が「かなり疲れている」とした 5 段階のリッカート尺度を用いた事前アンケートを行った。アンケートより、実験前日の睡眠時間は平均 7 時間 (標準偏差: 1) であった。

6.4 収集データ

実験から収集し解析に用いるデータは以下の通りである。

- Tobii EyeX から得られる、タイムスタンプおよび視線の座標
- 選択に要した時間: 移動開始時の時間からターゲット選択が行われるまでの時間
- 視線の移動に要した時間: 移動開始時の時間からターゲットに視線が入るまでの時間
- 凝視に要した時間: 視線がターゲットに入った時間からターゲット選択が行われるまでの時間
- ターゲット選択の合否: ターゲット選択時に誤って選択されたターゲットの数とそのターゲットの位置および、ターゲット選択が行われなかった試行数とそのターゲットの位置
- 選択されたターゲット情報: 視線の移動開始座標から選択されたターゲットの中心座標までの距離および選択されたターゲットの幅
- 通過したターゲット情報: 各試行において、視線が 1 度でも入ったと認識されたターゲットの位置

6.5 手順

実験は、 5×8 の格子状に並んだ円を用いて、図 6.2 のような画面を用いて行った。図 6.2 の青色の円はアイコンであり、図 6.2 の赤色の円は実験参加者が選択するターゲットである。また、図 6.2 の緑色の円は選択されたアイコンを示す。各アイコン間の距離 (アイコンの中心から中心までの距離) は水平方向に 240 (1920 pixels / 8) pixels, 垂直方向に 216 (1080 pixels / 5) pixels である。ターゲットを 1 回選択することを 1 試行とし、40 個のターゲットをそ

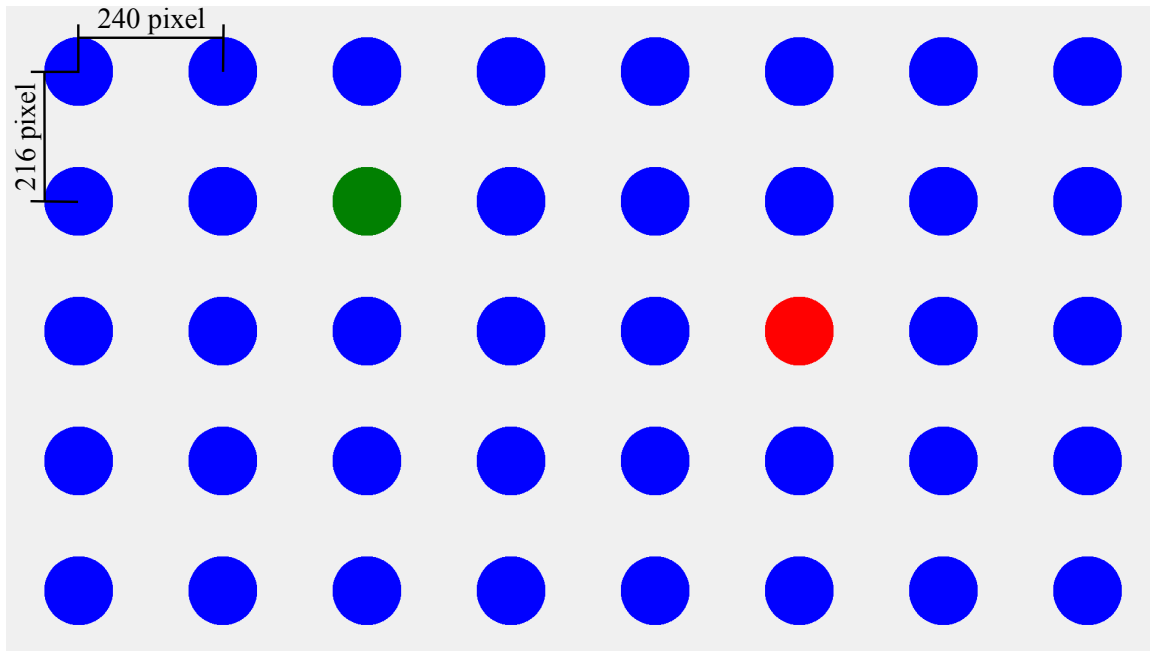


図 6.2: 実験に用いる画面．青色の円はアイコン，赤色の円は選択するターゲット，および，緑色は選択されたアイコンを示す

れぞれ選択することを 1 タスクとした．タスクをターゲット幅 3 条件行うことを 1 セッションとした．これを提案手法および従来手法ともに 2 セッションずつ行った．各手法それぞれの合計試行数は 3,840 (40 試行 \times 3 条件 \times 2 セッション \times 16 人) 試行であった．ターゲット幅は 1.00, 1.25, 1.50 inch の 3 条件にて行った．各セッションごとに，ターゲット幅条件はランダムな順序に設定した．また，カウンタバランスをとるために実験参加者を 8 人ずつ A・B のグループに分け，A グループを提案手法からセッションを開始し，B グループを従来手法からセッションを開始した．

実験に用いる，フィッツの法則から推測される MT と，実際にターゲット選択に要した時間を比較する際の閾値 (TH) は，実験 1 の結果を用いて実装した． TH は，エラー修正後の a および b の標準偏差，ターゲットの幅 (W) および視線の開始地点から各ターゲットまでの距離 (D) を用いて，式 6.1 から求める．

$$TH = 0.03 + 0.02 \log_2(D/W + 1) \quad (6.1)$$

実験参加者には実験開始時に，ターゲット選択時はターゲットの中心を素早く意識的に見るように指示した．また，ターゲットが選択されるまで (赤色から緑色に変更するまで) ターゲットを見続けるよう指示した．各タスク開始前には，Tobii EyeX から提供されているキャリブレーションを必要に応じ実験参加者および Tobii EyeX の位置関係を調整しながら 1 回以上行った．また，提案手法のセッション開始前には，Tobii EyeX へのキャリブレーションを

行い、続けて提案手法へのキャリブレーションを行った。キャリブレーションの結果 r^2 が 0.9 以上の場合、提案手法へのキャリブレーションを成功とし a および b の値を該当セッションに用いた。キャリブレーションの結果 r^2 が 0.9 未満の場合、提案手法へのキャリブレーションを失敗とし再度提案手法へのキャリブレーションを行った。セッション中、ターゲットが選択された場合は、そのターゲットは緑色となり、新たに次のターゲットが表示された。ターゲット以外のアイコンが選択された場合（ミダスタッチが生じた場合）は、そのアイコンを緑色にする。ターゲットの表示から 5 秒以上経ってもターゲットが選択されなかった場合は、ターゲットを緑色に変更し、新たに次のターゲットを表示する。これは、ターゲット選択のための視線の移動開始地点を 1 試行前に選択されたターゲットとし、視線の移動距離を 1 試行前に選択されたターゲットからその試行のターゲットまでとすることを目的とする。実験参加者には、実験参加前に視線をターゲットに移し、選択されるまで見続けるよう指示しているため、視線の移動を 1 試行前のターゲットから赤色のターゲットとみなすことができる。

40 個のターゲットを全て見終わると 1 タスクが終了し、アイコンのみの表示となりターゲットの表示がなくなる。タスク間には、実験による目の疲労を抑えるために少なくとも 1 分以上の休憩を取るよう指示した。提案手法へのキャリブレーションを行った後にも休憩を取った。1 セッション（3 タスク）が終了すると、該当セッションに関して、ターゲット選択はスムーズに行われたか、実験に集中できたか、目、体および精神的な疲れを 5 段階のリッカート尺度を用いたアンケートにて調査した。また、意図した選択をすることが難しかった、選択が出来なかったターゲットの位置に関するアンケートを行った。その後少なくとも 5 分以上の休憩を設けた。セッション間の休憩は必要に応じてより長い時間を設けた。タスク間およびセッション間の休憩中は、実験参加者に頭部固定機から頭を離すよう指示した。提案手法および従来手法ともに 2 セッションずつ終了した後に各手法を比較するアンケートを行った。アンケートの内容はどちらの手法を使用することが疲れたか、どちらの手法が簡単に選択できたかである。実験は、平均約 83 分を要し、実験参加者には謝金として 1,640 円が支払われた。

6.6 結果

実験時に、眼鏡を着用した実験参加者の視線認識精度が保たれず、タスクを実施することが困難であったため、眼鏡を着用した実験参加者 1 名（P17）を除いた 16 名の実験参加者（P1–P16）の結果を用いて解析を行った。

実験前および、セッション終了後に行ったアンケートの結果を図 6.3 に示す。また、全セッション終了後に行った各手法の比較アンケートの結果を図 6.4 に示す。提案手法の方が疲れるとした実験参加者からのコメントより、「セッション開始前に行うキャリブレーションがあったため」という意見があった。また、従来手法の方が簡単に選択できたと回答した実験参加者からのコメントより、「従来手法の方がリズムカルに選択できた。」や「従来手法は視線移動をした際に、見たと同時に選択されてしまった。」という意見があった。

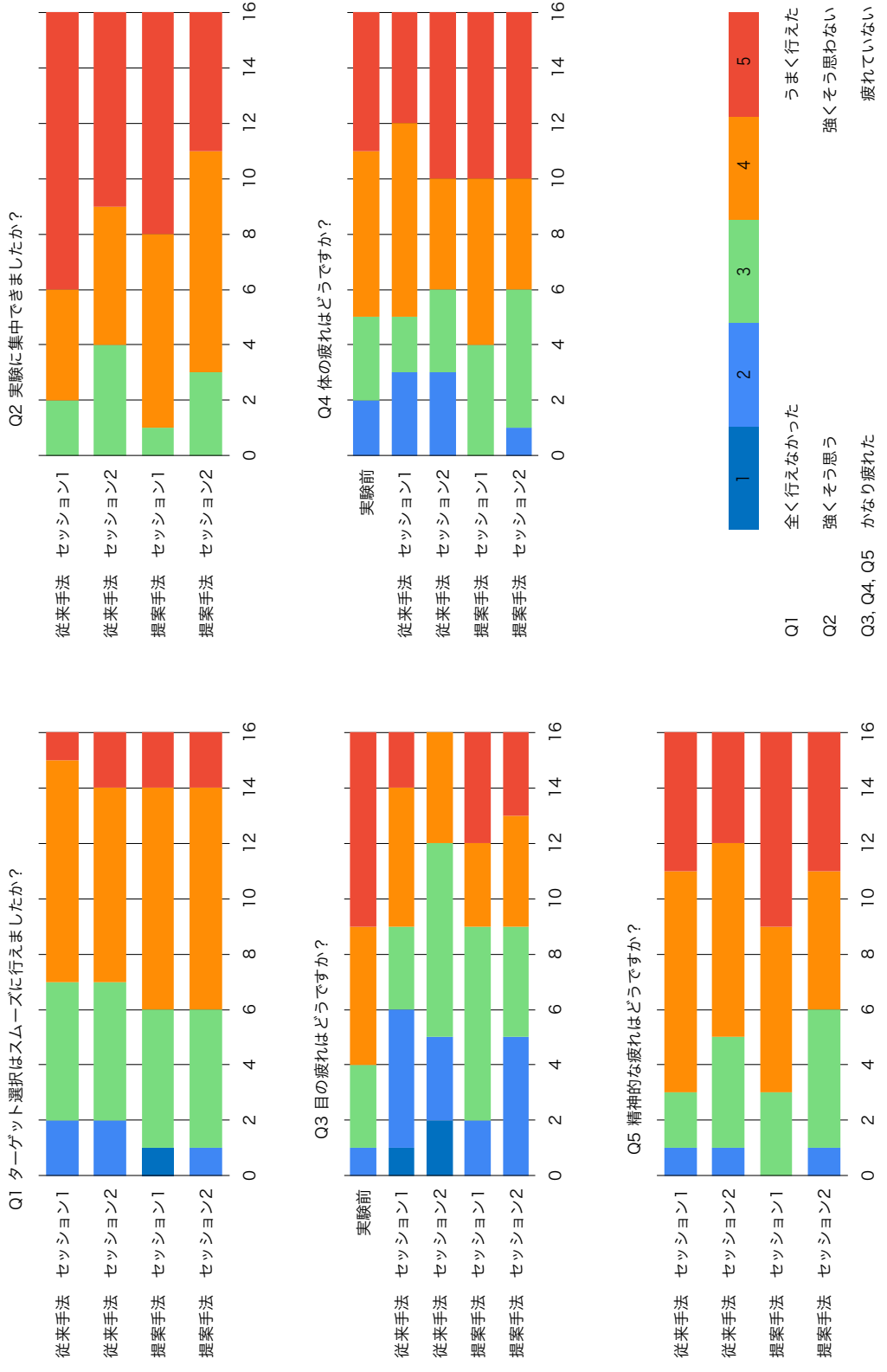


図 6.3: 実験時に行ったアンケート結果

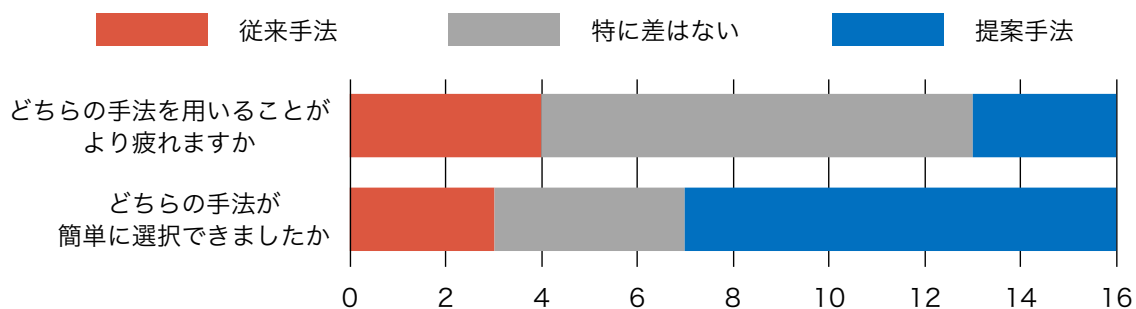


図 6.4: 全セッション終了時に行った各手法の比較アンケート

実験結果は、何も選択されなかった（ターゲットの選択およびミダスタッチが生じなかった）試行を含んでいた。意図した選択が行われなかった、また、選択ができなかったターゲットの位置に関するアンケート結果を提案手法および従来手法それぞれ、図 6.5 および図 6.6 に示す。図 6.5 および図 6.6 は、選択ができなかったターゲットの位置ごとのヒートマップを示したものであり、色が濃いターゲットがより多く回答されたターゲットの位置である。画面の最外枠にあたるターゲットの位置の選択が出来なかったことがわかる。また、Feit ら [FWT⁺17] の研究においても、画面の左右上下の端は視線認識の精度が減少するとされている。何も選択されなかった試行は提案手法を用いた際は全体で約 11.5% であり、従来手法を用いた際は全体で約 13.3% であった。これは、図 6.5 および図 6.6 にて、色の濃い画面の上下左右 4 隅が選択できなかったと想定すると、1 タスクのうちの 4 試行であるため 10% であり妥当だといえる。これらのデータを用いて、提案手法において凝視に要した時間およびミダスタッチが生じた割合を求めた。

6.6.1 凝視に要する時間

凝視に要した時間は、正常にターゲット選択が行われた試行を用いて求めた。凝視に要した時間は、ターゲットに視線が入ってから選択されるまでの時間である。各実験参加者ごとの凝視に要した時間を提案手法および従来手法それぞれ、図 6.7 および図 6.8 に示す。提案手法を用いた試行の凝視に要した時間の平均は 86.69 ms（標準偏差：24.15）であった。また、従来手法を用いた試行の凝視に要した時間の平均は 408.9 ms（標準偏差：1.379）であった。従来手法において、凝視に要した時間は 400 ms としたが、Tobii EyeX のサンプリングレートが 60 Hz であったため約 16 ms 未満の差が生じた。実験参加者からの「従来手法の方がリズムカルに選択できた」というコメントは、従来手法の凝視に要した時間の標準偏差に比べ、提案手法の標準偏差が大きいことが原因だと考える。提案手法を用いた試行の凝視に要した時間は、従来手法を用いた試行の凝視に要した時間より約 80% 短かった。試行の中には、凝視に要する時間が 0 秒である（視線がターゲットに入ると同時に選択される）ものもあった。何も選択されなかった試行が従来手法より提案手法の方が少なかった要因として、提案手法の凝視に要する時間が少ないことがあげられる。凝視を行う際は、Tobii EyeX から得られ

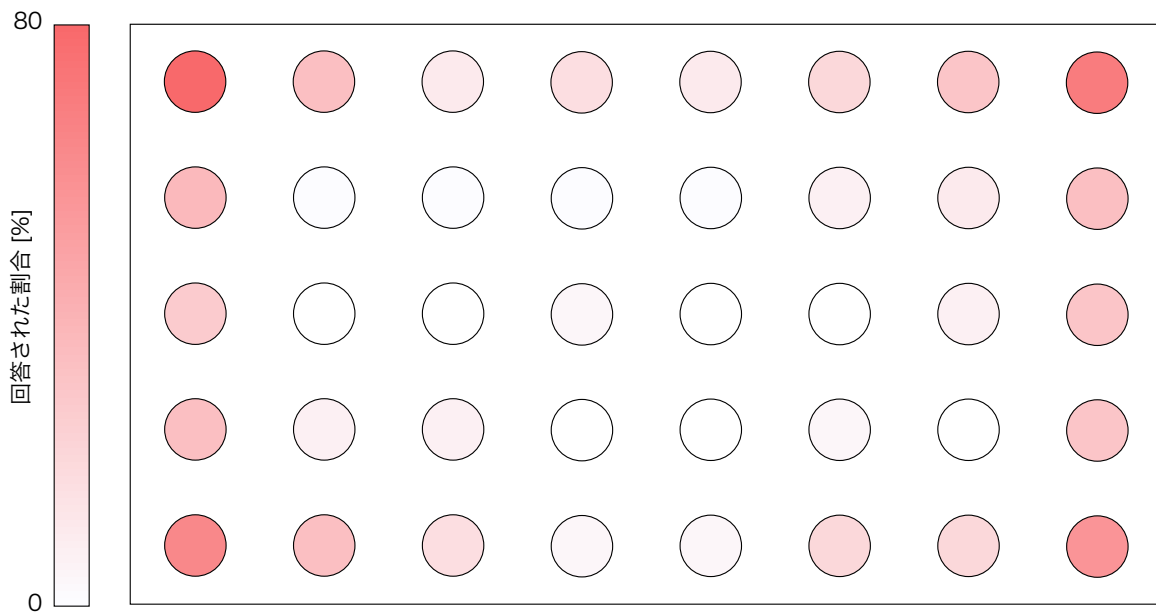


図 6.5: 提案手法時の選択ができなかったターゲットの位置に関するアンケート結果．回答が多かったターゲットの位置を濃い色とする

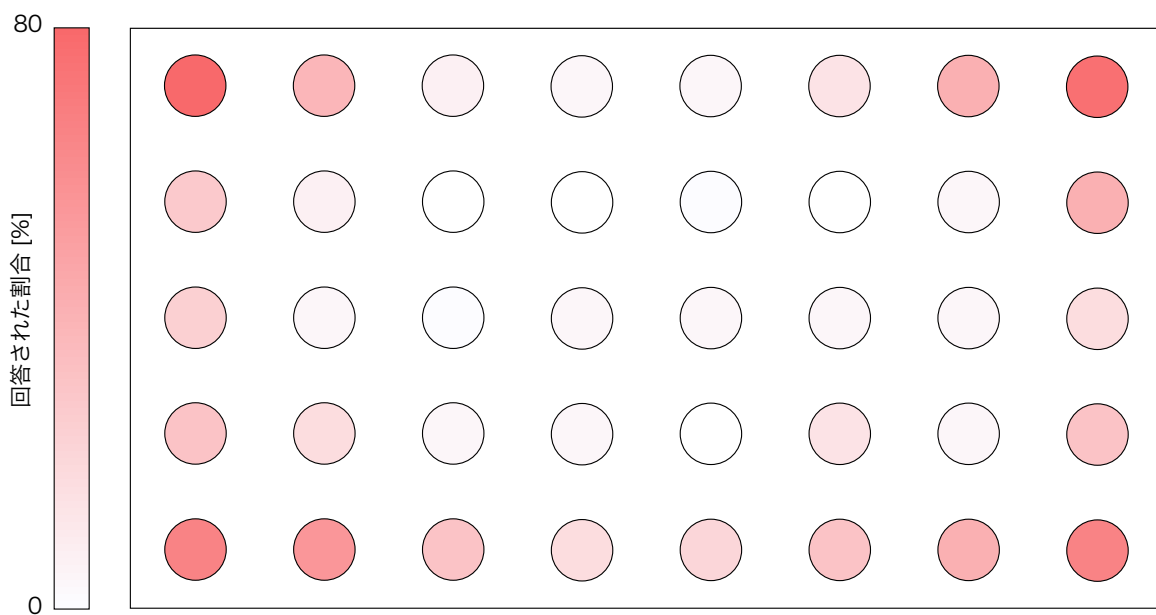


図 6.6: 従来手法時の選択ができなかったターゲットの位置に関するアンケート結果．回答が多かったターゲットの位置を濃い色とする

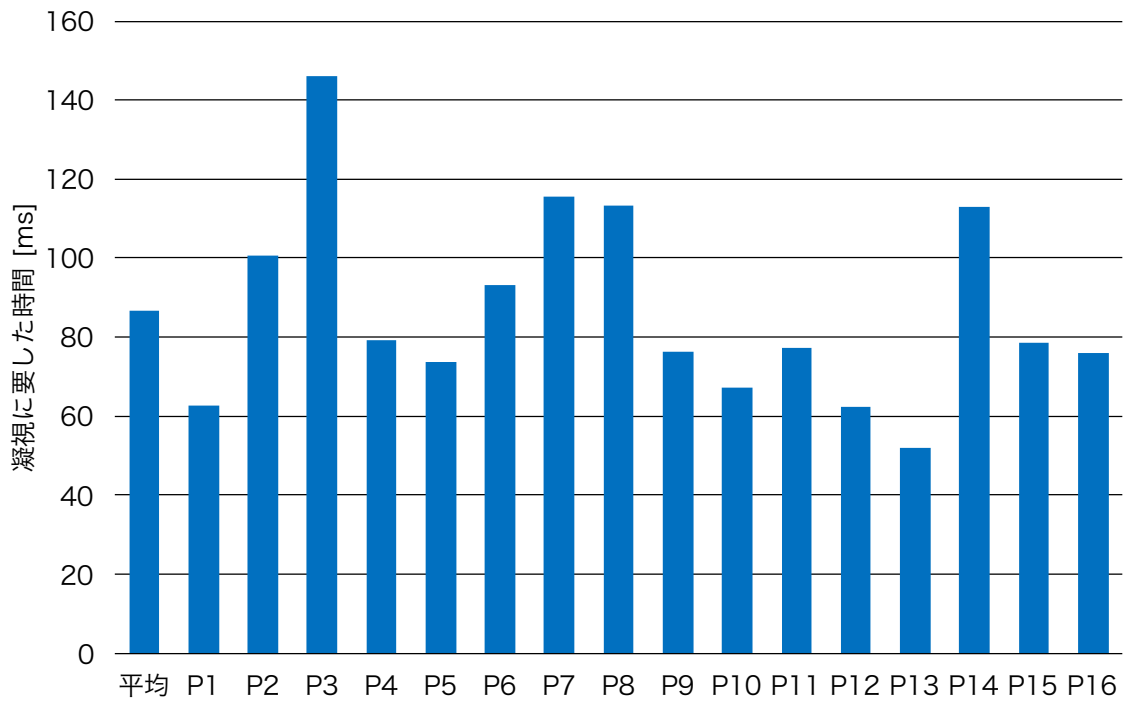


図 6.7: 提案手法における各実験参加者ごとの凝視に要した時間

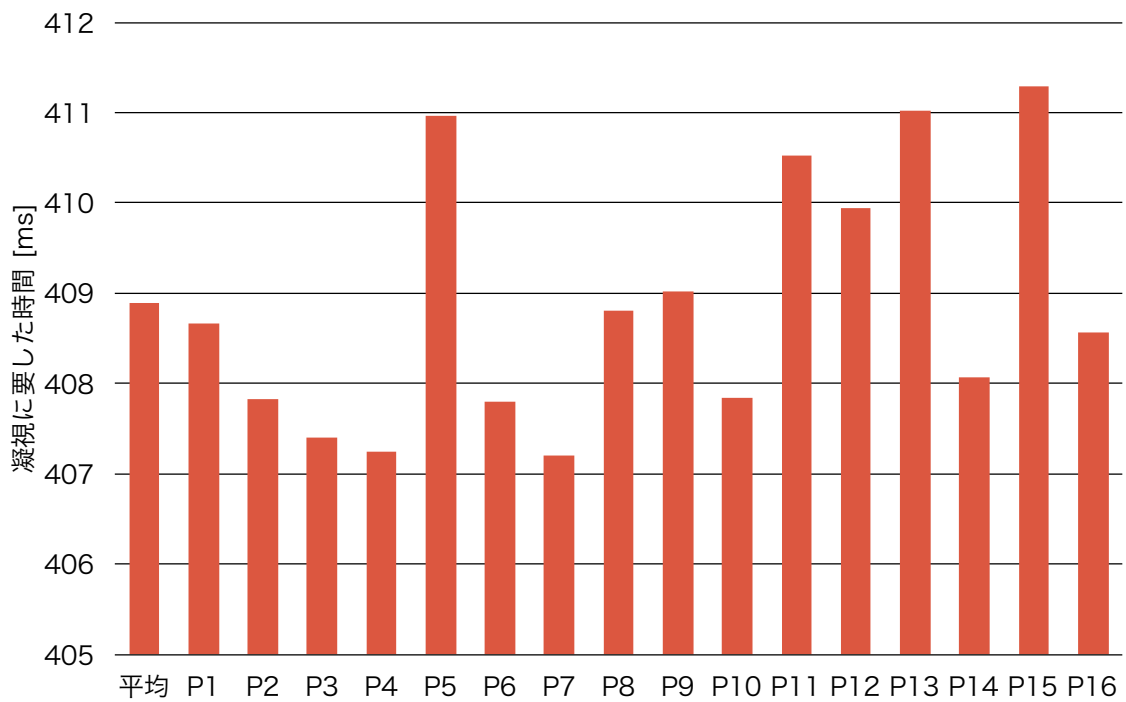


図 6.8: 従来手法における各実験参加者ごとの凝視に要した時間

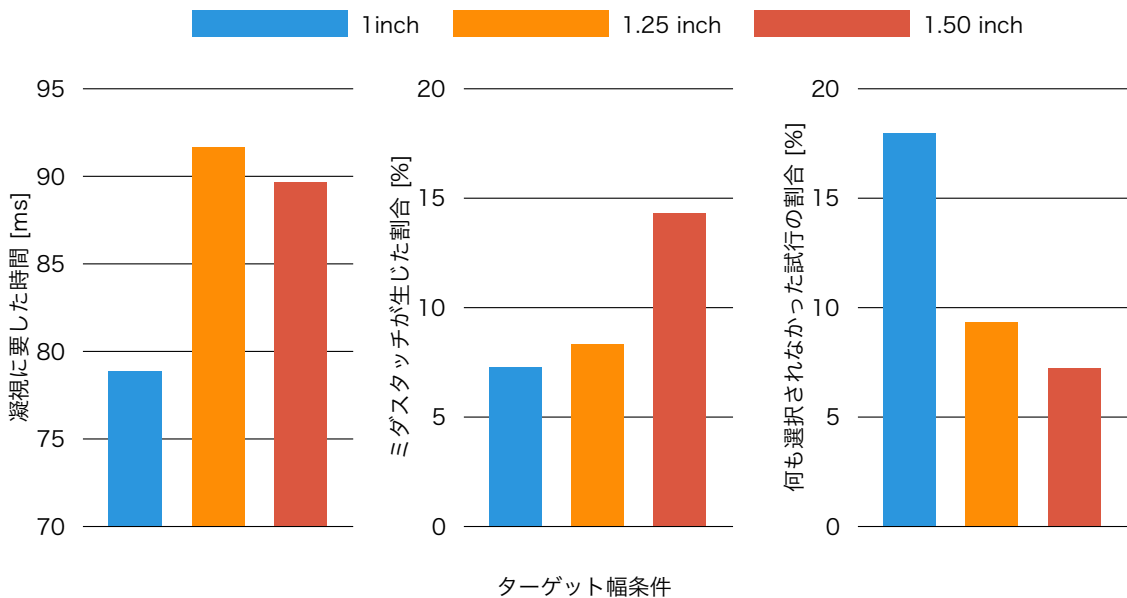


図 6.9: 提案手法におけるターゲット幅条件ごとの実験結果．左) 凝視に要した時間．中) ミダタッチの生じた割合．右) 何も選択されなかった試行の割合

る視線座標がターゲット内に一定時間以上入っている必要がある．これは視線認識の認識精度に影響し，ターゲットを見ているにもかかわらず，視線座標がターゲット内に一定時間以上入らなくなることが生じる．結果として，凝視に要する時間が短い提案手法の方が，凝視に要する時間が長い従来手法より，何も選択されなかった試行が少なかった．

また，図 6.9 左にターゲット幅条件ごとの凝視に要した時間を示す．ターゲット幅がそれぞれ，1.00 inch，1.25 inch および 1.50 inch のとき凝視に要した時間は，それぞれ 78.79 ms，91.65 ms および 89.63 ms であった．

6.6.2 ミダタッチ問題

ミダタッチが生じる割合を，式 6.2 を用いて求めた．

$$\text{ミダタッチの割合} = \frac{\text{ミダタッチが生じた試行数}}{\text{成功した試行数} + \text{ミダタッチが生じた試行数}} \quad (6.2)$$

各実験参加者ごとのミダタッチの生じた割合を提案手法および従来手法それぞれ，図 6.10 および図 6.11 に示す．

提案手法を用いた試行のミダタッチが生じた割合の平均は 10.0% (標準偏差: 4.76) であった．また，従来手法を用いた試行のミダタッチが生じた割合の平均は 0.70% (標準偏差: 0.79) であった．提案手法における，実験参加者の眼の状態ごとのミダタッチの割合は，裸眼の場合 6.10% (標準偏差: 2.84)，眼鏡の場合 13.6% (標準偏差: 2.69) およびコンタ

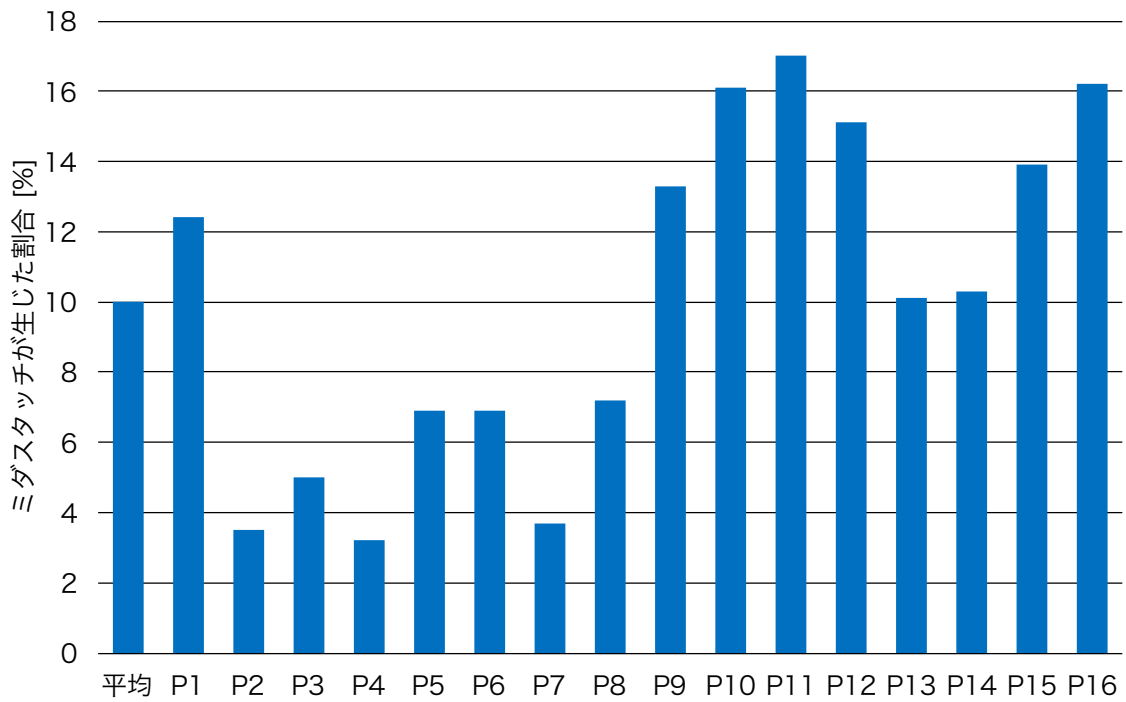


図 6.10: 提案手法における各実験参加者ごとのミダスタッチが生じた割合

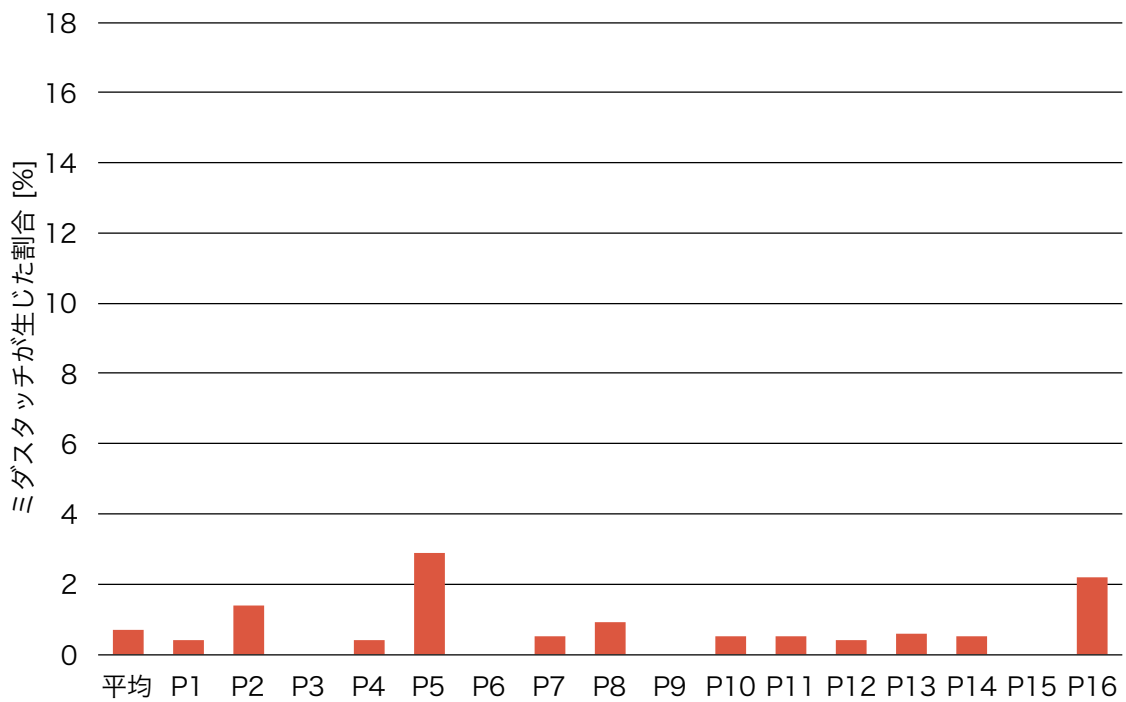


図 6.11: 従来手法における各実験参加者ごとのミダスタッチが生じた割合

トの場合 15.0% (標準偏差: 1.15) であった。裸眼に比べ、眼鏡およびコンタクトの場合のミダタッチの割合が大きい原因の 1 つに Tobii EyeX の認識精度の問題がある。前述した、画面の端の認識精度が減少する問題の他に、認識精度がユーザの目の状態に影響することがあげられる。

タスクを行うことが難しかった P17 は、Tobii EyeX へのキャリブレーション後の視線推定の正確さは十分であったが、視線が明らかにばらついていた。提案手法は、視線移動を検出するために、1 フレームごとに視線の移動距離を求めている。よって、視線が大きくばらつくと、誤った視線移動の検出が生じ提案手法を用いることができない。Tobii EyeX はユーザの目の状態に限らず視線認識を行うことが可能である。しかし、眼鏡を着けているユーザの場合、P17 のように Tobii EyeX より推定された視線座標が著しくばらつくことがある。また、コンタクトの実験参加者兩名から、「ドライアイがひどく、眼を開けておくおよび動かすことが辛い」との意見があった。眼鏡およびコンタクトの場合に、ミダタッチが多く生じたのは、こういったものが影響したと考える。

図 6.9 中に、ターゲット幅条件ごとのミダタッチが生じた割合を示す。ターゲット幅がそれぞれ 1.00 inch, 1.25 inch および 1.50 inch のとき、それぞれ 7.26% (標準偏差: 4.29), 8.32% (標準偏差: 5.95) および 14.3% (標準偏差: 9.24) であり、ターゲット幅が大きいものほどミダタッチが多く生じた。これは、ターゲット幅が大きいほど、視線がターゲット以外のアイコン内に入りやすいことに加え、上記の精度の問題があると考えられる。例えば、ターゲット幅が 1.50 inch において、認識された視線座標がばらつくことによりターゲットに近い位置にあるアイコンに視線が入りやすくなる。視線の移動開始座標とターゲットの中心座標までの距離およびターゲットに近い位置にあるアイコンの中心座標までの距離は、ターゲットとアイコンが近い位置にあるため大きな差はない (フィッツの法則に用いる ID に大きな差がなくなる)。結果として、隣接したターゲットに視線が入ってしまった際にミダタッチが生じたと考えられる。

第7章 議論

本章において、本手法の制限、フィッツの法則と視線を用いた操作手法および定数決定のためのキャリブレーションの自動化に関する議論を行う。

7.1 本手法の制限

実験1および実験2に雇用した実験参加者は、健康な21–24歳の大学生および大学院生の男性であり、実験参加者の属性が偏っている。つまり、本手法を女性、高齢者や、筋萎縮性側索硬化症（ALS）といった疾患を持ったユーザが用いることが可能かは不明である。また、今回行った実験において、選択を行うターゲットの形は円形のみである。円形のみを対象とした実験のみでは、実環境を想定した際に不十分である。例えば、実環境においてターゲットとなる対象の形は、デスクトップ上のアイコンの場合だと四角、ブラウザなどを閉じるボタンの場合だと円、URLのリンクの場合だと横長の文字列であるように場面によって異なるためである。3.2節において、述べたように意図した視線移動の検出は可能である。しかし、意図した視線移動の中でも、ターゲット選択のための視線の移動かターゲットを見るための視線の移動かは判別することができない。また、現状は、視線認識システムの認識精度に大きく影響を受けている。視線認識精度の影響を抑えるためにフィルタ処理を行うことを考える。

7.2 フィッツの法則と視線を用いた操作手法

関連研究および本研究において、視線を用いた操作手法がフィッツの法則に基づいていることを述べた。Drewes [Dre13] は、フィッツの法則と様々な操作手法の関係の調査をまとめている。その中で、視線を用いた操作手法は、視線が弾道的な動きを行い、この動きはターゲットの大きさに依存しないためフィッツの法則に基づかないと仮説を立てている。また、視線が何を見ているかを正確に判断できない限りは、ターゲットの大きさを定めることができないという点からも、同様のことを述べている。例えば、ビデオを見ているときのターゲットおよびターゲットの大きさをどのように定めるかや、顔を見ている時に、顔の中でも鼻、口、目、もしくは顔全体のうち、どこを見ているかを判断することである。これらは、HCI分野における調査のみだけでなく、より心理学や眼球運動に近い分野から調査を行う事により、検証できると述べている。

本手法は、視線を用いた操作手法がフィッツの法則に基づくことを前提としているため、Drewes が述べていることを調査する必要がある。

7.3 定数決定のためのキャリブレーションの自動化

6章にて行った実験のアンケートより「提案手法と従来手法では、定数決定のためのキャリブレーションを行うため、提案手法のほうが疲れた。」という意見があった。本手法を用いる際に、毎回、キャリブレーションを行うことは、ユーザの疲労を考慮すると望ましくない。これを解決するために、フィッツの法則を表す式 3.1 に用いる定数 a および b を求めるための本手法へのキャリブレーションを自動的に行う手法を実装する。つまり、図 4.2 のような画面を用いて明示的にキャリブレーションを行うのではなく、ユーザに対して非明示的に本手法へのキャリブレーションを行うものである。キャリブレーションには、ターゲット選択が行われた際のターゲットの幅、視線の移動開始地点からターゲットまでの距離および、視線の移動開始時間からターゲット選択がされるまでの時間の3つを用いる。ターゲット選択時に、これらの値を保持しておく。これらの値を用いて回帰分析を行い、キャリブレーションを行う。これを実装するためにキャリブレーションを行う適切なタイミングを求める必要がある。

第8章 今後の展望

本章においては今後の展望に関して述べる．今後は操作手法の拡張，動くおよび変形するターゲットの選択手法に関して研究を行う．

8.1 操作手法の拡張

本研究は，視線を用いた操作手法の中でも，視線の動きをターゲット選択に用いている．しかし，実環境を想定すると，ターゲット選択のみではなく，ターゲットの移動および複数選択といった操作を実装する必要がある．これを実現するために，2つの手法を検討する．1つ目は，ターゲットの領域を分割しそれぞれの領域に操作を割り当て，本手法を用いてターゲット選択が行われたときに視線の位置が含まれている領域の操作を実行する手法である．例えば，領域を左右2分割したターゲットの操作を行う．ターゲット領域の右側に視線がある際は，そのままターゲット選択を行う．左側に視線がある際は，ターゲットを移動するためにターゲットに視線を移したとみなし，次の視線移動を用いてターゲットの移動を行う．2つ目は，ターゲット選択が行われた際に，ターゲットの周囲に各操作手法を表すアイコンを表示し，それらをさらに選択する事により操作を行う手法である．しかし，前者は，視線認識に非常に高い精度を要することや，操作が複雑化する問題があり，後者は，操作を行うために選択を2度行う必要があるという問題がある．

8.2 フィッツの法則を用いた動くおよび変形するターゲットの選択

ターゲットの位置が変化する (D が変化する) およびターゲットの形が変化する (W が変化する) 場合に本手法の適応を行う．円以外の形を対象とした視線を用いた操作手法とフィッツの法則に関する調査は，Murata ら [MKMF15] は，移動方向やターゲットの形に応じたフィッツの法則のモデルを導いている．また，Hild ら [HKB16] は，視線を用いた動くターゲット選択に関する研究を行っている．これらの研究を参考に，選択するターゲットに対応したフィッツの法則の式を用いることにより，本手法を用いて変形するおよび移動するターゲットの選択が可能である．

このようなターゲット選択の使用例は，視線を用いたゲームの操作である．ゲーム操作におけるポインティングは，静的なターゲットではなく動的なターゲットの選択を行う事が多い．本手法を特に，バーチャルリアリティ (VR) 環境のゲームに適応することを想定している．VR 環境におけるターゲット選択を Gugenheimer ら [GDW⁺16] は，ヘッドマウン

トディスプレイ (HMD) の背面にタッチディスプレイを取り付けタッチすることにより実現している。しかしこれは、VR 環境を体験しているユーザの視界の外で操作を行っているため、実際にタッチを行う点と選択される点との対応を取ることが難しい。FOVE 0 [Fov18] や Tobii Pro VR インテグレーション [Tob18] のような、視線認識が可能な HMD を用いることにより VR 環境において視線を用いた操作を行える。視線認識が可能な HMD を用いることにより、見たものを選択できる直感的な操作に加え、素早い操作を行うことができる。

第9章 おわりに

フィッツの法則に基づく視線を用いたターゲット選択手法を実現した。本手法を用いることにより視線を用いた操作手法において凝視に要する時間が短縮した。本手法は、フィッツの法則から推測される視線の移動に要する時間と実際の視線移動に要する時間を比較し、これらの差が小さい時にターゲット選択を行うことにより凝視に要する時間を短縮する。本手法は、ターゲット選択のための視線移動がフィッツの法則に従っていることを前提とするため、まず、この関係を調査した。調査の結果、エラー修正を行った後の寄与率 r^2 が 0.90 であった。その後、実験結果を用いて本手法の設計を行い、評価実験を行った。結果、ターゲット選択時の凝視に要する時間は先行研究と比較し 80%以上減少し、ミダスタッチ問題が生じる割合は、10%であった。今後は、本手法の性能の向上および用途を広げることを目指し、ターゲット選択以外の操作手法や、動くターゲットを対象としたターゲット選択手法を実現する。

謝辞

本研究を進めるにあたり，志築文太郎先生，高橋伸先生には多くのご意見とご指導を頂きました。心から感謝いたします。特に志築文太郎先生には，研究の進め方，論文執筆をはじめとして研究に関することを基礎からご指導いただきました。また，研究に関する相談にも乗っていただき，多くのご助言を頂きました。重ねて感謝いたします。インタラクティブプログラミング研究室の同期，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や論文の添削といった研究に関するだけでなく，学部卒業後の進路の相談といった人生についても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。深く感謝いたします。中でも，安藤宗孝氏には研究方針，実験の方法，論文執筆など本研究における重要な部分において多くのアドバイスを頂き大変お世話になりました。ここに厚くお礼申し上げます。また，研究生活に限らず，多くの面において支えて頂いた友人，大学生活にてお世話になった皆様に感謝申し上げます。最後に，普段から私を支えてくださった両親に深く感謝いたします。

参考文献

- [Chi14] 株式会社 ナモト貿易. chinrest オリジナルあごのせ台. <http://www.namoto.com/vision/chinerest.html>, 2014. (最終閲覧 2018-1-27).
- [CM17] Justin Cuaresma and Ian Scott Mackenzie. FittsFace: Exploring Navigation and Selection Methods for Facial Tracking. In *International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction*, pp. 403–416. Springer, 2017.
- [CXH15] Ishan Chatterjee, Robert Xiao, and Chris Harrison. Gaze+Gesture: Expressive, Precise and Targeted Free-Space Interactions. In *Proceedings of the 2015 ACM on International Conference on Multimodal Interaction, ICMI '15*, pp. 131–138, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [Dre13] Heiko Drewes. A Lecture on Fitts' Law. [http://www.cip.ifi.lmu.de/~drewes/science/fitts/A Lecture on Fitts Law.pdf](http://www.cip.ifi.lmu.de/~drewes/science/fitts/A%20Lecture%20on%20Fitts%20Law.pdf), 2013. (最終閲覧 2018-1-27).
- [EVBG15] Augusto Esteves, Eduardo Velloso, Andreas Bulling, and Hans Gellersen. Orbits: Gaze Interaction for Smart Watches using Smooth Pursuit Eye Movements. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '15*, pp. 457–466, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [FCB14] Wenxin Feng, Ming Chen, and Margrit Betke. Target Reverse Crossing: A Selection Method for Camera-Based Mouse-replacement Systems. In *Proceedings of the 7th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, PETRA '14*, pp. 39:1–39:4, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [Fit54] P. M. Fitts. The Information Capacity of the Human Motor System in Controlling the Amplitude of Movement. *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 74, pp. 381–391, 1954.
- [Fov18] FOVE Inc. FOVE Eye Tracking Virtual Reality Headset. <https://www.getfove.com/>, 2018. (最終閲覧 2018-1-27).

- [fS12] International Organization for Standardization. Ergonomics of human-system interaction – Part 411: Evaluation methods for the design of physical input devices. ISO ISO/TS 9241-411:2012, 2012.
- [FWT⁺17] Anna Maria Feit, Shane Williams, Arturo Toledo, Ann Paradiso, Harish Kulkarni, Shaun Kane, and Meredith Ringel Morris. Toward Everyday Gaze Input: Accuracy and Precision of Eye Tracking and Implications for Design. In *Proceedings of the 35th SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 1118–1130, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [GDW⁺16] Jan Gugenheimer, David Dobbstein, Christian Winkler, Gabriel Haas, and Enrico Rukzio. FaceTouch: Enabling Touch Interaction in Display Fixed UIs for Mobile Virtual Reality. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pp. 49–60, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [HKB16] Jutta Hild, Christian Kühnle, and Jürgen Beyerer. Gaze-Based Moving Target Acquisition in Real-Time Full Motion Video. In *Proceedings of the 9th Biennial ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, ETRA '16, pp. 241–244, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [Jac91] Robert J. K. Jacob. The Use of Eye Movements in Human-computer Interaction Techniques: What You Look at is What You Get. *ACM Transaction on Information Systems*, Vol. 9, No. 2, pp. 152–169, 1991.
- [KFJ⁺16] Andrew Kurauchi, Wenxin Feng, Ajjen Joshi, Carlos Morimoto, and Margrit Betke. EyeSwipe: Dwell-free Text Entry Using Gaze Paths. In *Proceedings of the 34th SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 1952–1956, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [Lea17] Leap motion inc. Leap Motion. <https://www.leapmotion.com/>, 2017. (最終閲覧 2018-1-27).
- [Lig17] Tobii AB. Light conditions - Tobii Eye Tracking Support. <https://help.tobii.com/hc/en-us/articles/210251245-Light-conditions>, 2017. (最終閲覧 2018-1-27).
- [LZL⁺15] Yi Liu, Chi Zhang, Chonho Lee, Bu-Sung Lee, and Alex Qiang Chen. GazeTry: Swipe Text Typing Using Gaze. In *Proceedings of the Annual Meeting of the Australian Special Interest Group for Computer Human Interaction*, OzCHI '15, pp. 192–196, New York, NY, USA, 2015. ACM.

- [Mac15] Ian Scott Mackenzie. Fitts' Throughput and the Remarkable Case of Touch-based Target Selection. In *Proceedings of the 17th International Conference on Human-Computer Interaction*, HCII 2015, pp. 238–249. Springer, 2015.
- [Min00] Darius Miniotas. Application of Fitts' Law to Eye Gaze Interaction. In *Proceedings of the 18th SIGCHI Conference Extended Abstract on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '00, pp. 339–340, New York, NY, USA, 2000. ACM.
- [MKMF15] Atsuo Murata, Ipei Konishi, Makoto Moriwaka, and Daichi Fukunaga. Fitts' modeling of pointing time in eye-gaze input system that takes into account the effects of target shape and display location on pointing performance. *Procedia Manufacturing*, Vol. 3, No. Supplement C, pp. 5358–5365, 2015.
- [MWWM17] Martez E. Mott, Shane Williams, Jacob O. Wobbrock, and Meredith Ringel Morris. Improving Dwell-Based Gaze Typing with Dynamic, Cascading Dwell Times. In *Proceedings of the 35th SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 2558–2570, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [NDA⁺17] Aanand Nayyar, Utkarsh Dwivedi, Karan Ahuja, Nitendra Rajput, Seema Nagar, and Kuntal Dey. OptiDwell: Intelligent Adjustment of Dwell Click Time. In *Proceedings of the 22nd International Conference on Intelligent User Interfaces*, IUI '17, pp. 193–204, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [PACG14] Ken Pfeuffer, Jason Alexander, Ming Ki Chong, and Hans Gellersen. Gaze-touch: Combining Gaze with Multi-touch for Interaction on the Same Surface. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, pp. 509–518, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [PG16] Ken Pfeuffer and Hans Gellersen. Gaze and Touch Interaction on Tablets. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pp. 301–311, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [PPT15] Diogo Pedrosa, Maria da Graça Pimentel, and Khai N. Truong. Filteryedping: A Dwell-Free Eye Typing Technique. In *Proceedings of the 33rd SIGCHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '15, pp. 303–306, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [RT17] Adrian Ramcharitar and Robert J. Teather. A Fitts' Law Evaluation of Video Game Controllers: Thumbstick, Touchpad and Gyrosensor. In *Proceedings*

of the 35th SIGCHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '17, pp. 2860–2866, New York, NY, USA, 2017. ACM.

- [SDRD17] Simon Schenk, Marc Dreiser, Gerhard Rigoll, and Michael Dorr. GazeEverywhere: Enabling Gaze-only User Interaction on an Unmodified Desktop PC in Everyday Scenarios. In *Proceedings of the 35th SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 3034–3044, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [SJ00] Linda E. Sibert and Robert J. K. Jacob. Evaluation of Eye Gaze Interaction. In *Proceedings of the 18th SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '00, pp. 281–288, New York, NY, USA, 2000. ACM.
- [TABG15] Jayson Turner, Jason Alexander, Andreas Bulling, and Hans Gellersen. Gaze+RST: Integrating Gaze and Multitouch for Remote Rotate-Scale-Translate Tasks. In *Proceedings of the 35th SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 4179–4188, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [The16] The EyeTribe. The Eye Tribe. <https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/theeyetribe.com/theeyetribe.com/index.html>, 2016. (最終閲覧 2018-1-27).
- [Tob17] Tobii AB. Tobii EyeX for PC Gaming. <https://tobiigaming.com/product/tobii-eyex/>, 2017. (最終閲覧 2018-1-27).
- [Tob18] Tobii AB. Tobii Pro offers VR integration services. <https://www.tobiipro.com/ja/product-listing/vr-integration/>, 2018. (最終閲覧 2018-1-27).
- [Ver08] Roel Vertegaal. A Fitts' Law Comparison of Eye Tracking and Manual Input in the Selection of Visual Targets. In *Proceedings of the 10th International Conference on Multimodal Interfaces*, ICMI '08, pp. 241–248, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [WM87] Colin Ware and Harutune H. Mikaelian. An Evaluation of an Eye Tracker As a Device for Computer Input. In *Proceedings of the SIGCHI/GI Conference on Human Factors in Computing Systems and Graphics Interface*, CHI '87, pp. 183–188, New York, NY, USA, 1987. ACM.
- [ZM07] Xuan Zhang and Ian Scott Mackenzie. Evaluating Eye Tracking with ISO 9241 - Part 9. In *Proceedings of the 12th International Conference on Human-*

computer Interaction: Intelligent Multimodal Interaction Environments, HCI '07, pp. 779–788, Berlin, Heidelberg, 2007. Springer-Verlag.

付録A 実験1に用いた各種書類

実験1に用いた実験同意書，実験前および実験中アンケートを以下に示す．

A.1 実験同意書

視線によるポインティングの法則調査実験のお願い

文責：礪本 俊弥

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、コンピュータの画面を見る際の、眼の動きの法則を調査することです。
- 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。

実験開始時刻 _____

実験時間 _____

平成 年 月 日

被験者 所属 _____ 署名 _____

説明者 所属 情報学群 情報メディア創成学類 _____ 署名 _____

A.3 実験中アンケート

実験に関するアンケート

文責：礪本 俊弥

セッション 1

1. ターゲット選択はスムーズに行えましたか？
(上手く行えた) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (全く行えなかった)
2. 実験に集中できましたか？
(強くそう思う) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (強くそう思わない)
3. 目の疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)
4. 体の疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)
5. 精神的な疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

次のページへ続きます

セッション2

1. ターゲット選択はスムーズに行えましたか？
(上手く行えた) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (全く行えなかった)
2. 実験に集中できましたか？
(強くそう思う) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (強くそう思わない)
3. 目の疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)
4. 体の疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)
5. 精神的な疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

次のページへ続きます

セッション3

1. ターゲット選択はスムーズに行えましたか？
(上手く行えた) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (全く行えなかった)

2. 実験に集中できましたか？
(強くそう思う) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (強くそう思わない)

3. 目の疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

4. 体の疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

5. 精神的な疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

次のページへ続きます

セッション4

1. ターゲット選択はスムーズに行えましたか？
(上手く行えた) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (全く行えなかった)

2. 実験に集中できましたか？
(強くそう思う) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (強くそう思わない)

3. 目の疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

4. 体の疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

5. 精神的な疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

次のページへ続きます

セッション5

1. ターゲット選択はスムーズに行えましたか？
(上手く行えた) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (全く行えなかった)

2. 実験に集中できましたか？
(強くそう思う) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (強くそう思わない)

3. 目の疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

4. 体の疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

5. 精神的な疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

以上で実験は終了となります。ありがとうございます。

付録B 実験2に用いた各種書類

実験2に用いた実験同意書，実験前および実験中アンケートを以下に示す．

B.1 実験同意書

視線によるポインティングの実験のお願い

文責：礒本 俊弥

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、眼の動きを用いたコンピュータへの操作手法を調査することです。
- 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。

グループ _____

実験開始時刻 _____

実験時間 _____

平成 年 月 日

被験者 所属 _____ 署名 _____

説明者 所属 情報学群 情報メディア創成学類 _____ 署名 _____

B.3 実験中アンケート

実験に関するアンケート：実験中アンケート

文責：礪本 俊弥

従来手法 セッション 1

1. ターゲット選択はスムーズに行えましたか？
(上手く行えた) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (全く行えなかった)

2. 実験に集中できましたか？
(強くそう思う) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (強くそう思わない)

3. 目の疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

4. 体の疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

5. 精神的な疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

次のページへ続きます

従来手法 セッション2

1. ターゲット選択はスムーズに行えましたか？
(上手く行えた) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (全く行えなかった)

2. 実験に集中できましたか？
(強くそう思う) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (強くそう思わない)

3. 目の疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

4. 体の疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

5. 精神的な疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

次のページへ続きます

提案手法 セッション 1

1. ターゲット選択はスムーズに行えましたか？
(上手く行えた) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (全く行えなかった)

2. 実験に集中できましたか？
(強くそう思う) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (強くそう思わない)

3. 目の疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

4. 体の疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

5. 精神的な疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

次のページへ続きます

提案手法 セッション 2

1. ターゲット選択はスムーズに行えましたか？
(上手く行えた) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (全く行えなかった)

2. 実験に集中できましたか？
(強くそう思う) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (強くそう思わない)

3. 目の疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

4. 体の疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

5. 精神的な疲れはどうですか？
(疲れていない) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (かなり疲れた)

B.4 意図した選択をすることが難しかったおよび選択が出来なかった
ターゲットの位置に関するアンケート

<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

B.5 手法比較アンケート

実験に関するアンケート：手法比較アンケート

文責：磯本 俊弥

どちらの手法を用いることがより疲れますか

従来手法 ・ 特に差はない ・ 提案手法

理由

どちらの手法が簡単に選択できましたか

従来手法 ・ 特に差はない ・ 提案手法

理由

その他コメント等あれば記入をお願いします。

以上で実験は終了となります。ありがとうございます。