

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

# カードボード VR 環境のための空中操作

石井 晃

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

2018年3月

## 概要

スマートフォン（以下、携帯端末）をヘッドマウントディスプレイとして用いることによりバーチャルリアリティ（VR）環境（以下、カードボード VR 環境）を実現する製品がある。このようなカードボード VR 環境では安価かつ手軽に VR 体験が可能である一方で、タッチパネルをカードボード VR ゴーグルが覆うことによりタッチ操作が制限される。そのため、ゲームのような積極的なインタラクションを必要とするアプリケーションは実現が困難である。この問題に対し本研究においては、携帯端末の背面空間にて手を動かすことによるターゲット選択手法を示す。提案手法は、携帯端末の背面カメラにより検出した手の位置に応じて画面上にポインタを表示する。ユーザは手を動かすことによりポインティングを行った後、親指を曲げる操作によりターゲット選択を行う。提案手法は携帯端末に内蔵されたカメラのみで実装可能であるため、カードボード VR 環境におけるターゲット選択手法として追加の機器無しに適用可能である。本論文においては、提案手法の実装方法およびターゲット選択性能を調査した評価実験結果を述べるとともに、アプリケーション例を示し提案手法の実用性を示す。また、カードボード VR ゴーグルに小型のミラーを取り付けることにより操作領域を携帯端末の背面空間からカードボード VR ゴーグルの下部領域に移動する手法について述べる。さらに、カードボード VR ゴーグル下部領域におけるターゲット選択手法を2つ示し、それらのターゲット性能を調査した評価実験結果について述べる。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	カードボード VR 環境とその操作における課題	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	3
<b>第2章</b>	<b>関連研究</b>	<b>5</b>
2.1	大型ディスプレイ向けのターゲット選択手法	5
2.2	カメラを用いて手を認識することによる携帯端末操作手法	6
2.3	HMD 向けの操作手法	6
2.3.1	カメラを用いた操作手法	6
2.3.2	カメラ以外のセンサやデバイスを用いた操作手法	6
2.4	カードボード VR 環境向けの操作手法	7
2.5	本研究の位置づけ	8
<b>第3章</b>	<b>実装</b>	<b>9</b>
3.1	手の検出	9
3.2	ポインタ座標の決定	9
3.3	クリック操作の判定	11
3.4	プロトタイプ	11
<b>第4章</b>	<b>評価実験</b>	<b>14</b>
4.1	実験1: 操作に最適な指の調査	14
4.1.1	実験協力者および実験機器	14
4.1.2	指条件	14
4.1.3	実験タスクと手順	15
4.1.4	結果	16
	選択時間	16
	中心からのずれ	17
	質的評価	18
4.1.5	議論	19
4.2	実験2: ターゲットサイズごとの性能評価	20

4.2.1	実験協力者および実験機器	20
4.2.2	ターゲット条件	20
4.2.3	実験タスクと手順	21
4.2.4	結果	22
	選択時間	22
	エラー率	23
	質的評価	23
4.3	実験3：手の支えによる影響の調査	23
4.3.1	実験協力者および実験機器	24
4.3.2	支え条件	24
4.3.3	ターゲット条件	24
4.3.4	実験タスクと手順	24
4.3.5	実験結果	27
	選択時間	27
	エラー率	28
4.3.6	議論	28
4.4	実験4：ターゲット領域別選択性能評価	28
4.4.1	実験協力者および実験機器	29
4.4.2	実験計画	29
4.4.3	実験タスクと手順	30
4.4.4	結果	30
	選択時間	30
	エラー率	31
	ユーザビリティ	31
4.4.5	議論	34
	ターゲット領域ごとのエラー率	34
	設計指針	35
	ユーザビリティ	36
	腕の疲れ	36
	手法自体の評価に焦点を当てた実験	36
	ポインタの表示位置	37
<b>第5章</b>	<b>アプリケーション</b>	<b>39</b>
5.1	シューティングゲーム	39
5.2	文字入力	39
<b>第6章</b>	<b>カードボード VR ゴーグルの改良</b>	<b>41</b>
<b>第7章</b>	<b>カードボード VR ゴーグル下部領域における空中ジェスチャを用いたターゲット</b>	

	選択手法「FistPointer-Mirror」の実装	44
7.1	マーカ	44
7.2	操作姿勢	44
7.3	画像処理アルゴリズム	45
7.3.1	マーカの検出	46
7.3.2	ポインタ座標の決定	46
7.3.3	クリック操作の判定	47
7.4	プロトタイプ	47
<b>第 8 章</b>	<b>カードボード VR ゴーグル下部領域におけるジョイスティックメタファを用いたターゲット選択手法「Joystick-Mirror」の実装</b>	<b>49</b>
8.1	ジョイスティックメタファを用いたターゲット選択手法	49
8.2	マーカ	50
8.3	操作姿勢	50
8.4	画像処理アルゴリズム	51
8.4.1	マーカの検出	51
8.4.2	ポインタ座標の決定	51
8.4.3	クリック操作の判定	53
8.5	プロトタイプ	53
<b>第 9 章</b>	<b>カードボード VR ゴーグル下部領域におけるターゲット選択手法の評価</b>	<b>55</b>
9.1	実験協力者および実験機器	55
9.2	ターゲット条件	55
9.3	実験タスクと手順	55
9.4	結果	56
9.4.1	選択時間	56
9.4.2	エラー率	57
9.5	議論	57
9.5.1	ターゲット選択性能	58
9.5.2	下部領域における手の動かし方の傾向	58
<b>第 10 章</b>	<b>今後の展望</b>	<b>60</b>
10.1	手検出アルゴリズムの改良	60
10.2	奥行きを利用した操作方法の検討および評価	60
10.3	連続的にターゲットサイズを変えた場合の性能評価	61
10.4	下部領域操作におけるより自然な手の位置-ポインタ間の写像	61
10.5	カードボード VR ゴーグル下部領域におけるターゲット選択手法のマーカを用いない実装	61
<b>第 11 章</b>	<b>おわりに</b>	<b>62</b>

謝辞	63
参考文献	64
著者論文リスト	71
付録A 実験1にて使用した実験同意書, 事前アンケート用紙, 事後アンケート用紙, 実験手順書	76
A.1 実験同意書	77
A.2 事前アンケート用紙	78
A.3 事後アンケート用紙	79
A.4 実験手順書	81
付録B 実験2にて使用した実験同意書, 事前アンケート用紙, 事後アンケート用紙	83
B.1 実験同意書	84
B.2 事前アンケート用紙	85
B.3 事後アンケート用紙	86
付録C 実験3にて使用した実験同意書, 事前アンケート用紙, 事後アンケート用紙	88
C.1 実験同意書	89
C.2 事前アンケート用紙	90
C.3 事後アンケート用紙	91
付録D 実験4にて使用した実験同意書, 事前アンケート用紙, 事後アンケート用紙, SUSのアンケートフォーム	92
D.1 実験同意書	93
D.2 事前アンケート用紙	94
D.3 事後アンケート用紙	95
D.4 SUSのアンケートフォーム	97
付録E シューティングゲームの評価に使用した事後アンケート用紙	100
E.1 事後アンケート用紙	101

# 目次

1.1	カードボード VR ゴーグル. . . . .	2
1.2	提案手法を用いて VR ゲームを操作している様子. 空中に表示されている画面はユーザがカードボード VR ゴーグル越しに見ているゲーム画面である. . .	3
3.1	提案手法に用いられる手の姿勢. 左:ポインティング時. 右:クリック時. .	10
3.2	$y$ 座標 $i$ における回帰直線 (赤線). . . . .	11
3.3	検出した手の形状 (黒), 幅 (半透明の水色), および回帰直線の傾きの大きさ (赤). . . . .	12
3.4	カメラ画像と操作領域間のポインタの位置関係. . . . .	13
3.5	クリック操作の判定. 左:ポインティング時. 右:クリック時. . . . .	13
4.1	実験風景 (実験 1). . . . .	15
4.2	合計選択時間. エラーバーは標準偏差を示す. . . . .	17
4.3	クリック回数ごとの選択時間. . . . .	17
4.4	中心からのずれ. エラーバーは標準偏差を示す. . . . .	18
4.5	選択された座標の分布 [pixel]. (0,0) が中心である. . . . .	19
4.6	質的評価の結果. . . . .	19
4.7	ターゲット条件. . . . .	21
4.8	実験環境 (実験 2). . . . .	22
4.9	実験結果. エラーバーは標準偏差を示す. . . . .	23
4.10	支え条件. 上: non-support 条件. 下: support 条件. . . . .	25
4.11	実験 3 において使用したカードボード VR ゴーグル. . . . .	26
4.12	選択時間. エラーバーは標準偏差を示す. . . . .	27
4.13	エラー率. エラーバーは標準偏差を示す. . . . .	28
4.14	実験結果. 各領域におけるエラー率. 緑色の矩形で囲まれた領域は, 平均エラー率が 10%未満の領域である (精度 90%). . . . .	32
4.15	各行のエラー率. 上から下へ 1-15 行を示す. 線グラフは各行の平均エラー率を示す. 色の付いた棒グラフは 4 つの領域に分割された各行の平均エラー率を示す. . . . .	32
4.16	各列のエラー率. 左から右へ 1-26 列を示す. 線グラフは各列の平均エラー率を示す. 色の付いた棒グラフは 4 つの領域に分割された各列の平均エラー率を示す. . . . .	33

4.17	アンケート調査の結果. . . . .	33
4.18	検出された手. 左: 検出アルゴリズムが正しく認識できる手の形. 右: 検出アルゴリズムが正しく認識できない手の形. なお, カメラは左側にある. . . . .	34
4.19	小型のミラーをカメラ部分に取り付けることにより操作領域を下部に移動することができる. . . . .	35
4.20	中心からのずれ. . . . .	37
5.1	シューティングゲーム. . . . .	40
5.2	文字入力アプリケーション. . . . .	40
6.1	カードボード VR 環境における提案手法の操作領域. 青い領域は操作領域を示す. 左: 従来. 右: ミラーを取り付け操作領域を下部へ移動した場合. . . . .	41
6.2	カードボード VR ゴーグルにミラーを取り付けた様子. . . . .	42
6.3	ミラー付きカードボード VR ゴーグルにおけるカメラの取得画像. . . . .	43
7.1	FistPointer-Mirror に用いるマーカ. . . . .	45
7.2	操作姿勢. 左: ポインティング時. 右: クリック時. . . . .	45
7.3	画像処理によるマーカの検出. ポインティング時は2つのマーカが検出されているが, クリック時は親指によりマーカ(青)が遮蔽されるため, 1つのマーカしか検出されない. なお, ミラーから得られた画像のため左右反転している. 左: 取得された元画像. 右: 検出されたマーカ. . . . .	46
7.4	ミラーとマーカを用いた FistPointer-Mirror のプロトタイプ. 赤い点はポインタを示す. . . . .	48
8.1	ジョイスティックメタファを用いた操作のイメージ. . . . .	49
8.2	Joystick-Mirror に用いるマーカ. . . . .	50
8.3	操作領域提示用マーカ. . . . .	50
8.4	操作姿勢. 左: ポインティング時. 右: クリック時. . . . .	51
8.5	画像処理によるマーカの検出. ポインティング時は操作領域提示用マーカとクリック判定用マーカが隣接しているが, クリック時は隣接していない. なお, ミラーから得られた画像のため左右反転している. 左: 取得された元画像. 右: 検出されたマーカ. . . . .	52
8.6	ミラーとマーカを用いた Joystick-Mirror のプロトタイプ. 赤い点はポインタを示す. . . . .	54
9.1	選択時間. エラーバーは標準偏差を示す. なお, FistPointer の値は本実験から得られたものではなく, 実験2のデータである. . . . .	57
9.2	エラー率. エラーバーは標準偏差を示す. なお, FistPointer の値は本実験から得られたものではなく, 実験2のデータである. . . . .	58



# 第1章 はじめに

本論文は、スマートフォン（以下、携帯端末）をヘッドマウントディスプレイ（HMD）として用いることによりバーチャルリアリティ（VR）環境（以下、カードボード VR 環境）を実現する製品において利用可能な、追加の機器を必要としないターゲット選択手法を示す。本章においては、まず背景としてカードボード VR 環境の概略を示し、コンピュータと HMD を用いるリッチな VR 環境と携帯端末を用いるカードボード VR 環境の操作方法に関する比較を行い、カードボード VR 環境特有の課題について述べる。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 カードボード VR 環境とその操作における課題

Google Cardboard [Goob] やハコスコ [HAC] に代表される、携帯端末を HMD のディスプレイとして用いることにより VR 環境を実現する製品がある（図 1.1）。コンピュータと HMD を用いるリッチな VR 環境（例：Oculus Rift CV1 [Ocu], HTC VIVE [HTC], PlayStation VR [Son] など）と比較して、このようなカードボード VR 環境は安価（1,000 円程度）であり、我々は手軽に VR を体験することができる。しかしながら、カードボード VR 環境は携帯端末のタッチパネルを覆うため、携帯端末へのタッチ操作が制限される。そのため、現状ではコンテンツの閲覧が主な用途となっており、ゲームのような積極的なインタラクションを必要とするアプリケーションは実現が困難である。Oculus Rift のようなリッチな VR 環境の場合は専用のコントローラが存在し、主要な操作方法が用意されている。一方で、カードボード VR 環境の場合は専用コントローラが存在しないため、主要な操作方法が用意されていない。また、カードボード VR 環境の利点は安価かつ手軽に VR 体験が可能な点であるため、コントローラのような追加の機器を必要とする操作手法は避けるべきである。そのため、追加の機器を必要としないカードボード VR 環境向けの新たな操作手法を開発する必要がある。

## 1.2 目的とアプローチ

本研究の目的は、カードボード VR 環境に対して追加の機器を必要としない操作手法を示すことである。そこで、携帯端末の背面空間にて手を動かすことによるターゲット選択手法 FistPointer [阿達 16] を VR 環境における操作へ適用することにより解決を試みた（図 1.2）。FistPointer は、携帯端末の背面カメラにより検出した手の位置に応じて画面上にポインタを表示する。ユーザは図 1.2 に示す姿勢にて手を動かすことによりポインティングを行った後、



図 1.1: カードボード VR ゴーグル.

親指を曲げる操作（クリック操作）によりターゲット選択を行う．提案手法は手の検出に携帯端末の背面カメラを用いるため，カードボード VR 環境向けのターゲット選択手法として追加の機器を必要とせずに適用可能であり，カードボード VR 環境に対する新たな操作手法となり得る．

本論文では，提案手法を示した後，実験によりターゲット選択性能を調査しその特性を示すとともに，VR 環境において提案手法を使用するときのデザインガイドラインを示す．また，アプリケーション例を示し提案手法の実用性を示す．さらに，カードボード VR ゴーグルに小型のミラーを取り付けた新たなカードボード VR ゴーグルにより，実験において示された提案手法における疲労の問題を解決する．

### 1.3 貢献

本研究の貢献を以下に列挙する．

- カードボード VR 環境に対して追加の機器を必要としないターゲット選択手法を示した．
- 評価実験を行うことにより，提案手法の性能評価を行い，提案手法の特性を明らかにした．
- 評価実験から得られた提案手法の特性を元に，VR 環境において提案手法を使用するときのデザインガイドラインを示した．
- 提案手法を用いるアプリケーションを示し，提案手法の実用性を示した．



図 1.2: 提案手法を用いて VR ゲームを操作している様子. 空中に表示されている画面はユーザがカードボード VR ゴーグル越しに見ているゲーム画面である.

- カードボード VR ゴーグルに小型のミラーを取り付けた新たなカードボード VR ゴーグルを発明した.
- 小型のミラーを取り付けたカードボード VR ゴーグルにより操作領域を携帯端末の背面空間からカードボード VR ゴーグルの下部領域に移動する手法を示した.
- カードボード VR ゴーグル下部領域におけるターゲット選択手法を示した.
- 評価実験を行うことにより, カードボード VR ゴーグル下部領域におけるターゲット選択手法の特性を明らかにした.

## 1.4 本論文の構成

本論文の構成を述べる. 2 章にて, 本論文に関連する研究ならびに本研究の位置づけを述べる. 3 章にて, 提案手法の具体的な実装方法を述べる. 4 章にて, 提案手法の性能を調査するために行った, 操作に最適な指の調査 (実験 1), ターゲットサイズごとの性能評価 (実験 2), 手の支えによる影響の調査 (実験 3), およびターゲット領域別選択性能評価に関する実験 (実験 4) を述べる. 5 章にて, 提案手法を用いたアプリケーションとしてシューティングゲームおよび文字入力アプリケーションについて述べ, 提案手法の実用性を示す. 6 章にて,

カードボード VR ゴーグルに小型のミラーを取り付けることにより操作領域を携帯端末の背面空間からカードボード VR ゴーグルの下部領域に移動する手法を述べる。7章および8章にて、カードボード VR ゴーグル下部領域におけるターゲット選択手法を示す。9章にて、カードボード VR ゴーグル下部領域におけるターゲット選択手法に対する評価実験について述べる。10章にて、提案手法の今後の展望を述べる。11章にて、本論文のまとめを述べる。

また、付録 A にて、実験 1 にて用いた各種書類を示す。付録 B にて、実験 2 にて用いた各種書類を示す。付録 C にて、実験 3 にて用いた各種書類を示す。付録 D にて、実験 4 にて用いた各種書類を示す。付録 E にて、提案手法を用いたシューティングゲームの評価にて用いた各種書類を示す。

## 第2章 関連研究

提案手法は、携帯端末の背面カメラを用いてユーザの手の動きを認識することによるターゲット選択手法である。このようなマウスなどの操作機器を用いずに手の動き（ジェスチャ）を端末操作に応用したユーザインタフェースを Natural User Interface (NUI) と呼び、提案手法もこの NUI に包含される。そこで、NUI による操作が多く採用されている大画面ディスプレイ向けのターゲット選択手法を示す。また、実装面において提案手法はユーザの手および指の動きをカメラにて認識し、端末操作に応用する操作手法と関連する。さらに、提案手法はカードボード VR 環境向けのターゲット選択手法として適用可能であるため、VR 環境向けの操作手法を含む HMD に対する操作手法にも関連する。本章ではこれらの関連研究を述べた後、本研究の位置づけを述べる。

### 2.1 大型ディスプレイ向けのターゲット選択手法

手を空中にて動かすことによるターゲット選択手法は大画面ディスプレイ向けの操作手法として数多く研究されてきた [GAI<sup>+</sup>16]。例えば、Vogel および Balakrishnan [VB05] は、大型ディスプレイ向けに、ジェスチャによる3つのポインティング手法および2つのクリック手法を提案した。Banerjee ら [BBGV11] はテーブルトップ向けに指先を空中にて動かすことによるポインティング手法を提案した。この研究においては、指先にトラッキング用のマークを取り付け、それをモーションキャプチャシステムを用いてトラッキングすることにより空中における指先の動きをテーブルトップの操作に適用している。Markussen ら [MJH13] は、大型ディスプレイ向けに、空中における手の動きを用いた3つのテキスト入力手法を提案した。Fukazawa ら [FTS<sup>+</sup>10] は、複数の大画面ディスプレイにおけるマルチモーダルインタラクション<sup>1</sup>について検討した。例えば、ジェスチャによるターゲット選択や頭の動きによるターゲット選択を比較している。築谷ら [築谷 10, STB07] は、大画面ディスプレイ向けに影のメタファを用いたポインティング手法を提案した。Haokan ら [CST16] は、大まかなポインティングを顔の向きによって行い、その後細かなポインティングを手を空中にて動かし行うことによって、大画面ディスプレイにおけるポインティングを可能にする手法を提案した。

---

<sup>1</sup>手や視線の動きなど複数種類の入力を操作に用いること。

## 2.2 カメラを用いて手を認識することによる携帯端末操作手法

携帯端末に搭載されたカメラを用いて手を認識することによる携帯端末操作手法が多数示されている。Baldaufらは、携帯端末に搭載された背面カメラにて検出した人差し指の位置によりポインティングを可能にする手法を提案し [BZFR11], また評価を行った [LBZ12]. Lvら [LHLK<sup>+</sup>13] は携帯端末を腕時計のように腕に固定して使うような状況を想定し、携帯端末に搭載された背面カメラを用いて検出した指の方向（角度）によりアプリケーションを操作する手法を示した。Songら [SSP<sup>+</sup>14] は携帯端末に搭載された背面カメラを用いて空中における手の形やジェスチャを検出し、アプリケーション操作へ応用する手法を提案した。この研究においては、空中におけるジェスチャとタッチ操作を組み合わせた操作も示している。

また、携帯端末に外部カメラを取り付けることによりポインティングを可能にする研究もなされてきた。Niikuraら [NWKI14] は携帯端末下部に取り付けられたハイスピードカメラと赤外線 LED を用いて指の高精度トラッキングを行った。Wigdorら [WFB<sup>+</sup>07] は、携帯端末背面に取り付けた Web カメラを用いて端末の背面タッチを認識し、10本指でのマルチタッチを可能とした。

## 2.3 HMD 向けの操作手法

近年、VR 環境向けの操作手法を含む HMD やスマートグラスに対する操作手法が数多く提案されている。それらの中には提案手法と同様に、カメラを用いた操作手法およびカメラ以外のセンサやデバイスを用いた操作手法が示されている。

### 2.3.1 カメラを用いた操作手法

Sugiuraら [STM14] は HMD に取り付けられた Web カメラにて認識した人差し指を用いたポインティング手法を示した。ユーザは HMD に表示された仮想ボタンを指先にてポインティングし、タップのような動作にて選択することができる。Katoら [KY13] は、手のジェスチャによるクリックおよびポインティングを検出可能なシステムを開発し、HMD に表示されたターゲットの選択において、マウスによる選択と速さを比較する実験を行った。Yuら [YPYM<sup>+</sup>15] はスマートグラスに内蔵された複数種類のカメラ（RGB カメラ、IR カメラ、深度カメラ）それぞれに対する手の検出方法を検討し、アルゴリズムを示した。また、4つのハンドジェスチャを定義し、3D モデルの操作に応用した。

### 2.3.2 カメラ以外のセンサやデバイスを用いた操作手法

Leeら [LKSK16] およびGugenheimerら [GDW<sup>+</sup>16, GSSR17] は HMD の前面にタッチパネルを取り付けることによりユーザのタッチを認識し、VR 環境への操作を可能にする研究を行った。Leeら [LKSK16] の手法は VR 環境のターゲット選択に手の動きに応じて移動するポ

インタを用いる。Gugenheimerら [GDW<sup>+</sup>16, GSSR17] はタッチ位置に応じてポインタを表示することによって VR 環境における操作を可能にした。Rupprechtら [RESH17] は加速度センサ等が内蔵されたスマートウォッチをセンサとして用いることにより、VR 環境における操作（例：手を上下左右に動かすスワイプ、回転する）を実現した。Sandら [SRI<sup>+</sup>15] は、HMD の前面に取り付けた Leap Motion [Lea] により、人差し指の位置を検出し、VR 空間におけるポインティング操作を実現した。この手法は超音波フェイズドアレイを HMD の前面に取り付けることによってボタンを押したかのような触覚も提示している。その他にも Leap Motion を HMD の前面に取り付けることにより手の位置やジェスチャを認識し、VR 空間において操作を行う手法が提案されている [PH15, LAKB17]。Yamashitaら [YKM<sup>+</sup>17] は HMD の内側に複数の近接センサを並べて配置し、その近接センサを用いて頬の隆起を計測することにより、頬を摘む動作を認識し VR 環境における操作を実現した。Withanaら [WPSN15] は HMD の側面に取り付けた複数の近接センサを用いてユーザの空中ジェスチャを認識する手法を示した。Tagら [TSZ<sup>+</sup>16] は鼻あての部分に取り付けられた眼電位センサから瞬きを認識し、端末操作に応用した。Leeら [LYD<sup>+</sup>17] は Tagらと同様に鼻あての部分に取り付けられた眼電位センサを用いて、鼻の下を指でこする、鼻の片方を指で押す、鼻を指で軽く弾く、というジェスチャを認識し端末の操作に応用した。Jantzら [JMA17] はユーザの脳波を VR 環境における操作に応用する手法を提案した。

## 2.4 カードボード VR 環境向けの操作手法

携帯端末に内蔵されたセンサを用いたカードボード VR 環境向けの操作手法や、カードボード VR ゴーグルに新たに機器やオブジェクトを追加することによって操作性を付与する研究が示されている。

Kato および Miyashita [KM15] はカードボード VR ゴーグルの側面に銀ナノ粒子インクを用いてユーザのタッチを検出する導電性のパターンを印刷し、ユーザがそのパターンをなぞることによってカードボード VR 環境へ入力を行う手法を示した。この手法は、カードボード VR ゴーグル側面に印刷した導電性のパターンを携帯端末のタッチパネルの一部に接続することにより、ユーザのタッチを携帯端末に伝えている。Kato および Miyashita [KM16] はオブジェクト表面におけるタッチをオブジェクトの底面に伝達することのできる 3D オブジェクトを提案した。このオブジェクトは導電性フィラメントを用いて 3D プリントされており、オブジェクト内に表面から底面にかけて導電性の支柱を点群状に配置することによってタッチを伝達する。この手法におけるこの導電性の点群を含む 3D オブジェクトは、カードボード VR ゴーグル側面に取り付けることができる。側面におけるタッチ操作を 3D オブジェクトを介することにより携帯端末に伝え、カードボード VR 環境における操作を実現している。Tregillusら [TF16] はカードボード VR 環境において、携帯端末に搭載された加速度センサを用いることにより、ユーザの足踏み動作を検出し、その動作をトリガーにして VR 環境内における歩行動作を実現した。Smus および Riederer [SR15] はカードボード VR ゴーグル側面に磁石を取り付け、その磁石が放出する磁力線を携帯端末に内蔵された磁気センサを用いてセンシング

することによりカードボード VR 環境における一次元の操作を提案した。この手法はユーザが磁石を動かすことにより生じた磁力線の変化を検出することによって操作を検出している。また、携帯端末の前面カメラを用いてユーザの視線を検出し、カードボード VR 環境への操作に応用している研究もある。Greenwald ら [GLF<sup>+</sup>16] はプルキンエ像を検出することによって、Hakoda ら [HYM17] は虹彩を検出することによってカードボード VR ゴーグル使用時の視線を計測している。

## 2.5 本研究の位置づけ

本研究は追加の機器を必要としないカードボード VR 環境向けのターゲット選択手法を示す。また、携帯端末の背面カメラを用いた実装方法を示すとともに、ターゲット選択手法の評価を行う。携帯端末においてカメラで手を認識しターゲット選択に用いるという点においては、上記で述べた研究 [BZFR11, LBZ12, LHLK<sup>+</sup>13, SSP<sup>+</sup>14] と同様であるが、提案手法においては VR 環境における操作としてより疲労度の少ない新たな操作姿勢を用いる。これまで関連研究において挙げてきた NUI におけるターゲット選択においては、ユーザは人差し指を立てる姿勢によりポインティングを行い、その指を折り曲げることにより選択を行う（例：HoloLens の AirTap [Mic]）。一方、提案手法においては、ユーザは親指を立てる姿勢（サムズアップポーズ）によりポインティングを行い、その指を折り曲げることにより選択を行う。



## 第3章 実装

提案手法の実装を述べる。提案手法は、携帯端末の背面空間にて手を動かすことによるターゲット選択手法である。ユーザは図 3.1 (左) に示す姿勢 (サムズアップポーズ) にて手を動かすことによりポインティングを行った後、図 3.1 (右) に示すように親指を曲げる動作によりターゲット選択 (クリック) を行う。この親指を折り曲げる操作はボタンを押すというメタファに基づく。この操作は、Gunslinger [LNV15] においても採用されており、メニュー選択タスクにおける性能調査がなされている [KL14]。提案手法は携帯端末の背面カメラから得た RGB 画像 (今回の実装では 320 pixel × 240 pixel) 中の手の位置に応じて画面上にポインタを表示し、画像中の手の形状からクリック操作の判定を行う。提案手法の実装方法は阿達ら [阿達 16] による実装と同様であるが、カードボード VR ゴーグルに適用するにあたりカメラ画像と操作領域間のポインタ位置の写像関係 (図 3.4) に変更を加えた。本章にて、手の検出、ポインタ座標の決定、およびクリック操作の判定の方法を示す。

### 3.1 手の検出

まず RGB 画像の各画素が手に相当するか否かを決定する。これには各画素に対して Song ら [SSP<sup>+</sup>14] の式 (3.1) を用いた。

$$S(u) = \begin{cases} 1 & (\min(R(u) - G(u), R(u) - B(u)) > \tau) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.1)$$

$R(u)$ ,  $G(u)$ ,  $B(u)$  はそれぞれ座標  $u$  にある画素の RGB 値であり、 $\tau$  はしきい値である。結果として  $S(u)$  は、座標  $u$  が手に相当する場合には 1、それ以外の場合には 0 となる。

次に各  $y$  座標において  $S(u) = 1$  となる画素群のうち最も幅のあるものを手とする。これにより、手の幅より小さなノイズを除去することが可能である。なお、ユーザは環境光および肌の色に応じて  $\tau$  を調整する必要がある。ただし、しきい値は 1 つのみであるため調整は容易である。

なお、これらは阿達ら [阿達 16] による実装と同様である。

### 3.2 ポインタ座標の決定

提案手法ではポインタ座標に対するクリック操作の影響を抑えるために、親指の動きに影響を受けない位置である手の右上 (人差し指の付け根に相当; 図 3.3 内の赤い点) をポインタ



図 3.1: 提案手法に用いられる手の姿勢. 左: ポインティング時. 右: クリック時.

とした. また, 提案手法ではクリック操作時に親指を上下に折り曲げるため, 親指の先端にポインタを表示するとクリック操作の時にポインタがぶれる. そのため, 親指の動きに影響されず, またユーザの操作の意識が向く親指に近い位置である手の右上にポインタを表示した. このポインタの座標を  $(x_p, y_p)$  とする.

各フレームにおけるポインタ座標を求めるには,  $y_p$  を先に求め, 次に  $y_p$  を基に  $x_p$  を求めることとした. このためにまず各  $y$  座標における手の幅を求める. 次に  $y$  座標  $i$  において,  $i$  を含む直前の 9 つの  $y$  座標  $(y_i, \dots, y_{i-8})$  における手の幅の回帰直線の傾きを求め (図 3.2), この回帰直線の傾き  $(\Delta x / \Delta y)$  を指先 (肌領域における最上端) 以降のすべての  $y$  座標に対して求める. 回帰直線の傾きがなす波形および手として検出された画素を重畳表示した様子を図 3.3 に示す. この図から, 親指の指先および付け根において傾きが大きくなっていることが分かる. 特に, 親指の付け根における傾きは親指の指先と比べて大きい. そこで, 回帰直線の傾きのピークを見つけ, そこを  $y_p$  とする. 次に,  $y_p$  において手と認識された画素群のうちの右端 (図 3.3 に赤い丸で示されている座標) の  $x$  座標を  $x_p$  とする.

なお, ポインタ座標を決めるために手の幅を利用すること, およびクリック操作の判定に親指を検出する必要があることから, カメラ画像には手全体が映っていなければならない. 以上により手の移動できる範囲に限られるため, ポインタ座標が取りうる値の範囲は実際のカメラ画像のサイズよりも狭くなる. そこで, 図 3.4 の黄色の矩形領域 (切り取り矩形領域) 内のポインタの座標が操作領域に写像されるようにした. 写像後の座標  $(x'_p, y'_p)$  はそれぞれ式 3.2, 式 3.3 にて表される (操作領域のサイズが  $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$  の場合).

$$x'_p = \begin{cases} 0 & (x_p < 70) \\ (x_p - 70) \times 8 & (70 \leq x_p \leq 310) \\ 1920 & (x_p > 310) \end{cases} \quad (3.2)$$

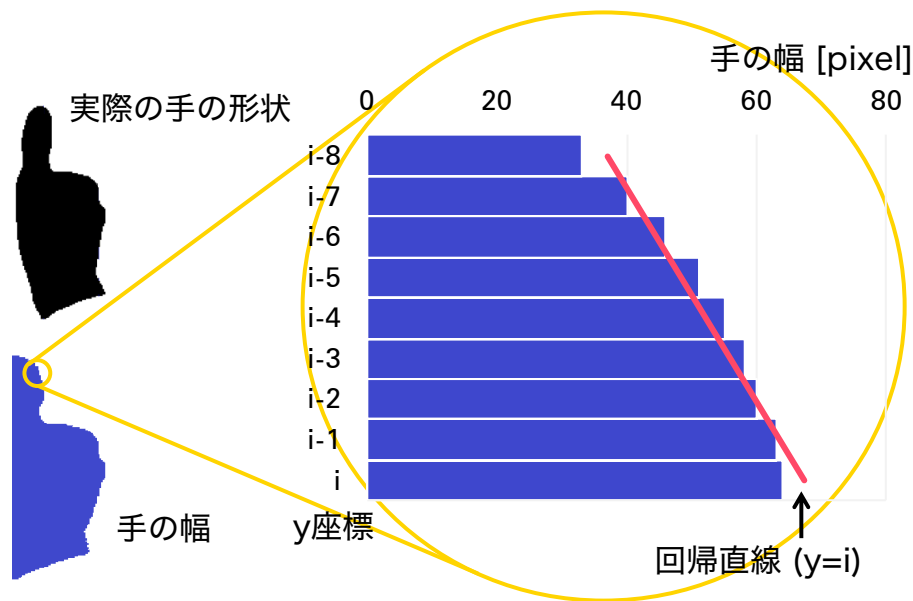


図 3.2:  $y$  座標  $i$  における回帰直線 (赤線)。

$$y'_p = \begin{cases} 0 & (y_p < 55) \\ (y_p - 55) \times 8 & (55 \leq y_p \leq 190) \\ 1080 & (y_p > 190) \end{cases} \quad (3.3)$$

なお、この式はカードボード VR ゴーグルに適用するにあたり、阿達ら [阿達 16] による実装から写像関係の定数に関して変更を加えた。

### 3.3 クリック操作の判定

クリック操作は、親指座標がポインタ座標に近づいた時に行われたと判定する。まず、手として認識された画素のうち、 $y$  座標が最も小さい画素群の中央座標を親指座標  $(x_t, y_t)$  とする。手の大きさ、およびカメラまでの距離の変化に対応できるように、 $y_p$  における手の幅を親指の高さ ( $y_t$  から  $y_p$  までの長さ) で割った値を求める。この値がしきい値 (今回は実験的に求めた 1.6) を超えたとき、クリック操作が行われたと判定する (図 3.5)。

なお、これらは阿達ら [阿達 16] による実装と同様である。

### 3.4 プロトタイプ

Android スマートフォン (SONY Xperia Z5) 上に提案手法のプロトタイプを実装した。本実装においては、カメラからの画像は 14.3 fps にて取得している。また、ポインタの移動のレイ

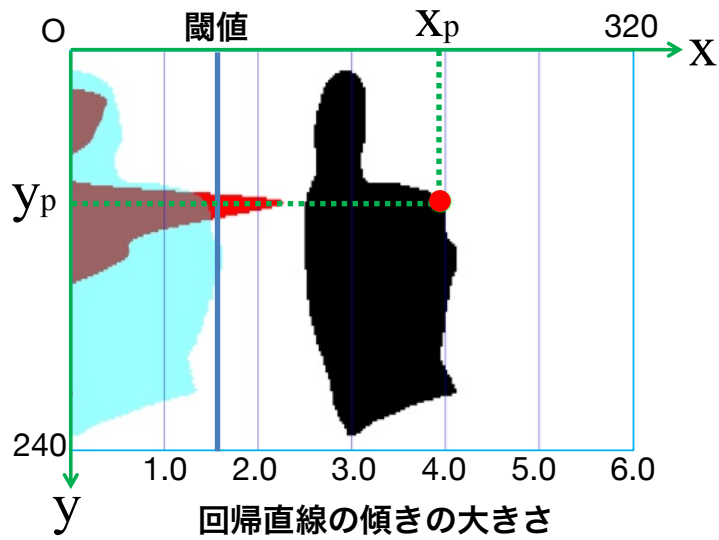
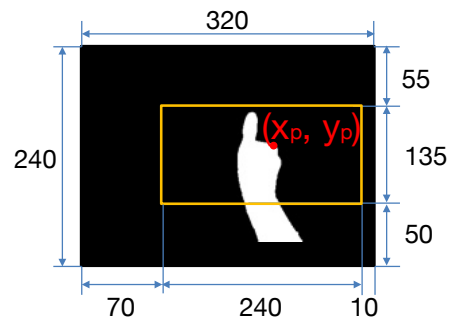


図 3.3: 検出した手の形状（黒）、幅（半透明の水色）、および回帰直線の傾きの大きさ（赤）。

テンシは 117 ms (60.2 fps) であり、クリック判定のレイテンシは 170 ms であった。これらのレイテンシはハイスピードカメラ (SONY DSC-RX100M5, 960 fps, 1920 pixel × 1080 pixel) にて計測した。



↓ 写像

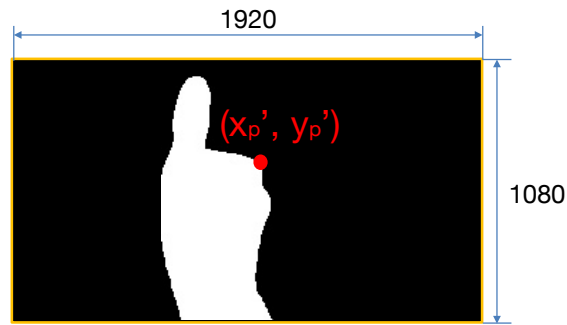


図 3.4: カメラ画像と操作領域間のポインタの位置関係.

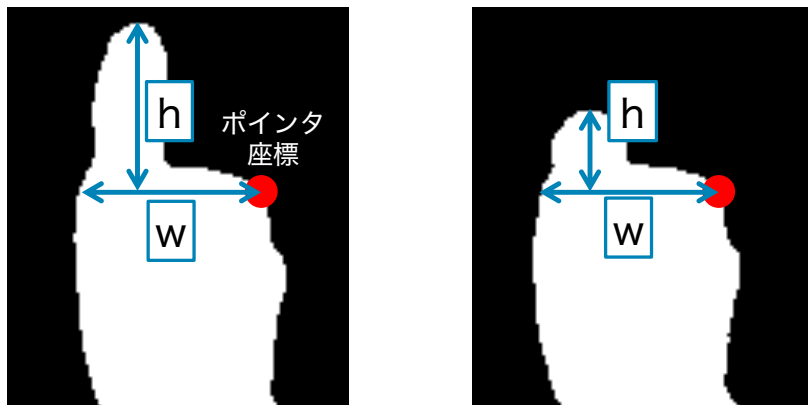


図 3.5: クリック操作の判定. 左: ポインティング時. 右: クリック時.

## 第4章 評価実験

提案手法を評価するために4つの実験を行った。本章においては、操作に最適な指の調査、ターゲットサイズごとの性能評価、手の支えによる影響の調査、ターゲット領域別選択性能評価に関する実験について述べる。

### 4.1 実験1：操作に最適な指の調査

提案手法において採用した「親指を折り曲げるという動作」が他の指を用いる場合と比べて使いやすいかを調査した。本実験においては、親指と人差し指の2条件を用いて、なるべく速くクリック動作をした時の速度と疲れを計測した。

なお、本実験において用いた書類は付録Aに示す。

#### 4.1.1 実験協力者および実験機器

大学生および大学院生16名（男性15名、女性1名、年齢20–27歳、平均23歳）を実験協力者とした。全ての実験協力者が日常的にスマートフォンを利用し、全員が右利きであった。スマートフォンの利用歴は平均69ヶ月であった。3名の実験協力者は日常的に手を上げる動作を行っていた（トランペットの演奏、ゴルフの練習、卓球）。また、すべての実験協力者は正常な裸眼視力もしくは矯正視力であった。5名がメガネを着用し、5名がコンタクトレンズを着用していた。

実験にはAndroid端末（Xperia Z5, 端末サイズ：高さ146mm × 幅72mm × 厚さ7.3mm, 画面サイズ：5.2インチ, 解像度：1920pixel × 1080pixel, カメラレンズのF値：2.0, カメラレンズの焦点距離：28mm, OS：Android 6.0.1）を用いた。

#### 4.1.2 指条件

提案手法ではボタンを押すことへのメタファを考慮して親指を折り曲げるジェスチャを決定動作として採用した。しかしながら、NUIにおいては一般的に人差し指が使われる（例：HoloLensのAirTap [Mic]）。そこで、カードボードVR環境における手を用いた操作に最も適した指を調査するため、親指条件と人差し指条件の2条件を指条件として比較した。



図 4.1: 実験風景（実験 1）.

人差し指条件のアルゴリズムは親指条件と同様のアルゴリズムを使用した．人差し指においてクリック操作の判定を行うために親指条件とは異なるしきい値を実験的に求め，人差し指条件においてはそのしきい値を使用した（親指条件：1.6，人差し指条件：1.0）．

#### 4.1.3 実験タスクと手順

実験は蛍光灯によって一様に照らされた会議室において行われた（図 4.1）．カメラの背景には汚れや模様のない白い壁を用いた．また，影の映り込みがない状態にて実験を行った．

実験者はまず，実験協力者に椅子に深く腰掛けるように指示した．その後腕を水平かつ前方に突き出した時にポインタが中央に位置するように携帯端末を三脚にて固定した．なお，腕が水平になっていることを水平器を用いて実験開始前に確認した．実験協力者に提案手法によるポインティングおよびクリックが正常に動作するかどうかを，画面中央および四隅に出現するターゲットをクリックすることにより確認するよう指示した．正常に動作しなかった場合は，しきい値 $\eta$ を調整してから再度動作確認を行うこととした．その後，実験協力者には画面中央および四隅に出現するターゲットを連続して5回選択するタスクを練習として行っ

てもらった。このとき、実験条件をそろえるため、実験者は実験協力者に、右手を用いて提案手法の操作を行うように指示した。

実験協力者に行ってもらったタスクは、画面中央に表示されるターゲットをなるべく早く100回クリックするタスクである。これを1セッションとする。セッションは、実験協力者が1つめのターゲットの選択に成功した直後から開始される。100回クリックすると自動的に画面が切り替わりセッションが終了する。中央を示すために中央にターゲットを表示した。このターゲットは目印として表示されており、ターゲットの外を選択しても1回クリックとカウントした。実験協力者には、指条件ごとに1セッションずつ行ってもらった。よって各実験協力者は、合計200試行(=100試行×2指条件)を行った。また、手法間の順序効果を相殺するため、実験協力者を2グループに分け、一方を親指条件から、もう一方を人差し指条件から行うこととした。疲労による影響を軽減するために、実験協力者にはセッション間に5分以上の休憩をとってもらった。

全てのセッション終了後に、実験協力者には使用感に関するアンケートに回答してもらった。本実験は、約25分の時間を要した。実験終了後、実験協力者に謝礼としてQUOカード500円分を支払った。

#### 4.1.4 結果

##### 選択時間

各指条件における合計選択時間を図4.2に示す。また、各クリックごとの選択時間を図4.3に示す。

Shapiro-Wilk 検定を行ったところ正規性が保証されたため、t検定を用いて合計選択時間を分析した。その結果、指条件間において有意差が認められ( $t = -4.1, df = 15, p < 0.001$ )、親指条件が有意に短い選択時間であることが分かった。また、選択時間とクリック回数の関係を調べるため Pearson の相関係数を求めた。独立変数は選択時間と選択回数である。相関係数を求めた結果、人差し指条件は有意に正の相関があることが分かった( $r = 0.57, p < 0.001$ )。



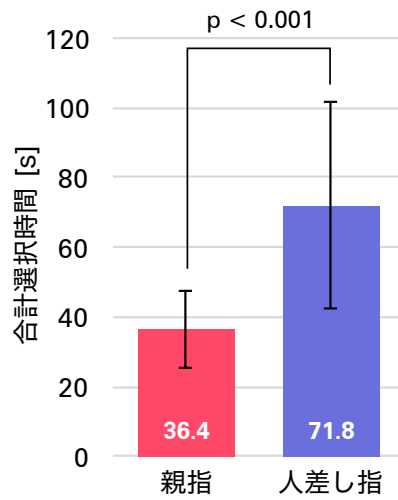


図 4.2: 合計選択時間。エラーバーは標準偏差を示す。

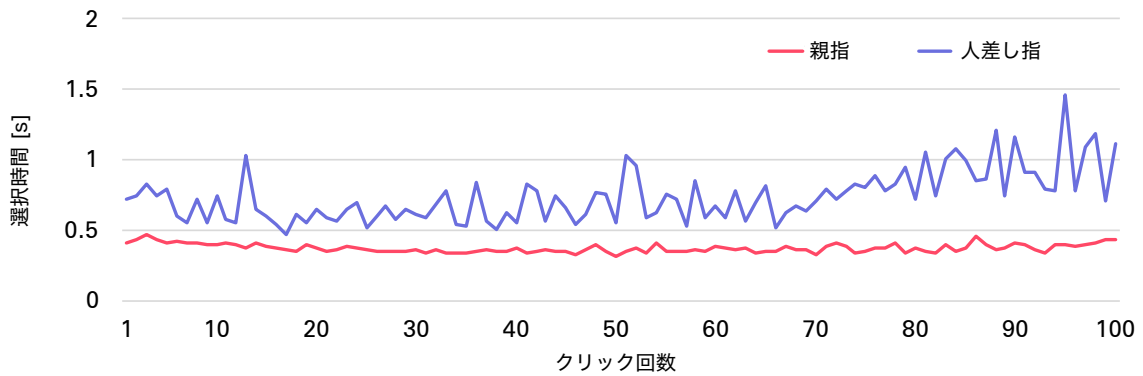


図 4.3: クリック回数ごとの選択時間。

### 中心からのずれ

図 4.4 に選択された座標の中心からのずれを示す。また、図 4.5 に選択された座標の分布を示す。なお、座標 (0, 0) が中心である。中心からのずれ ( $x, y$ , 中心からの距離) [pixel] は以下であった。

親指 平均 : (44.0, 39.2, 63.6), SD : (71.9, 57.8, 89.1)

人差し指 平均 : (121.5, 85.5, 159.2), SD : (207.6, 108.7, 227.2)

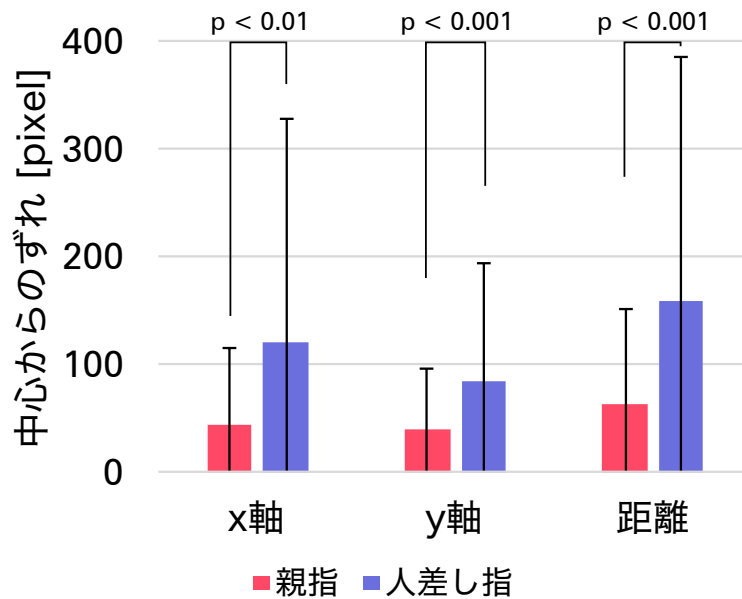


図 4.4: 中心からのずれ. エラーバーは標準偏差を示す.

Shapiro-Wilk 検定を行ったところ正規性が保証されなかったため、Wilcoxon の符号順位検定を用いてそれぞれの中心からのずれを分析した。その結果、指条件間において有意差が認められ、 $x$  軸に関しては親指条件の方が有意にずれが小さく ( $Z = -3.4, p < 0.01$ )、 $y$  軸に関しても親指条件の方が有意にずれが小さく ( $Z = -18.8, p < 0.001$ )、また中心からの距離に関しても親指条件の方が有意にずれが小さかった ( $Z = -22.0, p < 0.001$ )。

#### 質的評価

アンケートを通じて、使いやすさおよび疲れの調査を行った。結果を図 4.6 に示す。Wilcoxon の符号順位検定を行ったところ Q1 ( $Z = -2.8, p < 0.01$ )、Q2 ( $Z = -2.8, p < 0.01$ )、および Q4 ( $Z = -2.4, p < 0.05$ ) において有意差がみられた。

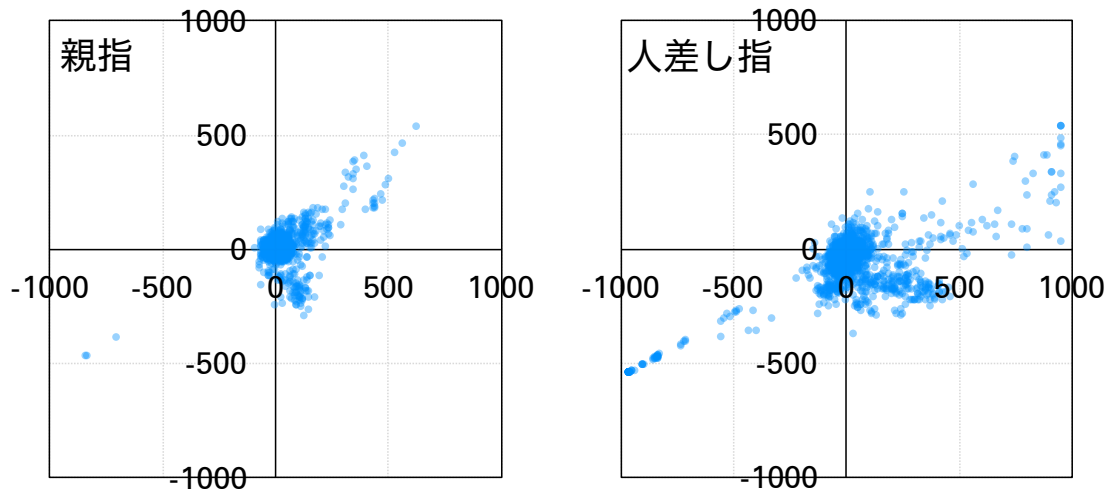


図 4.5: 選択された座標の分布 [pixel]. (0, 0) が中心である.

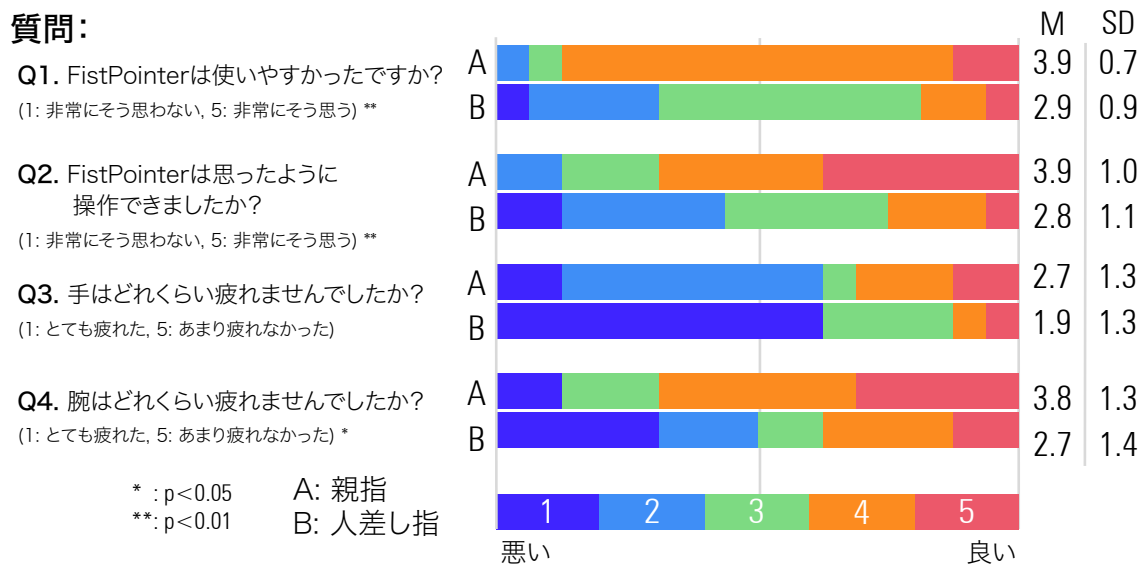


図 4.6: 質的評価の結果.

#### 4.1.5 議論

実験の結果、選択時間は人差し指条件よりも親指条件の方が有意に早かった。また、相関分析の結果、人差し指条件においては選択時間と選択回数間に有意な正の相関が認められた。さらに、親指条件においては実験協力者はよりターゲットからのずれが小さい状態にて選択を行うことができた。質的評価において、親指条件は有意に高い評価値を得た。実験協

力者は親指条件の方がより少ない疲労にて提案手法を使用することができた。しかしながら、今回の実験設計においては親指条件の方が良い性能を示したが、この結果は選択回数をより増やした場合（例：200回）に変化する可能性がある。

また、実験協力者のコメントに興味深いものがあった。1人の実験協力者は「普段トランペットを演奏している時に人差し指を使っているので、人差し指を折り曲げるという動作は親指を曲げる動作に比べて簡単だった」と回答した。これは、提案手法を用いる時により使いやすい指はユーザのバックグラウンドに依存することを示唆している。しかしながら、今回の結果から多くのユーザにとっては親指がより適していると結論付けられる。

## 4.2 実験2：ターゲットサイズごとの性能評価

ターゲットサイズごとの選択性能を調査する実験を行った。本実験においては、3つの異なるターゲットサイズにおける選択時間と精度を計測した。

なお、本実験において用いた書類は付録Bに示す。

### 4.2.1 実験協力者および実験機器

大学生および大学院生のボランティア8名（男性8名、同研究室内、年齢22–24歳、平均23.1歳）を実験協力者とした。全ての実験協力者が右利きであった。また、全ての実験協力者は矯正視力であった。7名がメガネを着用し、1名がコンタクトレンズを着用していた。なお、全ての実験協力者は実験1に参加していない。

実験にはAndroid端末（Xperia Z5、端末サイズ：高さ146mm×幅72mm×厚さ7.3mm、画面サイズ：5.2インチ、解像度：1920pixel×1080pixel、カメラレンズのF値：2.0、カメラレンズの焦点距離：28mm、OS：Android 6.0.1）を用いた。また、カードボードVRゴーグルとしてハコスコタタミ1眼[HAC]を用いた。単眼のカードボードVRゴーグルを実験に用いた理由は、立体視によるさまざまな影響（例：VR酔い、視差の調整）を抑えるためである。

### 4.2.2 ターゲット条件

ターゲットの大きさがターゲットの選択時間および精度に及ぼす影響を調査するため、図4.7に示すように3種類のターゲット条件を用意した。実験協力者が次に選択すべきターゲットは格子内において青くハイライトされた正方形のセルである。Googleが携帯端末向けアプリケーションの設計時に推奨している[Gooa]最低のターゲットの幅である48dp（今回使用した端末においては144pixel、7.7mm）を最大サイズとし、1/2ずつ小さくしたターゲットを3種類用意した。つまり、ターゲットの1辺は48、24、12dp（17.7、3.8、1.9mm）である。以降、それぞれを**large**、**medium**、**small**条件と呼ぶ。図4.7に示すように、各条件における格子の行数および列数はそれぞれ7×13、15×26、30×53である。

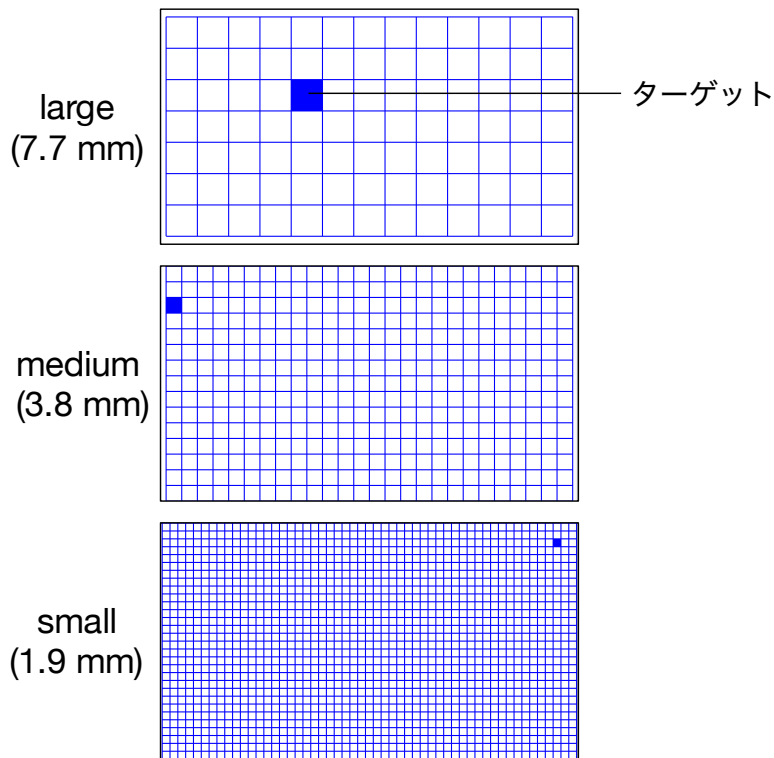


図 4.7: ターゲット条件.

#### 4.2.3 実験タスクと手順

実験は実験 1 と同様の環境において実施された (図 4.8)。実験者はまず、実験協力者に椅子に深く腰掛けるように指示した。次に、実験者はカードボード VR ゴーグルを実験協力者に手渡した。このとき、実験条件をそろえるため実験者は実験協力者に、左手にてカードボード VR ゴーグルを把持し、右手を用いて提案手法の操作を行うよう指示した。その後、実験協力者に提案手法によるポインティングおよびクリックが正常に動作するかどうかを、画面中央および四隅に出現するターゲットをクリックすることにより確認するよう指示した。正常に動作しなかった場合は、しきい値  $\tau$  を調整してから再度動作確認を行った。動作確認後、実験協力者には練習タスクとして、中央および四隅の選択を少なくとも 4 セット繰り返してもらった。練習タスク終了後、実験者は実験協力者が中央および四隅の選択を失敗することなく完了できることを確認した。このとき実験協力者が選択に失敗した場合は、失敗することなく完了できるまで繰り返し行った。その後、実験協力者は本番タスクを開始した。

実験協力者はランダムな位置に表示されるターゲットを選択するタスクを行った。これを 1 試行と定義する。実験協力者には画面上に表示されたターゲットをなるべく早く、かつなるべく正確に選択してもらった。実験協力者がターゲットの選択に成功すると次のターゲットが表示された。なお、順序効果を打ち消すために、ターゲットは重複なしのランダムな順序にて提示された。実験協力者は各ターゲットサイズごとに 20 ターゲット選択を行った。これ



図 4.8: 実験環境（実験 2）.

を 1 セッションとする。セッションは、実験協力者が 1 つめのターゲットの選択に成功した直後から開始される。実験協力者は各ターゲットサイズを 1 セッションずつ large, medium, small の順で選択を行った。よって各実験協力者は、合計 60 試行（= 20 試行 × 3 ターゲット条件）を行った。疲労による影響を軽減するために、実験協力者にはセッションが終了するごとに 1 分以上の休憩をとってもらった。すべてのセッション終了後に提案手法に関するアンケートに回答するよう求めた。本実験は、実験説明からすべての試行およびアンケートへの回答が終了するまでに、約 20 分の時間を要した。

#### 4.2.4 結果

各ターゲット条件における選択時間とエラー率を図 4.9 に示す。これらの結果を一元配置分散分析および Tukey の多重比較を用いて解析した。独立変数はターゲット条件である。

##### 選択時間

選択時間に有意な主効果がみられた ( $F_{2, 21} = 10.21$ ,  $\eta^2 = 0.49$ ,  $p < 0.001$ )。多重比較の結果、次のことが分かった。1) large 条件と small 条件の間に有意差がみられた ( $p < 0.01$ )、2) medium 条件と small 条件の間に有意差がみられた ( $p < 0.05$ )、3) large 条件と medium 条件の間には有意差はみられなかった。

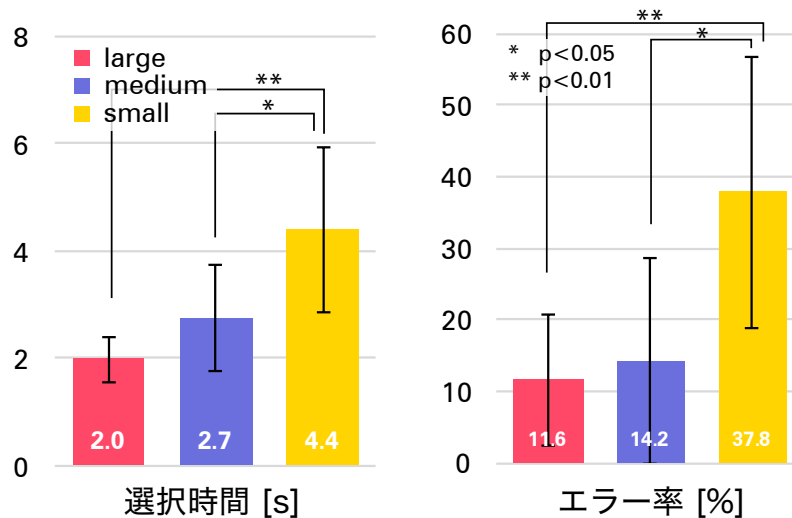


図 4.9: 実験結果。エラーバーは標準偏差を示す。

#### エラー率

ターゲットの領域外を選択した場合をエラーとし、エラー率を「エラー回数／総選択回数」と定義した。エラー率に有意な主効果がみられた ( $F_{2, 21} = 7.71, \eta^2 = 0.42, p < 0.01$ )。多重比較の結果、次のことが分かった。1) large 条件と small 条件の間に有意差がみられた ( $p < 0.01$ )、2) medium 条件と small 条件の間に有意差がみられた ( $p < 0.05$ )、3) large 条件と medium 条件の間には有意差はみられなかった。

#### 質的評価

実験協力者からのコメントより、画面上の領域ごとにエラー率にばらつきがあることが示唆された。1 人の実験協力者は「画面の左側のターゲットが右側のターゲットよりもより選択がしにくかった」とアンケートに回答した。また、2 人の実験協力者は「画面の端や角のターゲットの選択が難しかった」とアンケートに回答した。画面の左端を選択するには操作に用いている右手を限界まで左側へ伸ばす必要がある。この状況においては、腕の可動域が制限されるため操作がしにくくなったと推察される。また、携帯端末をカードボード VR ゴーグルに装着すると、携帯端末に搭載されているカメラは左側に寄った状態になる。これにより、操作領域が左側へ移動してしまい、操作がしにくくなったと推察される。

### 4.3 実験 3：手の支えによる影響の調査

一般的な VR 環境においては HMD を頭部に固定するため、ターゲット選択に両手を用いることが可能である。そこで、カードボード VR ゴーグルを頭部に固定できるようにし、操作

に用いる腕をもう一方の腕にて支える **support** 条件および支えない **non-support** 条件を支え条件 (図 4.10) として設け、性能の比較を行った。

なお、本実験において用いた書類は付録 C に示す。

#### 4.3.1 実験協力者および実験機器

大学生および大学院生のボランティア 6 名 (男性 6 名, 同研究室内, 年齢 21–24 歳, 平均 22.7 歳) を実験協力者とした。全ての実験協力者が日常的にスマートフォンを利用し、全員が右利きであった。スマートフォンの利用歴は平均 75.7 ヶ月であった。すべての実験協力者はスマートフォンを用いた VR アプリケーションを使用したことがなかった。また、すべての実験協力者は正常な裸眼視力もしくは矯正視力であった。3 名がメガネを着用し、1 名がコンタクトレンズを着用していた。なお、全ての実験協力者は実験 1 および 2 に参加していない。

実験には Android 端末 (ELUGA P-03E, 端末サイズ: 高さ 132 mm × 幅 65 mm × 厚さ 10.9 mm, 画面サイズ: 4.7 インチ, 解像度: 1920 pixel × 1080 pixel, カメラレンズの F 値: 2.4, カメラレンズの焦点距離: 29 mm, OS: Android 4.2.2) を用いた。カードボード VR ゴーグルとしてハコスコ タタミ 1 眼 [HAC] を用いた。このカードボード VR ゴーグルは手にて筐体を支える必要がある。そのため今回の実験ではカードボード VR ゴーグルを頭部に固定できるようにするため、マジックテープ製のバンドおよびスポンジを取り付けた (図 4.11)。

#### 4.3.2 支え条件

提案手法は片手にて使用可能な操作手法であるが、今回はカードボード VR ゴーグルを頭部に固定したため両手を使用することができる。操作に用いる腕をもう一方の腕にて支えることにより操作する腕が安定するため、選択時間およびエラー率の向上が期待される。そこで、支え条件がどの程度選択時間およびエラー率に影響を及ぼすかを調査した。支えによる影響を調査するため、操作に用いる腕をもう一方の腕にて支える **support** 条件 (図 4.10 下) および支えない **non-support** 条件 (図 4.10 上) を支え条件として設けた。

#### 4.3.3 ターゲット条件

ターゲットの大きさがターゲットの選択時間およびエラー率に及ぼす影響を調査するため、実験 2 と同様に **large**, **medium**, **small** の 3 つのターゲットサイズ条件を設けた。

#### 4.3.4 実験タスクと手順

実験は実験 1 および 2 と同様の環境において実施された。実験者はまず、実験協力者に椅子に深く腰掛けるよう指示した。次に実験協力者の頭部にカードボード VR ゴーグルを違和感なく、かつ頭を左右に振ってもずれないように装着した。その後、提案手法によるポイン



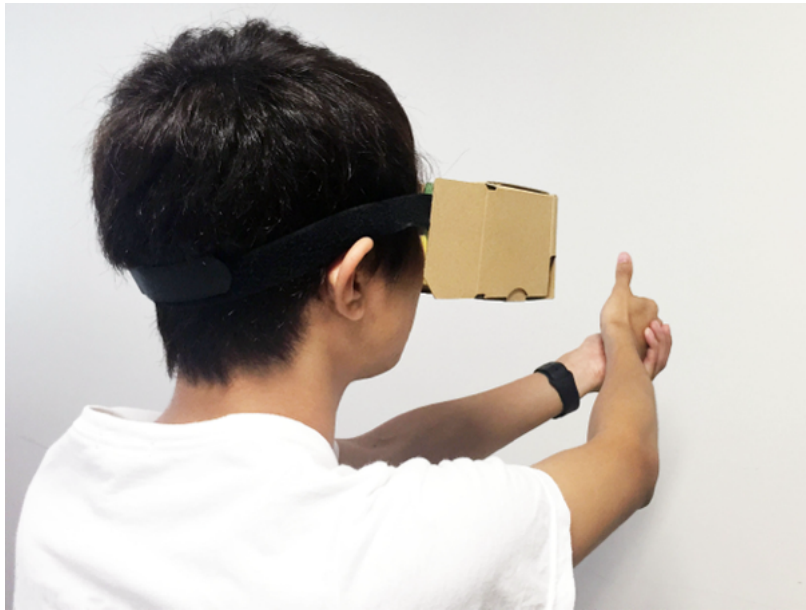
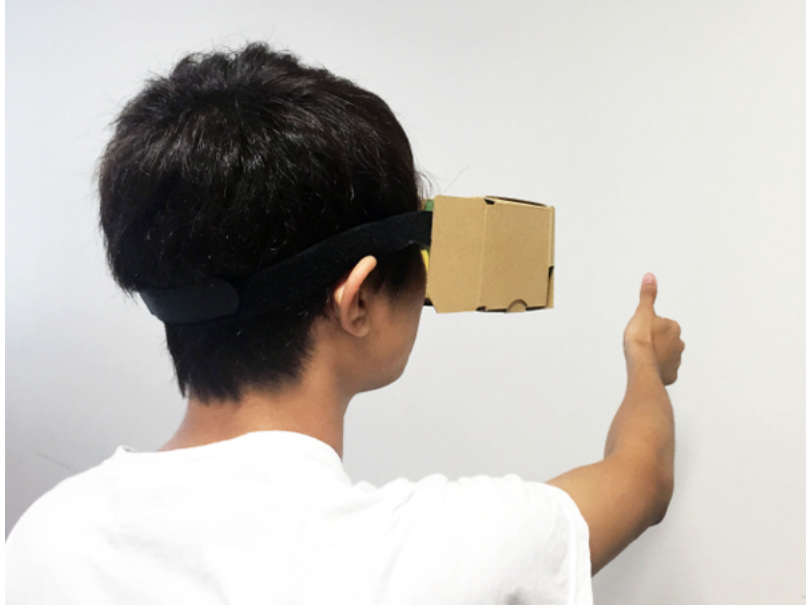


图 4.10: 支え条件. 上 : non-support 条件. 下 : support 条件.



図 4.11: 実験3において使用した cardboard VR ゴーグル。

ティングおよびクリックが正常に動作するかどうかを、画面中央および四隅に出現するターゲットをクリックすることにより確認するよう実験協力者に指示した。正常に動作しなかった場合は、しきい値 $\tau$ を調整してから再度動作確認を行った。その後実験協力者には large 条件において、操作に慣れるまで繰り返し中央および四隅の選択を練習タスクとして行ってもらった。このとき、実験条件をそろえるため、実験者は実験協力者に、右手を用いて提案手法の操作を行うように指示した。また、ターゲットをできるだけ速く、かつ正確に選択するよう指示した。練習後、実験協力者は本番タスクを開始した。

実験協力者はランダムな位置に表示されるターゲットを選択するタスクを行った。1回のターゲット選択を1試行とし、20試行を1セッションとする。セッションは、実験協力者が1つめのターゲットの選択に成功した直後から開始される。実験協力者がターゲットの選択に成功すると次のターゲットが表示された。20回選択に成功すると格子が赤色になりセッションが終了する。実験協力者には、支え条件ごとに large, medium, small 条件順に1セッションずつ行ってもらった。よって各実験協力者は、合計120試行(=20試行×2支え条件×3ターゲット条件)を行った。また、手法間の順序効果を打ち消すため、実験協力者を2グループに分け、一方を support 条件から、もう一方を non-support 条件から行うこととした。疲労による影響を軽減するために、実験協力者にはセッション間に1分以上の休憩をとってもらった。

全てのセッション終了後に、実験協力者には使用感に関するアンケートに回答してもらった。本実験は、実験説明からすべての試行およびアンケートへの回答が終了するまでに、約40分の時間を要した。

### 4.3.5 実験結果

1 試行に要した選択時間を図 4.12 に、エラー率を図 4.13 に示す。支え条件とターゲット条件の選択時間およびエラー率への影響を検証するため、二元配置分散分析を行った。なお検定に先だて、ターゲットの中心の座標と選択した座標の  $x$  または  $y$  の差が  $\mu \pm 3 \times \sigma$  ( $\mu$ : 平均値,  $\sigma$ : 標準偏差) の範囲を外れる選択を外れ値として除外した。これは、ターゲットの選択に成功した後、誤って再びそのターゲットを選択すること、および提案手法において実験協力者の意図しないクリック操作判定<sup>1</sup>があったためである。全選択数における外れ値の割合は 0.96%であった。なお、ここではターゲットの領域外を選択した場合をエラーとし、エラー率を「エラー回数/総選択回数」と定義した。

#### 選択時間

二元配置分散分析の結果、選択時間に関して支え条件には主効果が認められず、ターゲット条件に主効果が認められた ( $F_{2,10} = 37.66, \eta^2 = 0.88, p < 0.001$ )。両条件に交互作用は認められなかった。主効果が認められたターゲット条件に対して Tukey 法による多重比較検定を行ったところ、以下のことが分かった。1) large 条件は small 条件と比べて有意に選択時間が速い ( $p < 0.001$ )、2) medium 条件は small 条件と比べて有意に選択時間が速い ( $p < 0.001$ )。

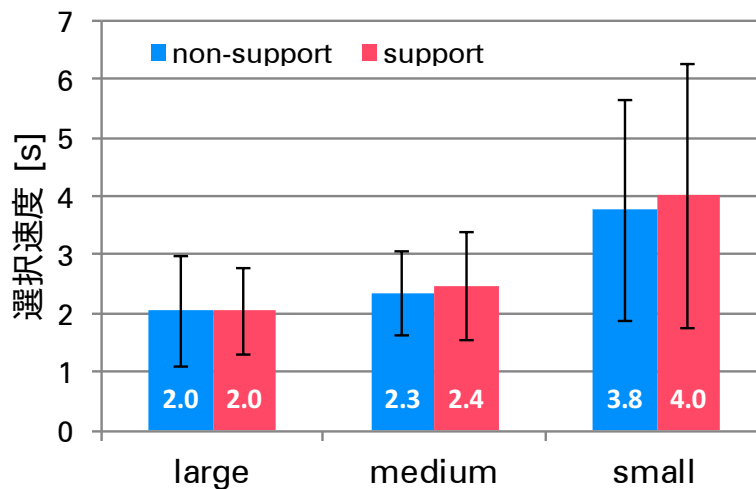


図 4.12: 選択時間。エラーバーは標準偏差を示す。

<sup>1</sup>提案手法は図 3.4 に示すようにカメラ画像の一部を切り取り、そして操作領域に写像している。この時にこの切り取り矩形領域内から腕が外れた場合に意図しないクリック判定が発生した。

## エラー率

二元配置分散分析の結果，エラー率に関しても支え条件には主効果が見られず，ターゲット条件に主効果が認められた ( $F_{2,10} = 59.03, \eta^2 = 0.92, p < 0.001$ )．両条件に交互作用は認められなかった．なお，有意差は認められなかったものの，small 条件下においては support 条件の方が 6.5% エラー率が低かった．主効果が認められたターゲット条件に対して Tukey 法による多重比較検定を行ったところ，以下のことが分かった．1) large 条件は small 条件と比べて有意にエラー率が低い ( $p < 0.001$ )，2) medium 条件は small 条件と比べて有意にエラー率が低い ( $p < 0.001$ )．

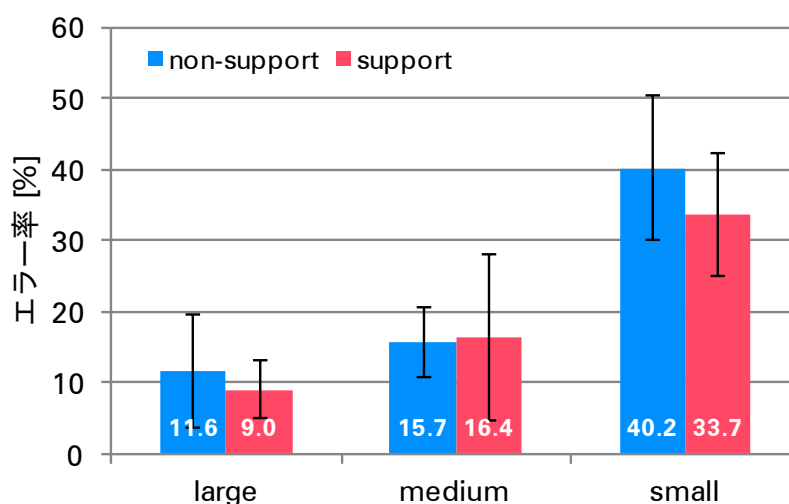


図 4.13: エラー率. エラーバーは標準偏差を示す.

### 4.3.6 議論

実験結果からは支え条件による選択時間およびエラー率への影響は無かった．ただし，今回の VR 環境実験においては腕を支える位置は一箇所のみしか検討していない．そのため，腕を支える位置を複数箇所設定し，それらの条件下における選択時間およびエラー率を比較することにより，より最適な操作姿勢を特定する必要がある．

また，実験協力者のコメントから，実験 2 と同様にターゲットの領域ごとにエラー率に偏りがあることが示唆された．2 人の実験協力者は，「画面の左側のターゲットは右側のターゲットに比べて選択しにくかった」と回答した．

## 4.4 実験 4：ターゲット領域別選択性能評価

実験 2 および 3 において，実験協力者は画面の左側や，画面中心部のターゲットよりも周辺部のターゲットの方が選択しにくかったとコメントしている．そこで，画面内の領域（以降，

ターゲット領域) ごとのエラー率を明らかにするために, medium 条件にて新たな実験を行った. medium 条件を採用した理由は以下ある. 1) 実験 2 の結果において, large と small 条件間および medium と small 条件間において選択時間とエラー率に有意差が見られた. つまり, small 条件は有意に性能が悪かったが, large-medium 条件間は有意差がみられなかったため, より細かくデータを取得することができる medium 条件を採用した. 2) small 条件におけるエラー率は 37.8%であり, これは実用に耐えうるエラー率よりも遥かに高いため, medium 条件を採用した.

この実験により, ターゲット領域ごとのエラー率を示すとともに, カードボード VR 環境において提案手法を用いたユーザインタフェースの設計指針を示す. なお, 実験 3 の結果において支え条件には有意差が見られず, かつ, カードボード VR においては片方の腕を用いてカードボードを固定する状態 (すなわち non-support 条件) にて利用することが一般的であるため, non-support 条件のみにて実験を行った.

また, 本実験において用いた書類は付録 D に示す.

#### 4.4.1 実験協力者および実験機器

大学生および大学院生 15 名 (男性 14 名, 女性 1 名, 年齢 21-30 歳, 平均 23.9 歳) を実験協力者とした. 14 名の実験協力者が日常的にスマートフォンを利用し (平均利用歴: 45.6 ヶ月), 全員が右利きであった. 3 名の実験協力者は VR アプリケーションを過去に使用した経験があった. すべての実験協力者は正常な裸眼視力もしくは矯正視力であった. 9 名がメガネを着用し, 3 名がコンタクトレンズを着用していた. なお, 全ての実験協力者は実験 1, 2, および 3 に参加していない.

実験には Android 端末 (Xperia Z5, 端末サイズ: 高さ 146 mm × 幅 72 mm × 厚さ 7.3 mm, 画面サイズ: 5.2 インチ, 解像度: 1920 pixel × 1080 pixel, カメラレンズの F 値: 2.0, カメラレンズの焦点距離: 28 mm, OS: Android 6.0.1) を用いた. カードボード VR ゴーグルとしてハコスコ タタミ 1 眼 [HAC] を用いた. 今回は non-support 条件下において実験を行うため, カードボード VR ゴーグルに変更を加えなかった.

#### 4.4.2 実験計画

medium 条件における総ターゲット数は 390 個 (= 15 行 × 26 列) と多い. 本実験においては, 画面領域ごとのエラー率を求めることを主目的としたため, 慣れおよび疲れによるエラー率への影響を最小限に留める必要がある. そのため, 実験 1 と同様に実験時間が 1 時間を超過しないように, 実験協力者を 5 人ずつ 3 グループ (A, B, C) に分け, 390 個のターゲットをランダムに 130 ターゲットごとに分割した. よって各ターゲットは実験全体で 5 回ずつ選択された.

#### 4.4.3 実験タスクと手順

実験は実験 1, 2, および 3 と同様の環境で行われた。実験者はまず、実験協力者に椅子に深く腰掛けるよう指示した。次に実験協力者にカードボード VR ゴーグルを手渡した。実験条件をそろえるため、実験者は実験協力者に、左手にてカードボード VR ゴーグルを把持し、右手を用いて提案手法の操作を行うよう指示した。その後、実験協力者に提案手法によるポインティングおよびクリックが正常に動作するかどうかを、画面中央および四隅に出現するターゲットをクリックすることにより確認するよう指示した。正常に動作しなかった場合は、しきい値を調整してから再度動作確認を行うこととした。動作確認後、実験協力者には練習タスクとして、中央および四隅の選択を少なくとも 4 セット繰り返してもらった。練習タスク終了後、実験者は実験協力者が中央および四隅の選択を失敗することなく完了できることを確認した。このとき実験協力者が選択に失敗した場合は、同様の動作を失敗することなく完了できるまで繰り返し行ってもらった。その後、実験協力者は本番タスクを開始した。

タスクとして実験協力者に 1 つずつターゲットを選択してもらった。これを 1 試行と定義する。実験協力者には 4.4.2 節にて示した、グループ毎に割り当てられた 130 個すべてのターゲットを選択してもらった。実験協力者がターゲットの選択に成功すると次のターゲットが表示された。なお、順序効果を打ち消すために、ターゲットは重複なしのランダムな順序にて提示された。疲労による影響を軽減するために、実験協力者には 20 試行終了するごとに 1 分以上の休憩をとってもらった。なお、ターゲットの総数は 130 個のため最後のみ 10 試行で終了となる。

すべての試行終了後に、実験協力者には System Usability Scale (SUS) [Bro96, Bro13] および使用感に関するアンケートに回答してもらった。ただし、SUS は英語で記述されているものの、本実験の実験協力者は全員日本語を第一言語としていたため、今回は古井ら [古井 14] によって日本語に翻訳されたものを原文に併記したフォームを用意した。また、アンケート調査も実施した。「FistPointer は操作が簡単でしたか?」、「FistPointer は思ったように操作できましたか?」という問いに対して 5 段階のリッカート尺度 (1 = 全く思わない, 5 = そう思う) を用いて回答を求めた。本実験は、実験説明からすべての試行およびアンケートへの回答が終了するまでに、約 40 分の時間を要した。実験終了後、実験協力者に謝礼として 820 円を支払った。

#### 4.4.4 結果

##### 選択時間

すべてのターゲットの平均選択時間は 2.5 s (SD = 7.9) であった。今回の結果の妥当性を確かめるため、今回の結果と実験 2 の結果を t 検定を用いて検定を行った。その結果、有意差はみられなかった。

## エラー率

すべてのターゲットの平均エラー率は13.1% (SD = 13.3) であった。今回の結果の妥当性を確かめるため、今回の結果と実験2の結果に対してt検定を行った。その結果、有意差はみられなかった。ターゲット別のエラー率をヒートマップにて図4.14に、medium条件にある15行の各行ごとの平均エラー率を折れ線グラフにて図4.15に、各列ごとの平均エラー率を折れ線グラフにて図4.16に示す。また、ターゲット領域間のエラー率の違いを調べるため、すべての行を4領域に分け(1-4行(最上)、5-8行、9-12行、13-15行(最下))、それぞれの領域の平均エラー率を棒グラフにて図4.15に示す。列ごとにも4領域に分け(1-7列(最左)、8-13列、14-19列、20-26列(最右))、それぞれの領域の平均エラー率を棒グラフにて図4.16に示す。

ターゲット領域のエラー率への影響を検証するため、一元配置分散分析を行った。その結果、行ごとに4分割したターゲットにおけるエラー率に関して、ターゲット領域に主効果が認められた ( $F_{3, 386} = 3.68, \eta^2 = 0.28, p < 0.05$ )。Tukey法による多重比較検定を行ったところ、最上領域(1-4行)のエラー率は最下領域(13-15行)と比べ有意に高かった ( $p < 0.05$ )。また、列ごとに4分割したターゲットにおけるエラー率に関して、ターゲット領域に主効果が認められた ( $F_{3, 386} = 4.87, \eta^2 = 0.36, p < 0.01$ )。Tukey法による多重比較検定を行ったところ、最左領域(1-7列)のエラー率はその他の領域と比べ有意に高かった(8-13列:  $p < 0.05$ , 14-19列:  $p < 0.01$ , 20-26列:  $p < 0.05$ )。

さらに、ターゲットを行ごとおよび列ごとに  $4 \times 4$  にて計16分割し、ターゲット領域を独立変数、エラー率を従属変数とする一元配置分散分析を行った。なお、分割の仕方は上記の各行および各列における4分割の仕方と同様である。分散分析の結果、ターゲット領域に主効果が認められた ( $F_{15, 374} = 1.99, \eta^2 = 0.074, p < 0.05$ )。Tukey法による多重比較検定を行ったところ、最左上領域(1-4行  $\times$  1-7列)のエラー率はやや左寄り真ん中領域(9-12行  $\times$  8-13列)および最右下領域(13-15行  $\times$  20-26列)と比べ有意に高かった ( $p < 0.05$ )。

また、高精度にて操作可能な領域(高精度な選択操作が要求されるユーザインタフェース部品を配置可能な領域)を調べるために、ユーザが平均90% (large条件における精度と同程度)の精度にてターゲットを選択することができる矩形領域を調査した。具体的には、各ターゲットで構成されるすべての矩形領域のエラー率を総当りで計算した。その結果、図4.14に示す緑の矩形領域が最大面積の矩形領域であった。

## ユーザビリティ

ユーザビリティを調査するために行ったSUSの平均スコアは74.2 (SD = 11.1) であった。また、アンケート調査の結果を図4.17に示す。

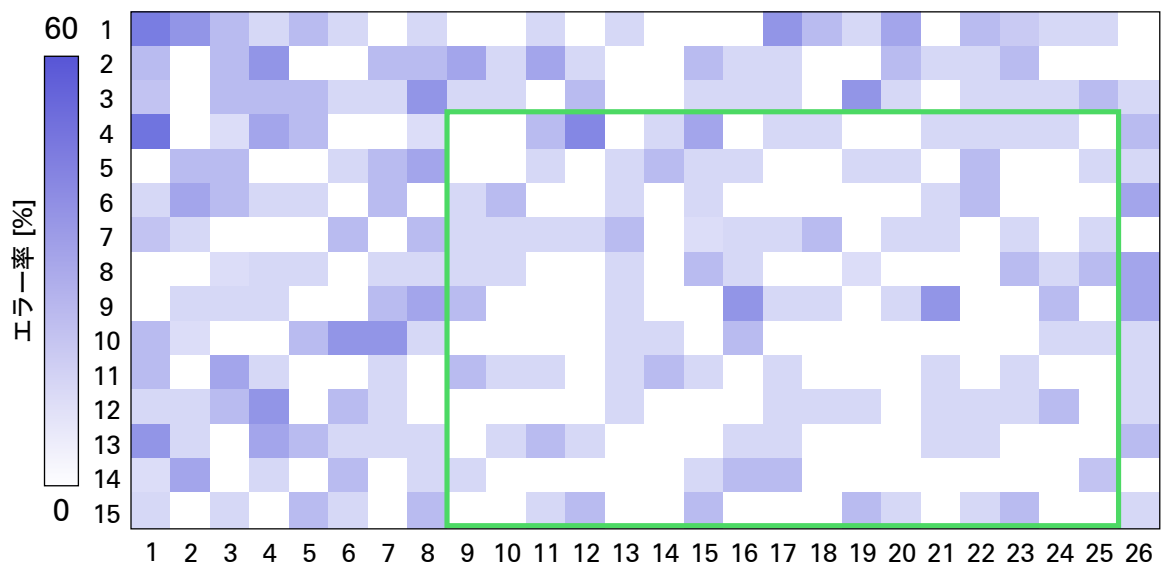


図 4.14: 実験結果. 各領域におけるエラー率. 緑色の矩形で囲まれた領域は, 平均エラー率が 10%未満の領域である (精度 90%).

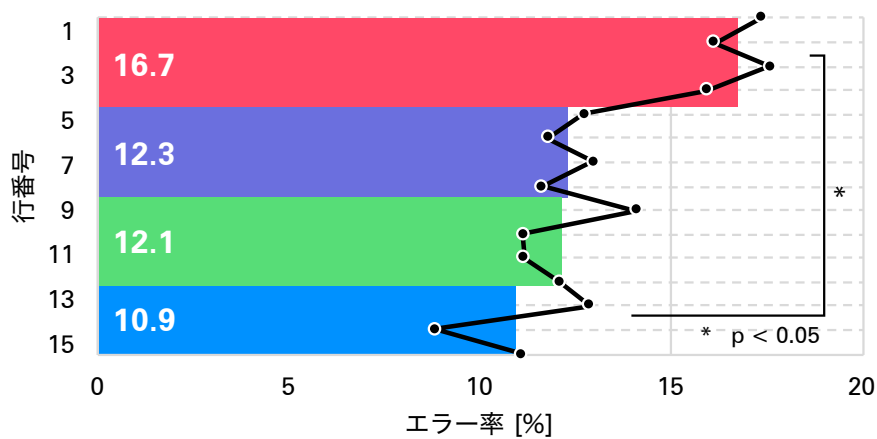


図 4.15: 各行のエラー率. 上から下へ 1-15 行を示す. 線グラフは各行の平均エラー率を示す. 色の付いた棒グラフは 4 つの領域に分割された各行の平均エラー率を示す.



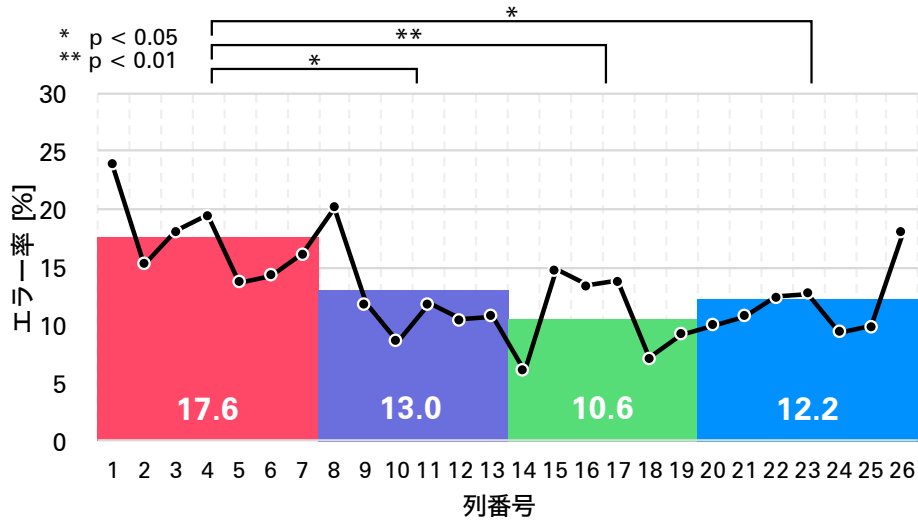


図 4.16: 各列のエラー率. 左から右へ 1-26 列を示す. 線グラフは各列の平均エラー率を示す. 色の付いた棒グラフは 4 つの領域に分割された各列の平均エラー率を示す.

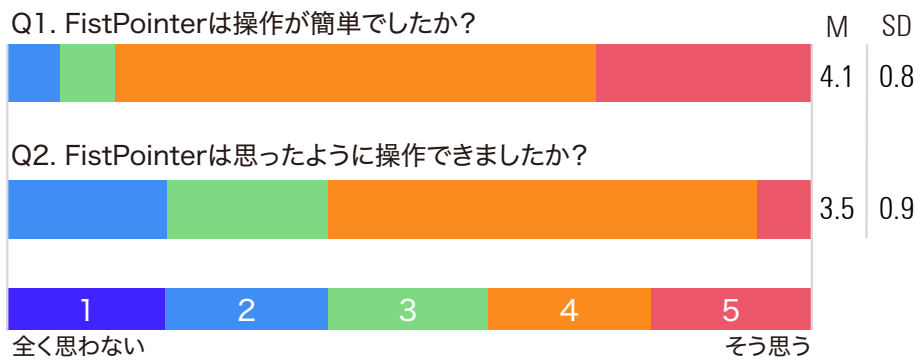


図 4.17: アンケート調査の結果.

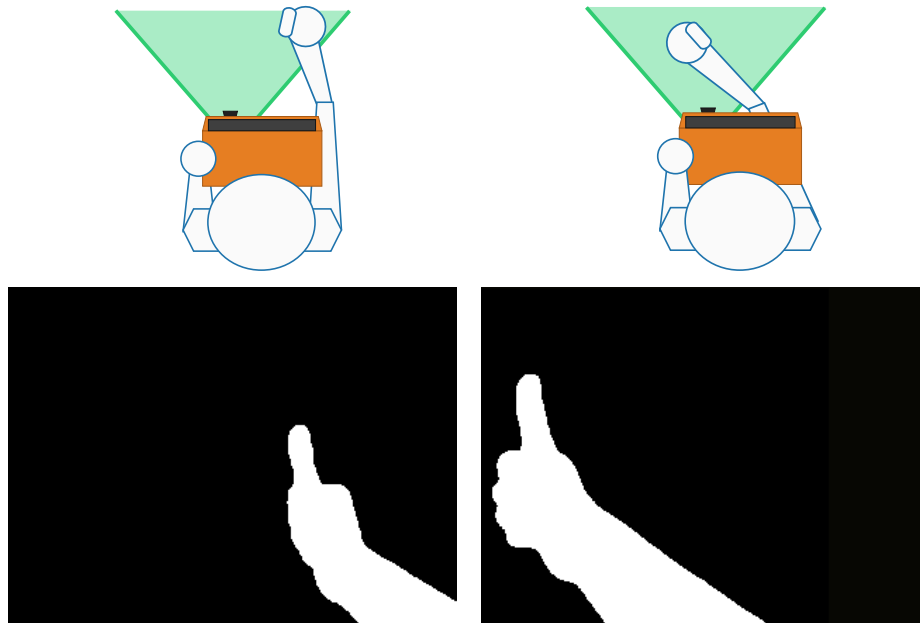


図 4.18: 検出された手. 左: 検出アルゴリズムが正しく認識できる手の形. 右: 検出アルゴリズムが正しく認識できない手の形. なお, カメラは左側にある.

#### 4.4.5 議論

##### ターゲット領域ごとのエラー率

実験結果よりターゲット領域ごとにエラー率の偏りがあることが分かった。とりわけ、最左領域のエラー率は有意に高かった。アンケート回答からもこの結果を支持する結果が得られた。4人の実験協力者が「左側に配置されたターゲットの方がより選択しにくかった」とアンケートに記述した。これは3つの理由に起因すると考えられる。1つめの理由としては画面の左側（利き手の反対側）周辺のターゲットを選択するためには、実験協力者は腕を限界まで伸ばす必要があり、これは普段行わない姿勢であるため、操作しにくかったことが挙げられる。2つめの理由としてはターゲット選択を左領域に行おうとすればするほど、身体的な制約上、手とカメラの位置が近くなり、ターゲット選択精度が粗くなるためであることが挙げられる。3つめの理由としては検出された手の形が今回実装した手検出アルゴリズムにふさわしくない形として映るときがあったためであることが挙げられる。図 4.18（左）に手検出アルゴリズムが想定している手の形を示す。この手検出アルゴリズムは図 4.18（左）のような形の手がカメラから取得されると仮定し実装されている。よって、図 4.18（右）に示すような手の形がカメラから取得された場合、適切に手が検出されない。左側のターゲットを選択する場合腕を横へ伸ばす必要があり、このときカメラに対する手の角度が変化するため、このような現象が発生する。精度をより向上させるために、このような状況下においても強固に手を検出できるようなアルゴリズムに変更する必要がある。

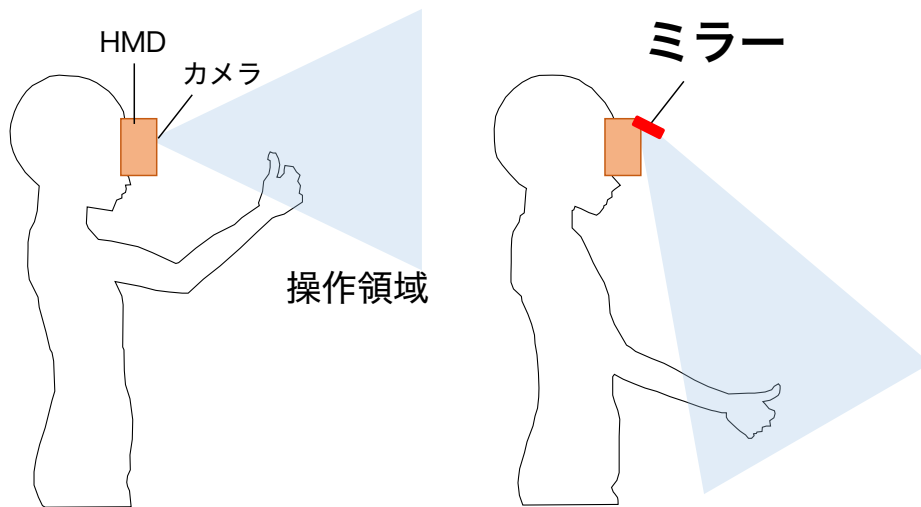


図 4.19: 小型のミラーをカメラ部分に取り付けることにより操作領域を下部に移動することができる。

また、最上領域のエラー率も高いことが分かった。これは腕を上へ上げれば上げるほど疲労が蓄積し、上部選択時の性能に影響した可能性がある。この問題を解決するために、例えば図 3.4 における切り取り矩形領域を下方に移動する方法や、カメラの前方に小型のミラーを追加し図 4.19 のように操作領域を下部に移動するなどの方法が考えられる。

### 設計指針

今回の実験からユーザの利き手（操作している手）とは反対側の領域は選択がしにくいという結果が得られた。また、エラー率に関するその他のフィードバックもいくつか得られた。2 名の実験協力者は「画面の端に配置されたターゲットは選択がしにくかった」と答えた。カードボード VR ゴーグルには視野角を広くするためのレンズが使われており、その影響により画面の端が歪む。その結果、ターゲットを鮮明に捉えることができず選択が難しくなると推測される。アンケート回答からもこの結果を支持する結果が得られた。2 名の実験協力者は「画面端に配置されたターゲットは見にくかった」と回答した。

実験結果から、精度の高い選択を必要とするターゲット（重要なボタン等）は画面の右側（操作している手側）もしくは中央領域に配置すると良いことが分かった。また、左側や周辺領域にターゲットを配置する場合にはターゲットのサイズを大きくした方が良いことが分かった。

## ユーザビリティ

4.4.4 節にて述べたように、提案手法は好意的な評価を得た。これは、提案手法のジェスチャのデザインに起因すると考えられる。ポインティングのためのジェスチャ（腕を目の前に構える）はターゲットに狙いを定めるメタファに基づく。また、決定ジェスチャ（親指を折り曲げる）はボタンを押すメタファに基づく。そのため、これらのジェスチャには想起性があり、覚えやすかったと推測される。アンケート回答からもこの結果を支持する結果が得られた。12 名の実験協力者が「FistPointer のジェスチャは覚えやすく、また理解しやすかった」と回答した。

一方で、2 名の実験協力者は「選択を行う時に、ポインタが時々意図せずぶれてしまった」と回答した。これは選択時に親指を折り曲げる動作を行う際、つられて手そのものが少し動くためであると推測される。この問題に対し、選択ジェスチャの開始を検出した場合は、ポインタの座標を固定するという改善策が考えられる。この改良により選択動作がより安定し、さらなる精度改善が期待される。

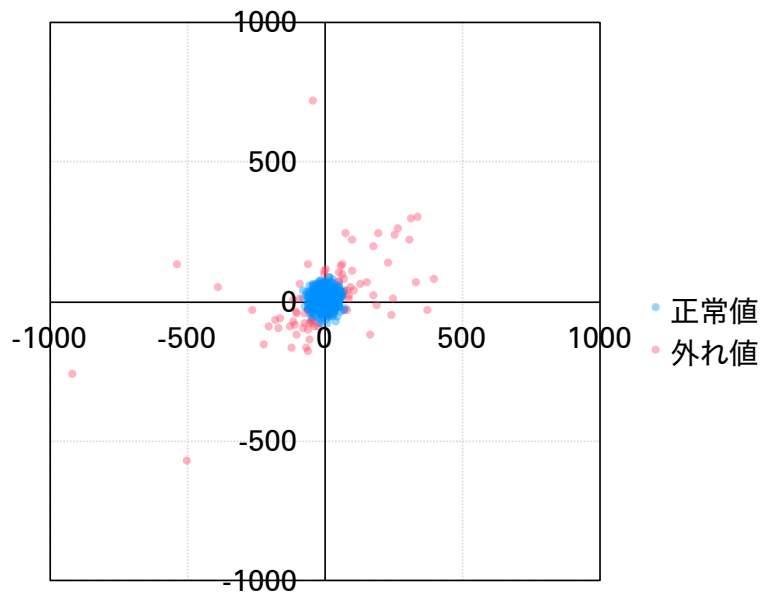
## 腕の疲れ

実験のアンケートより、疲れに関するフィードバックを得た。9 名の実験協力者は「もし FistPointer を長時間使用した場合、腕が疲れてしまうかもしれない」と回答した。そのため、今後は腕の疲れを定量的に測定するため、Consumed Endurance [HRGMI14] を使用し実験を行うことを予定している。さらに、適切な操作姿勢（例えば肘を体に付け、体で肘を支えながら操作をする）を調査し、そのような操作姿勢下においても適切に動作するようにアルゴリズムを改良する予定である。また、疲れを感じない時間を調査し設計指針として提示する予定である。

一方で、図 4.19 に示すように、操作領域を下部に移動する方法も疲労軽減に繋がる。この方法は、小型ミラーのみを必要とするため、容易にカードボード VR ゴーグルに採用可能である。

## 手法自体の評価に焦点を当てた実験

4.4.5 節（ターゲット領域ごとのエラー率）にて述べたように今回の実験においては一部画像処理アルゴリズムに起因するターゲット選択エラーが発生した。これはつまり本実験の結果には、提案手法の性能評価と画像処理の性能評価が同時に内包されていることを意味する。そのため、ポインタの座標決定のために指にマーカを装着し、またクリック操作のために物理ボタンを用いるなど、画像処理アルゴリズムに起因する問題を最小化した上で、提案手法の操作性の評価に焦点を当てた実験を行う必要がある。



中心からのずれ [pixel]

図 4.20: 中心からのずれ.

### ポイントの表示位置

3.2 節にて述べたように提案手法は検出された握りこぶしの右上にポイント位置を割り当てている。これは、検出された握りこぶしの幅を水平方向へ走査していき、最も幅の増加率が大きい箇所を求めることによって実現している。しかしながら、この増加率の大きい箇所は直前 9 箇所の握りこぶしの幅を基にした回帰直線の傾きのピークによって求められており、カメラが捉える手の形が大きく変動した際（例えばカメラと手の距離に応じてポイントの移動量を調節した場合）に親指の付け根と人差し指の付け根の間のどこが特定されるかが不安定になる可能性がある。そのため、提案手法においてはポイント位置の  $x$  座標が  $y$  座標に比べて不安定であることが懸念される。そこで、本実験におけるデータを用いてターゲット選択時の  $x$  座標と  $y$  座標の誤差に違いがあるのかどうかを調査した。

図 4.20 に本実験における実験協力者が実験タスク中に行った全ての選択動作のターゲットの中心からのずれを示す。中心からのずれの平均値 [pixel] は  $(x, y, distance) = (22.2, 20.0, 33.1)$ 、標準偏差は  $(x, y, distance) = (69.7, 33.3, 5.9)$  であった。また、この  $x$  軸と  $y$  軸のそれぞれのずれについて、統計分析を行った。等分散性を確かめるために Levene の検定を行ったところ等分散性が保証されなかったため ( $p < 0.05$ )、等分散性が仮定されていない場合の対応なし  $t$  検定を行った。その結果、 $x$  軸および  $y$  軸のずれに有意差はみられなかった ( $t = 1.42$ ,  $df = 3495.8$ ,  $p = 0.155$ )。

さらに、Smirnov-Grubbs 検定を用いて外れ値の除去を行った。除去後の中心からのずれの平均値 [pixel] は  $(x, y, distance) = (15.7, 16.5, 25.1)$ 、標準偏差は  $(x, y, distance) = (12.8, 13.4, 15.1)$

であった。除去後のデータに関しても統計分析を行った。等分散性を確かめるために Levene の検定を行ったところ等分散性が保証されなかったため ( $p < 0.05$ )、等分散性が仮定されていない場合の対応なし t 検定を行った。その結果、 $x$  軸および  $y$  軸のずれに有意差がみられ ( $t = -2.02, df = 4718.8, p < 0.05$ )、 $y$  軸のずれの方が有意に大きかった。

分析の結果より、 $y$  座標の方が  $x$  座標に比べ不安定であることが分かった。これは、4.4.5 節にて述べたようにクリック時に腕自体が垂直方向に動くことに起因すると考えられる。ポインタの表示位置は最も親指の折り曲げ動作に影響を受けない位置に実験的に決定したが、今回の実験データにおいては特に  $x$  軸方向の誤差が大きいということはなかった。しかしながら、今後はカメラと手の距離に応じてポインタの移動量を調節する場合などを考慮したより最適な位置を模索したい。

## 第5章 アプリケーション

提案手法を用いるアプリケーションとしてシューティングゲームおよび文字入力アプリケーションを開発した。なお、これらのアプリケーションの開発においては3.4節と同様の環境を用いた。

### 5.1 シューティングゲーム

提案手法を用いたアプリケーション例としてシューティングゲームを開発した(図5.1)。プレイヤーは手を動かすことによりターゲットスコープを動かすことができ、クリック操作によって弾を打つことができる。ターゲットのサイズは18.0mm×12.0mmであり、large条件に比べ面積比3.6倍である。提案手法は精度の高いポインティングが行えるため、このようなシューティングゲームにも応用可能である。

作成したシューティングゲームを9名のボランティア(男性8名、女性1名、年齢21–25歳、平均23.6歳)に体験してもらい、その後使用感に関するアンケート(付録E)に回答してもらった。その結果以下のようなフィードバックが得られた。3名の体験者が「精度が高くターゲットを簡単に狙うことができた」と答え、また2名の体験者からは「親指を曲げる操作が弾を撃つ操作と関連付いていて分かりやすかった」と答えた。一方で、3名の体験者からは「長時間利用すると腕が疲れると思う」という意見が得られ、またその内の1名からは「腕を伸ばした方が細かな操作が行えるが、腕を伸ばすことによってより疲れやすくなる感じた。この問題はカメラをより広角にすることにより改善されるのでは」という意見が得られた。

提案手法は腕を目の前に構えるという動作から、ターゲット選択を想起しやすい姿勢であることが体験者の意見からも示唆された。また、手を空中において動かすことにより腕に疲労が溜まるため、長時間利用には向かないことが示唆された。

### 5.2 文字入力

実験4にて示したユーザインタフェースの設計指針に基づいたソフトウェアキーボードを実装した(図5.2)。図4.14に示すエラー率の低い領域にキーボードを配置し、エラー率の高い領域に修飾キーを大きなサイズにて配置した。ユーザは手を動かすことによりポインタ(図5.2における赤い点)を動かすことができ、クリック操作によってポインタが選択しているキーが入力される。キーボードのキーサイズは通常時は6.0mm×6.5mm(large条件に比



図 5.1: シューティングゲーム.

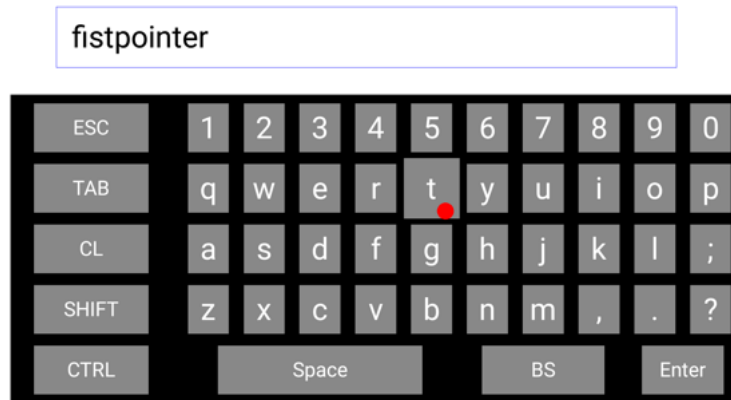


図 5.2: 文字入力アプリケーション.

べ面積比 0.7 倍) であり, ポインタがキーに重なった場合は 8.1 mm × 8.6 mm (large 条件に比  
べ面積比 1.2 倍) に拡大される.



## 第6章 カードボードVRゴーグルの改良

提案手法においては、カードボードVRゴーグルの目の前に手を突き出して手を動かすことによってユーザは入力を行う。この設計においては、操作に用いるポインタと手の位置が一直線上にあるため、操作位置と手の位置の対応がつきやすいという利点があるが、一方で4章の実験により疲労の問題が指摘された。この問題に対し、図6.1に示すようにカードボードVRゴーグルの前方（カメラの目の前）にミラーを取り付けることによって操作領域を下部へ移動する解決案を示す。操作領域が下部へ移動するため、疲労の軽減が期待される。この解決策は電源を必要とせず、またミラーは安価であるため、カードボードVRゴーグルの手軽さを損なわない。また、このような機構を備えたカードボードVRゴーグルを作製するのも容易である。これまで、携帯端末にミラーを取り付け、携帯端末背面における操作（Back-of-device interaction）を実現する手法が提案されてきたが[WFZ16, MYM17]、カードボードVRゴーグルへ適用した例はなかった。



図 6.1: カードボードVR環境における提案手法の操作領域。青い領域は操作領域を示す。左：従来。右：ミラーを取り付け操作領域を下部へ移動した場合。

カードボードVRゴーグルへ取り付けるミラーとして、ハサミ等で切断可能なシート状のミラー（光 どこでもミラー 粘着付 鏡, 147 mm × 195 mm × 0.5 mm, DKM-1419）を使用した。このミラーは加工が容易であり、また安価（1,000 円以下）に流通している。

シート状のミラーを 6 cm × 4 cm に切り<sup>1</sup>、そしてカードボード VR ゴーグルにおけるカメラの上部に 30° の角度で取り付けた (図 6.2)。このカードボード VR ゴーグルにおけるカメラの取得画像を図 6.3 に示す。この画像からカードボード VR ゴーグル下部領域が広範囲かつ鮮明に取得可能であることが分かる。

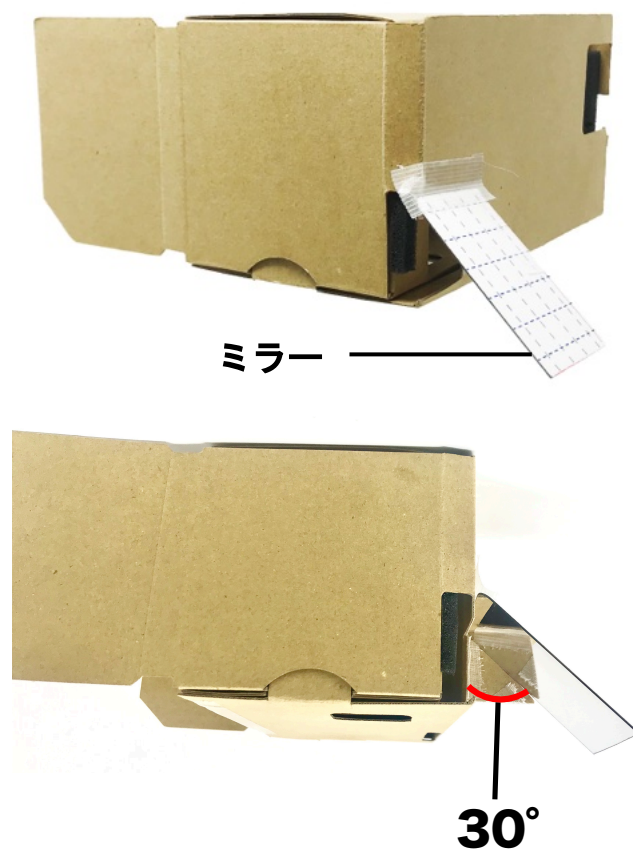


図 6.2: カードボード VR ゴーグルにミラーを取り付けた様子.

<sup>1</sup>iPhone 7 Plus (焦点距離 : 28 mm, カメラレンズの F 値 : 1.8) のカメラを用いた場合.



図 6.3: ミラー付きカードボード VR ゴーグルにおけるカメラの取得画像.

## 第7章 カードボードVRゴーグル下部領域における空中ジェスチャを用いたターゲット選択手法「FistPointer-Mirror」の実装

本章においては、6章にて述べたミラーを用いたカードボードVRゴーグル下部領域における操作に対する具体的な操作手法として空中ジェスチャを用いたターゲット手法「FistPointer-Mirror」およびそのプロトタイプ実装を示す。FistPointerにおいては、操作に用いるポインタと手の位置が一直線上にあるため、操作に用いる手は画面に対して水平、地面に対しては垂直方向へ動かすことによりポインティングを行っていた。一方で、FistPointer-Mirrorにおいてはミラーを用いて操作領域をカードボードVRゴーグル下部へ移動するため、画面に対して垂直、地面に対して水平方向へ操作に用いる手を動かすことによりポインティングを行う。

### 7.1 マーカ

4.4.5節（ターゲット領域ごとのエラー率）において述べたように、4章にて示した実験においては、一部画像処理アルゴリズムに起因するターゲット選択エラーが発生した。そこでFistPointer-Mirrorのプロトタイプ実装にあたり、画像処理アルゴリズムをより単純に、そしてよりノイズなどの外的要因に精度が左右されないように、マーカを用いることとした。プロトタイプの実装においてはマーカを用いることにより、画像処理アルゴリズムを単純にし、評価実験時にこの操作手法の性能のみの評価を可能にする。

図7.1にFistPointer-Mirrorにおいて用いるマーカを示す。シール状の青色、赤色の異なる色調を持つマーカを操作を行う手に貼り付けることにより、単純な画像処理にて手の動きを検出することが可能になる。赤色のマーカはポインティング用のマーカであり、青色のマーカはクリック判定用のマーカである。

### 7.2 操作姿勢

FistPointer-Mirrorはこれまで述べてきたFistPointerと同様の操作姿勢を用いる。図7.2（左）に示す姿勢（サムズアップポーズ）にて手を動かすことによりポインティングを行った後、図7.2（右）に示すように親指を曲げる動作によりターゲット選択（クリック）を行う。親指を曲げる際は、青色のクリック判定用マーカを押すように（隠すように）折り曲げる。この動

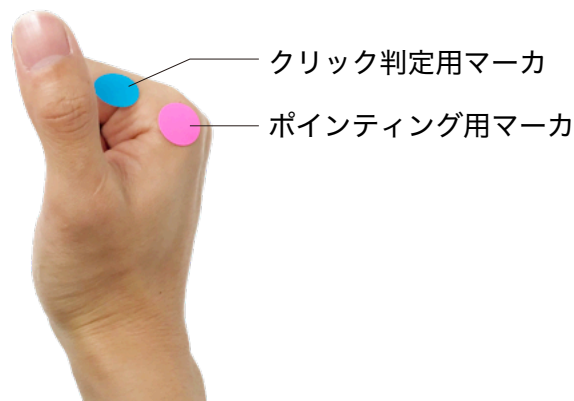


図 7.1: FistPointer-Mirror に用いるマーカ.



図 7.2: 操作姿勢. 左: ポインティング時. 右: クリック時.

作により, カメラからクリック判定用マーカが映らなくなるため, 親指を曲げていると判定することができる.

### 7.3 画像処理アルゴリズム

FistPointer-Mirror においては携帯端末の背面カメラから取得したミラー越しのカードボード VR ゴーグル下部領域における RGB 画像 (今回の実装では 352 pixel × 288 pixel) 中の手の位置に応じて画面上にポインタを表示し, 画像中の手の形状からクリック操作の判定を行う. 手の形状により手に貼り付けたマーカの見え方が変化するため, この変化を検出することによりクリックの判定を行う.

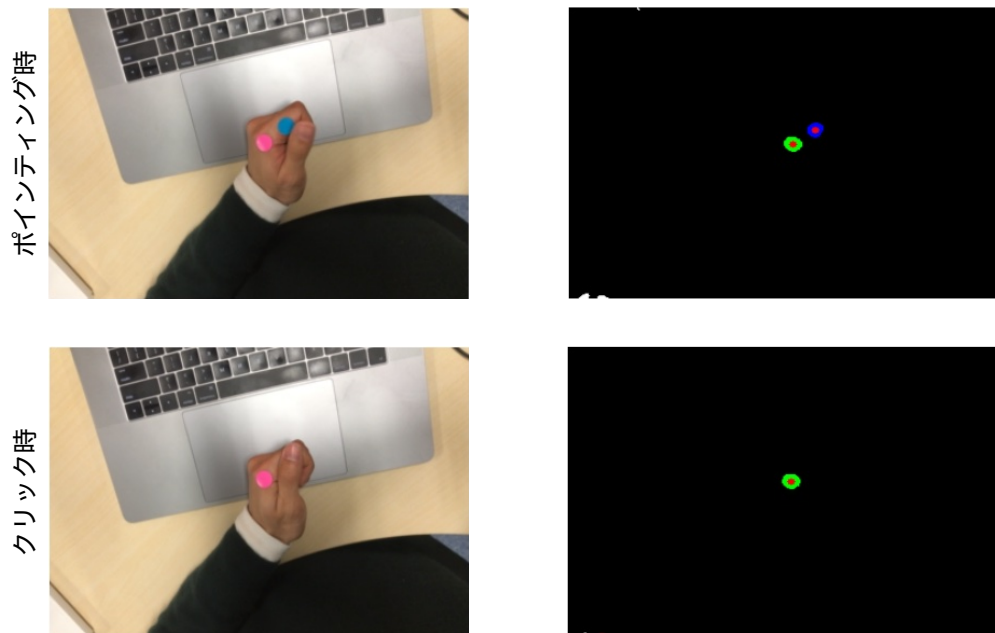


図 7.3: 画像処理によるマーカの検出. ポインティング時は2つのマーカが検出されているが, クリック時は親指によりマーカ (青) が遮蔽されるため, 1つのマーカしか検出されない. なお, ミラーから得られた画像のため左右反転している. 左: 取得された元画像. 右: 検出されたマーカ.

### 7.3.1 マーカの検出

まず, 取得した RGB 画像の色空間を RGB から HSV に変換する. 次にそれぞれのマーカを検出するため, 各画素に対して H (色相), S (色彩), V (明度) の値が一定区間内にある画素を抽出し, 二値化する. これらの HSV の値はマーカの色および環境光に応じて変更する. マーカに類似した領域を抽出した二値画像を生成した後, その二値画像に対してセグメンテーションを行い, 領域ごとに分割する. このとき, 最も面積の広い領域をマーカとする. この処理により, 微細なノイズを除去することが可能である. マーカが検出されている様子を図 7.3 に示す.

### 7.3.2 ポインタ座標の決定

FistPointer-Mirror においては, FistPointer と同様に手の右上 (人差し指の付け根) をポインタの位置とした. この位置は, 親指の折り曲げ動作に影響を受けにくいため, より安定した操作が可能である.

ポインタの座標は RGB 画像から検出されたポインティング用マーカ領域の重心である. しかしながら, 図 7.3 に示すように取得された RGB 画像の下部領域はユーザの腹部が映ってお

り、ユーザは自身の体により手の可動領域が制限される。そのため、取得された RGB 画像に対するマーカの重心の位置をそのままポインタ座標に写像すると、下部領域がポインティング不可能になる。そこで、式 7.1 および式 7.2 に示す写像を行った（操作領域のサイズが 1920 pixel × 1080 pixel の場合）。なお、RGB 画像内におけるマーカの位置を  $(x_p, y_p)$ 、操作領域のポインタ座標を  $(x'_p, y'_p)$  と示す。

$$x'_p = \begin{cases} 0 & (x_p < 32) \\ (x_p - 32) \times 6 & (x_p \geq 32) \end{cases} \quad (7.1)$$

$$y'_p = \begin{cases} 0 & (y_p < 58) \\ (y_p - 58) \times 6 & (58 \leq y_p \leq 238) \\ 1080 & (y_p > 238) \end{cases} \quad (7.2)$$

加えて、ポインタ座標の決定にローパスフィルタを適用することにより、座標の安定化を行った。式 7.3 に適用したローパスフィルタを示す。 $(x'_p, y'_p)_i$  はアルゴリズムから求めた現在のポインタ座標、 $(x'_p, y'_p)_{i-1}$  は 1 フレーム前のポインタ座標、 $(x'_p, y'_p)'_i$  はローパスフィルタ適用後の現在の座標を示す。

$$(x'_p, y'_p)'_i = 0.75 \times (x'_p, y'_p)_{i-1} + 0.25 \times (x'_p, y'_p)_i \quad (7.3)$$

FistPointer-Mirror も FistPointer と同様にカメラ画像からポインタ座標を決定するため、カメラと手の距離に応じてポインタの移動量を調節することができるという特長を持つ。つまり、ユーザは手をカメラに近づけることにより大まかな動作を素早く行うことができる。また、ユーザは手をカメラから遠ざけることにより、細かな操作を行うことができる。

### 7.3.3 クリック操作の判定

クリック操作は、RGB 画像内にクリック判定用マーカが存在するか、しないかで判定される。ユーザは親指を折り曲げるによりクリックを行う。このとき、クリック判定用マーカを親指が覆い隠すため、クリック時はクリック判定用マーカが検出されない。よって、クリック判定用マーカが RGB 画像内に存在する場合はクリックをしていない、存在しない場合はクリックをしている、とアルゴリズムは判定する。

## 7.4 プロトタイプ

図 7.4 に FistPointer-Mirror が動作している様子を示す。iOS スマートフォン（Apple iPhone 7 Plus）上に FistPointer-Mirror を実装した。OS は iOS 11.2.1 であり、画像処理ライブラリとして OpenCV 3.1.0.1 を用いた。

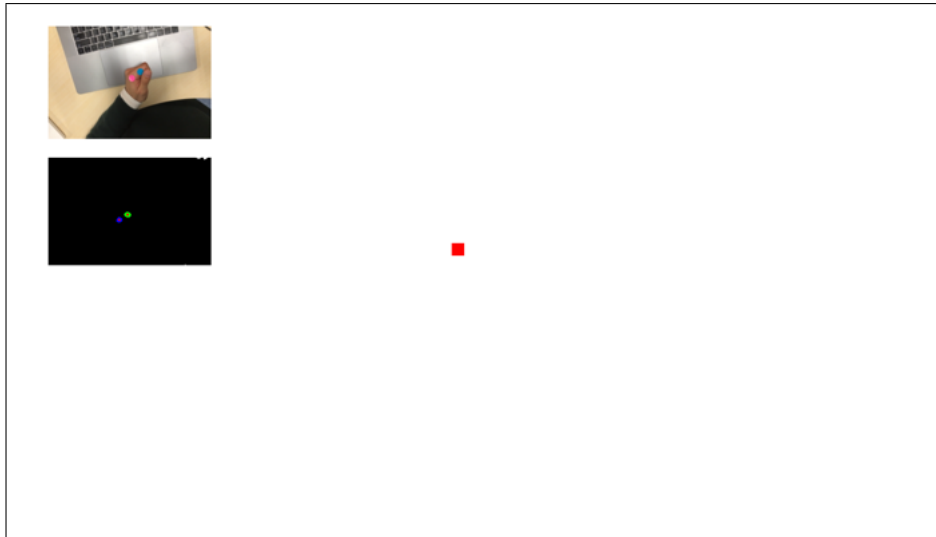


図 7.4: ミラーとマーカを用いた FistPointer-Mirror のプロトタイプ. 赤い点はポインタを示す.



## 第8章 カードボードVRゴーグル下部領域におけるジョイスティックメタファを用いたターゲット選択手法「Joystick-Mirror」の実装

6章にて述べたミラーを用いたカードボードVRゴーグル下部領域における操作に対する具体的な操作手法として7章にて「FistPointer-Mirror」を示した。それに加えて本章ではジョイスティックメタファを用いたターゲット選択手法「Joystick-Mirror」を示す。

### 8.1 ジョイスティックメタファを用いたターゲット選択手法

Joystick-Mirrorはゲームコントローラにおけるジョイスティック操作へのメタファ操作手法である。Joystick-Mirrorにおいては図8.1に示す操作姿勢を用いてターゲット選択を行う。手にてサムズアップポーズを作ると人差し指の上に平面が生まれる。ユーザはその平面の上で図8.1のように親指を上下左右に動かすことによりターゲット選択を行う。

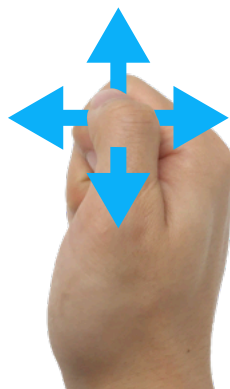


図 8.1: ジョイスティックメタファを用いた操作のイメージ。



図 8.2: Joystick-Mirror に用いるマーカ.



図 8.3: 操作領域提示用マーカ.

## 8.2 マーカ

FistPointer-Mirror の実装と同じ理由により，Joystick-Mirror の実装にはマーカを用いることとした．図 8.2 に Joystick-Mirror において用いるマーカを示す．シール状の緑色，青色，および赤色の異なる色調を持つマーカを用いることにより，単純な画像処理にて手の動きを検出することが可能になる．青色のマーカはポインティング用のマーカであり，緑色のマーカはクリック判定用のマーカである．また，赤色のマーカは操作領域提示用のマーカである．この操作領域提示用マーカは図 8.3 に示すように直径 5 cm の円形の台座（今回はダンボール製）である．操作領域提示用マーカは画像処理アルゴリズムに操作可能領域を提示する．

## 8.3 操作姿勢

Joystick-Mirror はゲームコントローラにおけるジョイスティック操作を模した操作手法である．ユーザは操作領域提示用マーカ（台座）の上で図 8.4（左）に示す姿勢にて親指を上下左右に動かすことによりポインティングを行う．ポインティングを行った後，図 8.4（右）に示すように人差し指を操作領域提示用マーカから離す動作によりターゲット選択（クリック）を行う．この動作により，操作領域提示用マーカの重心点からクリック判定用マーカの重心点までの距離が変化するため，アルゴリズムはクリックの判定を行うことができる．



図 8.4: 操作姿勢. 左: ポインティング時. 右: クリック時.

## 8.4 画像処理アルゴリズム

Joystick-Mirror は携帯端末の背面カメラから得たミラー越しのカードボード VR ゴーグル下部領域における RGB 画像（今回の実装では 352 pixel × 288 pixel）中の操作領域提示用マークに対する親指の位置に応じて画面上のポインタを移動し，画像中の手の形状からクリック操作の判定を行うことにより実現される．手の形状により手に貼り付けたマークの位置が変化するため，この変化を検出することによりクリックの判定を行う．

### 8.4.1 マーカの検出

マーカの検出方法は 7.3.1 節と同様である．マーカが検出されている様子を図 8.5 に示す．

### 8.4.2 ポインタ座標の決定

Joystick-Mirror においては，操作領域提示用マークに対するポインティング用マークの相対位置によってポインタの座標を決定する．操作領域提示用マークの重心点よりも，ポインティング用マークの重心が上にあれば，ポインタを上を移動する（上下左右斜めすべて同様である）．また，操作領域提示用マークおよびポインティング用マーク間の距離に応じてポインタの移動速度は変化する．つまり，操作領域提示用マークの重心点からポインティング用マークの重心点が離れれば離れるほど，ポインタは高速に移動する．

加えて，ポインタ座標の決定にローパスフィルタを適用することにより，座標の安定化を行った．式 8.1 に適用したローパスフィルタを示す．

$$(x_p, y_p)'_i = 0.75 \times (x_p, y_p)_{i-1} + 0.25 \times (x_p, y_p)_i \quad (8.1)$$

$(x_p, y_p)_i$  はアルゴリズムから求めた現在のポインタ座標， $(x_p, y_p)_{i-1}$  は 1 フレーム前のポインタ座標， $(x_p, y_p)'_i$  はローパスフィルタ適用後の現在の座標を示す．

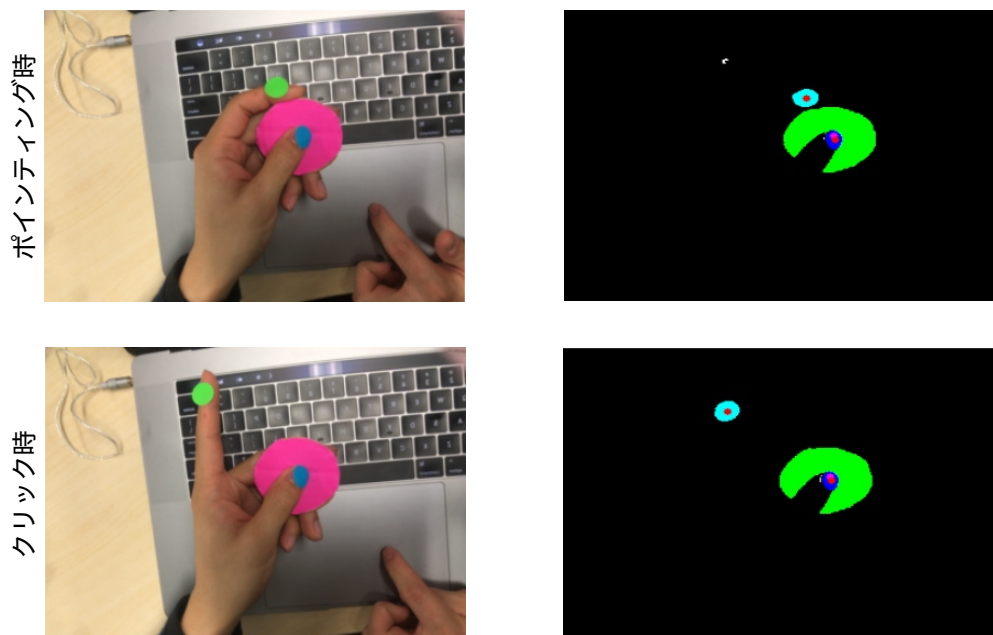


図 8.5: 画像処理によるマーカの検出. ポインティング時は操作領域提示用マーカとクリック判定用マーカが隣接しているが, クリック時は隣接していない. なお, ミラーから得られた画像のため左右反転している. 左: 取得された元画像. 右: 検出されたマーカ.

Joystick-Mirror も FistPointer と同様にカメラ画像からポインタ座標を決定するため、カメラと手の距離に応じてポインタの移動量を調節することができるという特長を持つ。つまり、ユーザは手をカメラに近づけることにより大まかな動作を素早く行うことができる。また、ユーザは手をカメラから遠ざけることにより、細かな操作を行うことができる。

### 8.4.3 クリック操作の判定

クリック操作は、操作領域提示用マーカの重心点からクリック判定用マーカの重心点までの距離の変化を利用して判定される。ユーザはクリック判定用マーカを貼り付けた人差し指を操作領域提示用マーカから離すことによりクリックを行う。このとき、クリック判定用マーカが操作領域提示用マーカに隣接している状態から、離れた状態に変化する。アルゴリズムはこの変化を認識しクリック判定を行う。

クリックの判定には両マーカ間の距離を利用しており、距離がある一定のしきい値  $\tau$  を超えるとクリックと判定される。そのため、カメラとマーカの距離に応じてマーカ間の距離は変化し、カメラとマーカの距離に応じてしきい値を適切に設定しないと正しく判定されない。例えば、カメラとマーカの距離が近づくとクリック時の両マーカ間の距離はより長くなる。この問題に対して、しきい値  $\tau$  の値をクリック判定用マーカの面積に応じて変化させるようにした。式 8.2 にクリックと判定する場合の式を示す。

$$d > \tau * (S/S_r) \quad (8.2)$$

$d$  は操作領域提示用マーカの重心点からクリック判定用マーカの重心点までの距離、 $S$  は現在認識されているクリック判定用マーカの面積、 $S_r$  は基準となるクリック判定用マーカの面積である。 $\tau$  は  $S = S_r$  時における適切な距離である。この式により、例えばカメラとマーカ間の距離が近くなりクリック判定用マーカが大きくカメラに映っている場合、 $S$  の値が大きくなるため式 8.2 の右辺が大きくなり、適切にクリックが判定される。今回は実験的に求めた値を用いた ( $\tau = 100$ ,  $S_r = 300$ )。

## 8.5 プロトタイプ

図 8.6 に Joystick-Mirror が動作している様子を示す。iOS スマートフォン (Apple iPhone 7 Plus) 上に Joystick-Mirror を実装した。OS は iOS 11.2.1 であり、画像処理ライブラリとして OpenCV 3.1.0.1 を用いた。

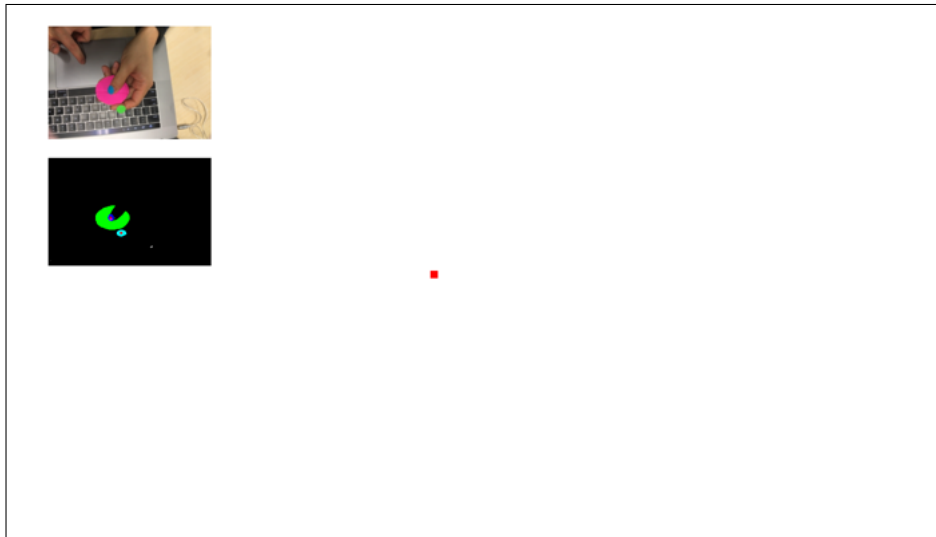


図 8.6: ミラーとマーカを用いた Joystick-Mirror のプロトタイプ. 赤い点はポインタを示す.

## 第9章 カードボードVRゴーグル下部領域におけるターゲット選択手法の評価

7章 (FistPointer-Mirror) および8章 (Joystick-Mirror) にて示したカードボードVRゴーグル下部領域におけるターゲット選択手法の評価を行った。4.2節 (実験2) にて示した実験と同様の実験を実施した。

### 9.1 実験協力者および実験機器

大学生および大学院生6名 (男性5名, 女性1名, 同研究室内 (内著者1名), 年齢21–25歳, 平均23歳) を実験協力者とした。全ての実験協力者が右利きであった。また, 全ての実験協力者は正常な視力または矯正視力であった。2名がメガネを着用し, 1名がコンタクトレンズを着用していた。

実験にはiOS端末 (iPhone 7 Plus, 端末サイズ: 高さ158.2mm × 幅77.9mm × 厚さ7.3mm, 画面サイズ: 5.5インチ, 解像度: 1920pixel × 1080pixel, カメラレンズのF値: 1.8, カメラレンズの焦点距離: 28mm, OS: iOS 11.2.2) を用いた。また, カードボードVRゴーグルとしてハコスコ タタミ 1眼 [HAC] を用いた。

### 9.2 ターゲット条件

ターゲットの大きさがターゲットの選択時間およびエラー率に及ぼす影響を調査するため, 実験2と同様に **large**, **medium**, **small** の3つのターゲットサイズ条件を設けた。

### 9.3 実験タスクと手順

実験は蛍光灯によって一様に照らされた会議室において行われた。カメラから取得される背景<sup>1</sup>は模様のないクリーム色の机とした。実験者はまず, 実験協力者に椅子に深く腰掛けるように指示した。次に, 実験者はカードボードVRゴーグルを実験協力者に手渡した。このとき, 実験条件をそろえるため実験者は実験協力者に, 左手にてカードボードVRゴーグルを把持し, 右手を用いて提案手法の操作を行うよう指示した。その後, 実験協力者に提案手法によるポインティングおよびクリックが正常に動作するかどうかを, 自由にターゲット選

<sup>1</sup>今回はミラー越しのためカードボードVRゴーグル下部の様子が取得される。

択を行うことにより確認するように指示した。動作確認後、操作に慣れるまで操作してもらい、その後実験協力者は本番タスクを開始した。

実験協力者はランダムな位置に表示されるターゲットを2つの手法（FistPointer-Mirror, Joystick-Mirror）を用いて選択するタスクを行った。これを1試行と定義する。実験協力者には画面上に表示されたターゲットをなるべく早く、かつなるべく正確に選択してもらった。実験協力者がターゲットの選択に成功すると次のターゲットが表示された。なお、順序効果を打ち消すために、ターゲットは重複なしのランダムな順序にて提示された。実験協力者は各ターゲットサイズごとに20ターゲット選択を行った。これを1セッションとする。セッションは、実験協力者が1つめのターゲットの選択に成功した直後から開始される。実験協力者は各ターゲットサイズを1セッションずつ large, medium, small の順で選択を行った。よって各実験協力者は、合計120試行（= 20試行 × 3ターゲット条件 × 2手法）を行った。また、手法間の順序効果を相殺するため、実験協力者を2グループに分け、一方を FistPointer-Mirror から、もう一方を Joystick-Mirror から行うこととした。本実験は、実験説明からすべての試行が終了するまでに、約15分の時間を要した。

## 9.4 結果

各ターゲット条件における選択時間とエラー率を図9.1および図9.2に示す。なお、これらの図には比較を行うために実験2から得られた FistPointer の性能も示した。

これらの結果を二元配置分散分析および Tukey の多重比較を用いて解析した。独立変数はターゲット条件および手法条件（FistPointer<sup>2</sup>, FistPointer-Mirror<sup>3</sup>, Joystick-Mirror<sup>4</sup>）である。

### 9.4.1 選択時間

分散分析の結果、手法間に有意な主効果がみられた ( $F_{2, 51} = 43.65$ ,  $\eta^2 = 0.63$ ,  $p < 0.001$ )。多重比較の結果、次のことが分かった。1) FistPointer 条件と Joystick-Mirror 条件の間に有意差がみられた ( $p < 0.001$ )、2) FistPointer-Mirror 条件と Joystick-Mirror 条件の間に有意差がみられた ( $p < 0.001$ )、3) FistPointer 条件と FistPointer-Mirror 条件の間には有意差はみられなかった。

また分散分析の結果、ターゲット条件間にも有意な主効果がみられた ( $F_{2, 51} = 18.86$ ,  $\eta^2 = 0.43$ ,  $p < 0.001$ )。多重比較の結果、次のことが分かった。1) large 条件と small 条件の間に有意差がみられた ( $p < 0.001$ )、2) medium 条件と small 条件の間に有意差がみられた ( $p < 0.001$ )、3) large 条件と medium 条件の間には有意差はみられなかった。

---

<sup>2</sup>実験2から得られたデータ。

<sup>3</sup>本実験から得られたデータ。

<sup>4</sup>本実験から得られたデータ。



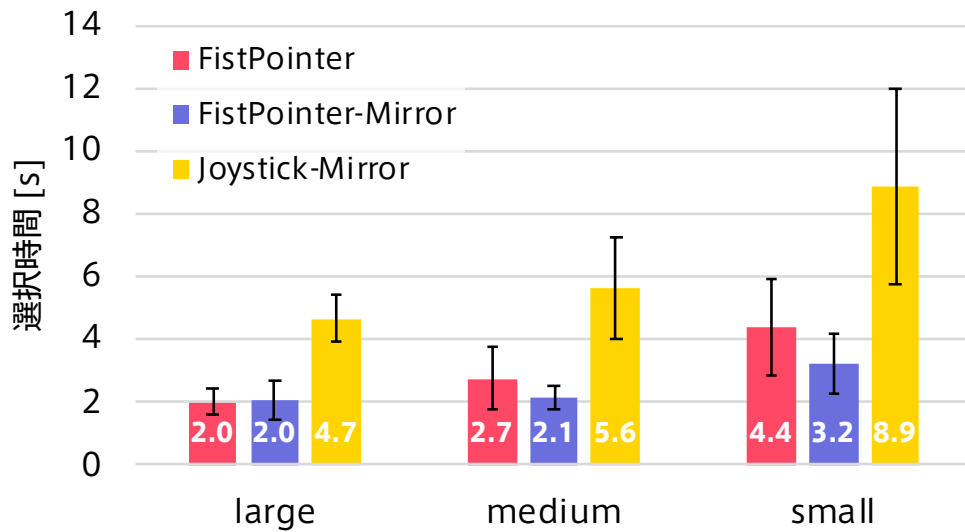


図 9.1: 選択時間. エラーバーは標準偏差を示す. なお, FistPointer の値は本実験から得られたものではなく, 実験 2 のデータである.

#### 9.4.2 エラー率

ターゲットの領域外を選択した場合をエラーとし, エラー率を「エラー回数/総選択回数」と定義した.

分散分析の結果, 手法間に有意な主効果がみられた ( $F_{2, 51} = 4.38, \eta^2 = 0.15, p < 0.05$ ). 多重比較の結果, 次のことが分かった. 1) FistPointer 条件と FistPointer-Mirror 条件の間に有意差がみられた ( $p < 0.05$ ), 2) FistPointer 条件と Joystick-Mirror 条件の間には有意差はみられなかった, 3) FistPointer-Mirror 条件と Joystick-Mirror 条件の間には有意差はみられなかった.

また分散分析の結果, ターゲット条件間にも有意な主効果がみられた ( $F_{2, 51} = 6.30, \eta^2 = 0.20, p < 0.01$ ). 多重比較の結果, 次のことが分かった. 1) large 条件と small 条件の間に有意差がみられた ( $p < 0.01$ ), 2) medium 条件と small 条件の間に有意差がみられた ( $p < 0.01$ ), 3) large 条件と medium 条件の間には有意差はみられなかった.

### 9.5 議論

本実験から得られた各手法におけるターゲット選択性能について議論する. また, 実験中に見られた FistPointer-Mirror における手の動かし方の傾向について議論する.

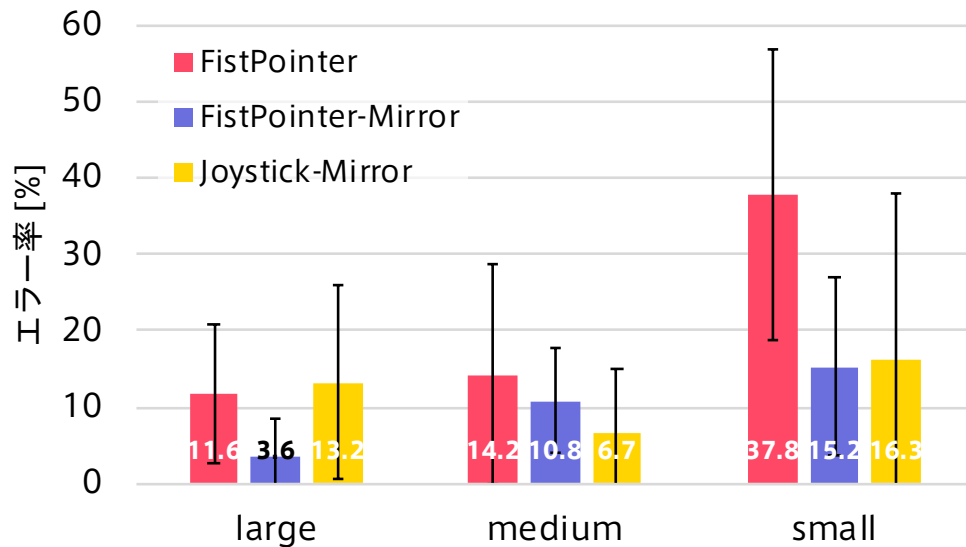


図 9.2: エラー率. エラーバーは標準偏差を示す. なお, FistPointer の値は本実験から得られたものではなく, 実験 2 のデータである.

### 9.5.1 ターゲット選択性能

実験から厳密な結果ではないが, FistPointer-Mirror は従来の FistPointer と同等の性能, もしくはそれ以上であることが分かった. FistPointer-Mirror においては FistPointer と同等の選択時間およびより高い精度にてターゲット選択が可能であった. この結果は, 以下に示す 2 つの要因が影響を与えた結果であると考えられる. 1 つめは画像処理アルゴリズムを単純化したことによるエラー率の減少, 2 つめは操作領域を下部に移したことによる疲労減少である. なお, 実験協力者は実験 2 および本実験において同様のバックグラウンドを持つ集団から選ばれているため (同研究室内の大学生および大学院生), 実験協力者群の特性の違いによる実験結果への影響は小さいと思われる.

一方で, Joystick-Mirror においては FistPointer および FistPointer-Mirror と比べ選択時間が長いことがわかった. しかしながら, 有意差はなかったものの small 条件においては FistPointer に比べ Joystick-Mirror はエラー率が 21.5% 減少しており, 小さなターゲットにおいては有効であることが示唆されている. 今後はより実験協力者数を増やし, 各手法ごとの特性を明らかにする予定である.

### 9.5.2 下部領域における手の動かし方の傾向

FistPointer には操作に用いるポインタと手の位置が一直線上にあるため, 操作位置と手の位置の対応がつきやすいという利点があった. 一方で, FistPointer-Mirror はカードボード VR ゴーグル下部において操作を行うため, その対応がつかない. そこで実験中に実験協力者を

観察したところ，画面上部にポインタを移動させる際に，FistPointer-Mirrorにおいては手を前に移動する必要があるが，手を上に移動している場合が観察された．本実験の結果から，ターゲット選択性能への大きな影響は確認されなかったが，この不一致を解消することによりさらなる性能向上が期待される．

## 第10章 今後の展望

本研究の今後の展望について示す。

### 10.1 手検出アルゴリズムの改良

今回行った実験（実験 1-4）の目的は、提案手法の性能および特性を評価することであった。そのため、今回の実装は実験時の環境のみを想定していた。提案手法を多様な環境で利用するためには、より強固なノイズ除去を実装する必要がある。ノイズを除去し手を検出している手法はいくつか提案されている [STM14, Wi106]。今後はこれらの手法を参考にしながらノイズ除去を実装する。また、現状のアルゴリズムでは本来の肌領域よりも大きなノイズが検出された場合、そのノイズが肌領域として認識される。より高い精度にて手の位置を検出する方法として、手の特徴点を抽出する手法や機械学習を用いた手法があり [KT04, SPS<sup>+</sup>15, SSP<sup>+</sup>14]、今後実装の参考にする。しかしながら、これらの手法は計算コストが高いため、精度とのトレードオフを考慮して適切な方法を検討する必要がある。

### 10.2 奥行きを利用した操作方法の検討および評価

提案手法（FistPointer および FistPointer-Mirror）ではカメラと手の距離に応じてポインタの移動量を調節することができる。具体的には、ユーザは手をカメラに近づけることにより大まかな操作が素早く行え、手をカメラから遠ざけることにより細かな操作が行える。この特性が選択時間やエラー率にどのような影響を与えるのかを今後調査する必要がある。

また、このカメラと手の距離という奥行き方向を利用したユーザインタフェースの検討を行う。例えば、VR ゲームにおいては手を伸ばした状態における入力であればポインティング、手を手前に引いた状態における入力であればメニュー表示（武器の切り替え等）というインタフェースや、ファーストパーソンシューティングのようなシューティングゲームにおいては奥行き方向の動きを銃のスコップのズームに割り当てるといったインタフェースも考えられる。また、5.2 節に示した文字入力においては、手を伸ばした状態における入力はキー選択、手を手前に引いた状態における入力は変換候補の選択、というようなインタフェースも実現可能である。今後はこのような奥行きを利用した VR 環境における操作を検討していく。

### 10.3 連続的にターゲットサイズを変えた場合の性能評価

本論文においては large, medium, small というような限定的なターゲットサイズを用いてターゲットの選択性能を調査した。このターゲットサイズを段階的に大きくしていき、そのサイズにおける精度を計測することによって、このターゲットサイズ以上であれば精度が 96% 以上となる、というような調査を行うことが可能である。これらの結果を元にさらに詳細なデザインガイドラインを示すことができるため、このような実験も視野に検討していく。

### 10.4 下部領域操作におけるより自然な手の位置-ポインタ間の写像

9.5.2 節において、FistPointer-Mirror においては手の実際の位置と、手の位置から計算されたポインタの位置との対応関係に違和感がある可能性が示唆された。この位置の対応関係の不一致を解消することにより、さらなる性能改善が期待される。そこで、例えばカードボード VR ゴーグル下部領域においてポインタを表示せずに、ユーザに最も自然に感じるような動きにて右端から左端、上端から下端へ動かしてもらい  $m$ 、その動きをモデル化する。このモデルを手の位置-ポインタ間の写像関数へと利用することによって、より違和感の少ない操作を実現できる可能性がある。

### 10.5 カードボード VR ゴーグル下部領域におけるターゲット選択手法のマーカを用いない実装

7 章および 8 章に示したカードボード VR ゴーグル下部領域におけるターゲット選択手法はマーカを用いて実装された。これには画像処理アルゴリズムを単純にすることにより、ノイズなどの外的要因に性能が左右されないようにする狙いがあった。このように実装された手法を用いて評価実験を行うことにより、画像処理アルゴリズムの性能と、ターゲット選択手法の性能を切り分けて評価をすることができる。しかしながら、現実利用における実現可能性を示すためにはマーカを用いない実装を示すことが必要になる。よって今後は評価実験によりこれらの手法が有効であると結論付けられた場合、マーカを用いない実装を行う予定である。

## 第11章 おわりに

本論文では、カードボード VR 環境における携帯端末の背面空間にて手を動かすことによるターゲット選択手法を示した。提案手法は手の位置に応じてポインタを表示し、ユーザは手を動かすことによりポインティングを行った後、親指を曲げることによりターゲット選択を行う。提案手法は外部機器を必要とせず、携帯端末に内蔵されたカメラのみを用いて実装可能である。本論文においては、提案手法の実装方法を示し、評価実験により提案手法のジェスチャデザインが有効であることを確認した。また、提案手法の性能を調べるため、ターゲット選択時間およびエラー率を評価する実験をカードボード VR 環境において行った。その結果、large 条件（ターゲットサイズ：7.7 mm）におけるターゲット選択であれば 88.4%の精度にて、medium 条件（ターゲットサイズ：3.8 mm）であれば 85.8%の精度にて選択可能であることが分かった。さらに、画面の中心領域よりも周辺領域の方が選択しにくいというフィードバックを実験協力者から得た。そこで、ターゲット領域別のエラー率を求めるための実験を行った。その結果、画面の領域ごとにエラー率の偏りがあることが分かり、特に画面の最左領域および最上領域のエラー率が有意に高いことが分かった。また、手の支えによるターゲット選択性能への影響を調査したが、有意な差は現れなかった。評価実験に加え、提案手法を用いたアプリケーション例を示すことにより、提案手法の実用性を示した。さらに、カードボード VR ゴーグルに小型のミラーを取り付けることにより、操作領域を携帯端末背面空間からカードボード VR ゴーグル下部領域に移動する手法を示した。カードボード VR ゴーグル下部領域におけるターゲット選択手法として「FistPointer-Mirror」と「Joystick-Mirror」を示し、またそれらのターゲット性能を調査した。その結果、FistPointer-Mirror は large 条件におけるターゲット選択であれば 96.4%の精度にて、medium 条件であれば 89.2%の精度にて選択可能であることが分かった。また、Joystick-Mirror は large 条件におけるターゲット選択であれば 86.8%の精度にて、medium 条件であれば 93.3%の精度にて選択可能であることが分かった。

## 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，論文の執筆方法，研究発表の姿勢など多くのご指導と助言をいただきました。また，高橋伸先生，嵯峨智先生には，研究室内の発表練習において，チーム内の議論にはなかった新たな視点から有益な助言をいただきました。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，研究活動と日常生活の両面において大変お世話になりました。特に WAVE チームの皆様には研究テーマの決定からプロトタイプの実装，論文の執筆まで数多くのアドバイスやアイデアをいただきました。心より感謝いたします。

## 参考文献

- [BBGV11] Amartya Banerjee, Jesse Burstyn, Audrey Girouard, and Roel Vertegaal. Pointable: An in-air pointing technique to manipulate out-of-reach targets on tabletops. In *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, ITS '11*, pp. 11–20, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [Bro96] John Brooke. SUS: A quick and dirty usability scale. *Usability Evaluation in Industry*, 1996.
- [Bro13] John Brooke. SUS: A retrospective. *The Journal of Usability Studies*, Vol. 8, No. 2, pp. 29–40, February 2013.
- [BZFR11] Matthias Baldauf, Sebastian Zambanini, Peter Fröhlich, and Peter Reichl. Markerless visual fingertip detection for natural mobile device interaction. In *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services, MobileHCI '11*, pp. 539–544, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [CST16] Haokan Cheng, Takahashi Shin, and Jiro Tanaka. Facial tracking-assisted hand pointing technique for wall-sized displays. In *Proceedings of the 4th International Conference, DAPI 2016, Held as Part of HCI International 2016*, pp. 191–201. Springer International Publishing, 2016.
- [FTS<sup>+</sup>10] Ryo Fukazawa, Kazuki Takashima, Garth Shoemaker, Yoshifumi Kitamura, Yuichi Itoh, and Fumio Kishino. Comparison of multimodal interactions in perspective-corrected multi-display environment. In *Proceedings of the 2010 IEEE Symposium on 3D User Interfaces, 3DUI '10*, pp. 103–110. IEEE Computer Society, 2010.
- [GAI<sup>+</sup>16] Celeste Groenewald, Craig Anslow, Junayed Islam, Chris Rooney, Peter Passmore, and William Wong. Understanding 3D mid-air hand gestures with interactive surfaces and displays: A systematic literature review. In *Proceedings of the 30th International BCS Human Computer Interaction Conference: Fusion!*, HCI '16, pp. 43:1–43:13, Swindon, UK, 2016. BCS Learning & Development Ltd.
- [GDW<sup>+</sup>16] Jan Gugenheimer, David Dobbstein, Christian Winkler, Gabriel Haas, and Enrico Rukzio. FaceTouch: Enabling touch interaction in display fixed UIs for mobile vir-



tual reality. In *Proceedings of the 29th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pp. 49–60, New York, NY, USA, 2016. ACM.

- [GLF<sup>+</sup>16] Scott W. Greenwald, Luke Loreti, Markus Funk, Ronen Zilberman, and Pattie Maes. Eye gaze tracking with Google Cardboard using purkinje images. In *Proceedings of the 22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '16, pp. 19–22, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [Gooa] Google. Buttons - Components - Material Design. <https://material.io/guidelines/components/buttons.html#buttons-style> (2018年1月16日閲覧) .
- [Goob] Google. Google Cardboard Google VR. <https://vr.google.com/cardboard/> (2018年1月16日閲覧) .
- [GSSR17] Jan Gugenheimer, Evgeny Stemasov, Harpreet Sareen, and Enrico Rukzio. FaceDisplay: Enabling multi-user interaction for mobile virtual reality. In *Proceedings of the 35th CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '17, pp. 369–372, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [HAC] HACOSCO INC. VR 配信プラットフォーム ハコスコ. <https://hacosco.com/> (2018年1月16日閲覧) .
- [HRGMI14] Juan David Hincapié-Ramos, Xiang Guo, Paymahn Moghadasian, and Pourang Irani. Consumed Endurance: A metric to quantify arm fatigue of mid-air interactions. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 1063–1072, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [HTC] HTC. VIVE 日本 — 想像を超えたバーチャルリアリティの体験. <https://www.vive.com/jp/> (2018年1月16日閲覧) .
- [HYM17] Hiroyuki Hakoda, Wataru Yamada, and Hiroyuki Manabe. Eye tracking using built-in camera for smartphone-based HMD. In *Adjunct Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17 Adjunct, pp. 15–16, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [JMA17] Jay Jantz, Adam Molnar, and Ramses Alcaide. A brain-computer interface for extended reality interfaces. In *ACM SIGGRAPH 2017 VR Village*, SIGGRAPH '17, pp. 3:1–3:2, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [KL14] Arun Kulshreshth and Joseph J. LaViola, Jr. Exploring the usefulness of finger-based 3D gesture menu selection. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 1093–1102. ACM, 2014.

- [KM15] Kunihiro Kato and Homei Miyashita. Creating a mobile head-mounted display with proprietary controllers for interactive virtual reality content. In *Adjunct Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15 Adjunct, pp. 35–36, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [KM16] Kunihiro Kato and Homei Miyashita. 3D printed physical interfaces that can extend touch devices. In *Adjunct Proceedings of the 29th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16 Adjunct, pp. 47–49, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [KT04] Mathias Kolsch and Matthew Turk. Fast 2D hand tracking with flocks of features and multi-cue integration. In *Proceedings of the 2004 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop*, CVPRW '04, p. 158, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
- [KY13] Haruhisa Kato and Hiromasa Yanagihara. PACMAN UI: Vision-based finger detection for positioning and clicking manipulations. In *Proceedings of the 15th International Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '13, pp. 464–467, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [LAKB17] Joon Hyub Lee, Sang-Gyun An, Yongkwan Kim, and Seok-Hyung Bae. Projective Windows: Arranging windows in space using projective geometry. In *Adjunct Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17 Adjunct, pp. 169–171, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [LBZ12] Katrin Lasinger, Matthias Baldauf, and Sebastian Zambanini. Evaluating camera-based methods for mobile markerless fingertip detection. In *Proceedings of Workshop on Smart Mobile Applications, 10th International Conference on Pervasive Computing*, Workshop on Smart Mobile Applications, 10th International Conference on Pervasive Computing, pp. 1–6, 2012.
- [Lea] Leap Motion Inc. Leap Motion. <https://www.leapmotion.com/> (2018年1月16日閲覧) .
- [LHLK<sup>+</sup>13] Zhihan Lv, Alaa Halawani, Muhammad Sikandar Lal Khan, Shafiq Ur Réhman, and Haibo Li. Finger in Air: Touch-less interaction on smartphone. In *Proceedings of the 12th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, MUM '13, pp. 16:1–16:4, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [LKSK16] Jihyun Lee, Byungmoon Kim, Bongwon Suh, and Eunyee Koh. Exploring the front touch interface for virtual reality headsets. In *Proceedings of the 34th CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '16, pp. 2585–2591, New York, NY, USA, 2016. ACM.

- [LNV15] Mingyu Liu, Mathieu Nancel, and Daniel Vogel. Gunslinger: Subtle arms-down mid-air interaction. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, pp. 63–71. ACM, 2015.
- [LYD<sup>+</sup>17] Juyoung Lee, Hui-Shyong Yeo, Murtaza Dhuliawala, Jedidiah Akano, Junichi Shimizu, Thad Starner, Aaron Quigley, Woontack Woo, and Kai Kunze. Itchy Nose: Discreet gesture interaction using EOG sensors in smart eyewear. In *Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '17, pp. 94–97, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [Mic] Microsoft. 複合現実テクノロジーの先導者 — HoloLens. <https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens> (2018年1月16日閲覧) .
- [MJH13] Anders Markussen, Mikkel R. Jakobsen, and Kasper Hornbæk. Selection-based mid-air text entry on large displays. In *Proceedings of the 2013 IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction*, INTERACT '13, pp. 401–418. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [MYM17] Nobutaka Matsushima, Wataru Yamada, and Hiroyuki Manabe. Attaching objects to smartphones back side for a modular interface. In *Adjunct Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, pp. 51–52, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [NWKI14] Takehiro Niikura, Yoshihiro Watanabe, Takashi Komuro, and Masatoshi Ishikawa. In-air finger motion interface for mobile devices with vibration feedback. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 9, No. 4, pp. 375–383, 2014.
- [Ocu] Oculus. Oculus Rift — Oculus. <https://www.oculus.com/rift/#oui-csl-rift-games=star-trek> (2018年1月16日閲覧) .
- [PH15] Benjamin Petry and Jochen Huber. Towards effective interaction with omnidirectional videos using immersive virtual reality headsets. In *Proceedings of the 6th Augmented Human International Conference*, AH '15, pp. 217–218. ACM, 2015.
- [RESH17] Franca Alexandra Rupprecht, Achim Ebert, Andreas Schneider, and Bernd Hamann. Virtual Reality Meets Smartwatch: Intuitive, natural, and multi-modal interaction. In *Proceedings of the 35th CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '17, pp. 2884–2890, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [Son] Sony Interactive Entertainment Inc. PlayStation VR — プレイステーション. <http://www.jp.playstation.com/psvr/> (2018年1月16日閲覧) .

- [SPS<sup>+</sup>15] Jie Song, Fabrizio Pece, Gábor Sörös, Marion Koelle, and Otmar Hilliges. Joint estimation of 3D hand position and gestures from monocular video for mobile interaction. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15*, pp. 3657–3660, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [SR15] Boris Smus and Christopher Riederer. Magnetic input for mobile virtual reality. In *Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers, ISWC '15*, pp. 43–44, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [SRI<sup>+</sup>15] Antti Sand, Ismo Rakkolainen, Poika Isokoski, Jari Kangas, Roope Raisamo, and Karri Palovuori. Head-mounted display with mid-air tactile feedback. In *Proceedings of the 21st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '15*, pp. 51–58, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [SSP<sup>+</sup>14] Jie Song, Gábor Sörös, Fabrizio Pece, Sean Ryan Fanello, Shahram Izadi, Cem Keskin, and Otmar Hilliges. In-air gestures around unmodified mobile devices. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '14*, pp. 319–329, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [STB07] Garth Shoemaker, Anthony Tang, and Kellogg S. Booth. Shadow Reaching: A new perspective on interaction for large displays. In *Proceedings of the 20th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '07*, pp. 53–56, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [STM14] Atsushi Sugiura, Masahiro Toyoura, and Xiaoyang Mao. A natural click interface for AR systems with a single camera. In *Proceedings of Graphics Interface 2014, GI '14*, pp. 67–75, Toronto, Ontario, Canada, 2014. Canadian Information Processing Society.
- [TF16] Sam Tregillus and Eelke Folmer. VR-STEP: Walking-in-place using inertial sensing for hands free navigation in mobile VR environments. In *Proceedings of the 34th Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '16*, pp. 1250–1255, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [TSZ<sup>+</sup>16] Benjamin Tag, Junichi Shimizu, Chi Zhang, Naohisa Ohta, Kai Kunze, and Kazunori Sugiura. Eye blink as an input modality for a responsive adaptable video system. In *Adjunct Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, UbiComp '16 Adjunct*, pp. 205–208, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [VB05] Daniel Vogel and Ravin Balakrishnan. Distant freehand pointing and clicking on very large, high resolution displays. In *Proceedings of the 18th Annual ACM Symposium*

*on User Interface Software and Technology*, UIST '05, pp. 33–42, New York, NY, USA, 2005. ACM.

- [WFB<sup>+</sup>07] Daniel Wigdor, Clifton Forlines, Patrick Baudisch, John Barnwell, and Chia Shen. Lucid Touch: A see-through mobile device. In *Proceedings of the 20th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '07, pp. 269–278, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [WFZ16] Pui Chung Wong, Hongbo Fu, and Kening Zhu. Back-Mirror: Back-of-device one-handed interaction on smartphones. In *SIGGRAPH Asia 2016 Mobile Graphics and Interactive Applications*, SA '16, pp. 13:1–13:2, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [Wil06] Andrew D. Wilson. Robust computer vision-based detection of pinching for one and two-handed gesture input. In *Proceedings of the 19th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '06, pp. 255–258, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [WPSN15] Anusha Withana, Roshan Peiris, Nipuna Samarasekara, and Suranga Nanayakkara. zSense: Enabling shallow depth gesture recognition for greater input expressivity on smart wearables. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 3661–3670, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [YKM<sup>+</sup>17] Koki Yamashita, Takashi Kikuchi, Katsutoshi Masai, Maki Sugimoto, Bruce H. Thomas, and Yuta Sugiura. CheekInput: Turning your cheek into an input surface by embedded optical sensors on a head-mounted display. In *Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '17, pp. 19:1–19:8, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [YPYM<sup>+</sup>15] Chih-Hsiang Yu, Wen-Wei Peng, Shys-Fan Yang-Mao, Yuan Wang, Winyu Chinthammit, and Henry Been-Lirn Duh. A hand gesture control framework on smart glasses. In *SIGGRAPH Asia 2015 Mobile Graphics and Interactive Applications*, SA '15, pp. 16:1–16:4, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [阿達 16] 阿達拓也, 志築文太郎, 田中二郎. 携帯端末の背面空間におけるハンドジェスチャによるポインティング手法. 第 20 回一般社団法人情報処理学会シンポジウム, インタラクション 2016, pp. 588–591. 情報処理学会, 2016.
- [古井 14] 古井陽之助, 前田環貴, 松本誠義. 講義画面の自動連続キャプチャを行う講義・学習支援システムとその評価実験. 火の国情報シンポジウム 2014, 火の国情報シンポジウム 2014, pp. 1–8. 情報処理学会, 2014.

- [築谷 10] 築谷喬之, ガースシューメイカー, ブース S. ケログ, 高嶋和毅, 伊藤雄一, 北村喜文, 岸野文郎. 大画面壁面ディスプレイ上での影のメタファを利用したポインティング動作におけるフィッツの法則の検討. 第 14 回一般社団法人情報処理学会シンポジウム, インタラクション 2010, pp. 317-320. 情報処理学会, 2010.

# 著者論文リスト

## 本論文に関する論文

### 査読付き国内論文誌論文

1. 石井 晃, 阿達 拓也, 島 佳吾, 中前 秀太, 志築 文太郎, 高橋 伸. カードボード VR のための空中操作を用いたターゲット選択手法. 日本ソフトウェア科学会論文誌「コンピュータソフトウェア」, 15 pages, 2018. 日本ソフトウェア科学会. (採録決定)

### 査読付き国際会議論文

1. Akira Ishii, Takuya Adachi, Keigo Shima, Shuta Nakamae, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. FistPointer: Target selection technique using mid-air interaction for mobile VR environment. In *Proceedings of Asian CHI Symposium in CHI '17*, 8 pages, 2017. SIGCHI Japan Chapter.
2. Akira Ishii, Takuya Adachi, Keigo Shima, Shuta Nakamae, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. FistPointer: Target selection technique using mid-air interaction for mobile VR environment. In *Proceedings of the 35th CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '17*, p. 474, 2017. ACM.

### 査読付き国内会議論文

1. 石井 晃, 阿達 拓也, 島 佳吾, 中前 秀太, 志築 文太郎, 高橋 伸. FistPointer : モバイル VR 環境のための空中操作を用いたターゲット選択手法. 第 24 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論文集, WISS 2016, pp. 17-22, 2016. 日本ソフトウェア科学会.

### 査読なし国内会議論文

1. 石井 晃, 阿達 拓也, 島 佳吾, 中前 秀太, 志築 文太郎, 高橋 伸. 携帯端末背面における空中ジェスチャを用いたターゲット選択手法. 情報処理学会研究報告, Vol. 2016-HCI-169, 8 pages, 2016. 情報処理学会.

## その他の論文

### 査読付き国内論文誌論文

1. 石井 晃, 志築 文太郎. 超小型タッチスクリーン端末上の選択性能を向上させるふきだし表示デザインの調査. 情報処理学会論文誌「インタラクションの理解および基盤・応用技術」, Vol. 59, No. 2, 13 pages, 2018. 情報処理学会. (採録決定)
2. 石井 晃, 崔 雄, 李 亮, 関口 博之, 八村 広三郎. スマートフォンにおける排便データを用いたインタラクティブ健康管理システム. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 18, No. 4, pp. 465-474, 2013 年. 日本バーチャルリアリティ学会.

### 査読付き国際会議論文

1. Akira Ishii, Hiroyuki Hakoda, and Buntarou Shizuki. Flickey: Flick-based QWERTY software keyboard for ultra-small touch screen devices. In *Proceedings of 20th International Conference on Human-Computer Interaction*, HCI International 2018, 12 pages, 2018. Springer International Publishing. (to appear)
2. Koshi Ikegawa, Akira Ishii, Kazunori Okamura, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. Investigating effects of users' background in analyzing long-term images from a stationary camera. In *Proceedings of 20th International Conference on Human-Computer Interaction*, HCI International 2018, 12 pages, 2018. Springer International Publishing. (to appear)
3. Akira Ishii, Masay Tsuruta, Ippei Suzuki, Shuta Nakamae, Tatsuya Minagawa, Junichi Suzuki, and Yoichi Ochiai. ReverseCAVE Experience: Providing reverse perspectives for sharing VR experience. In *ACM SIGGRAPH Asia 2017 VR Showcase*, SA '17, pp. 9:1-9:2, 2017. ACM.
4. Akira Ishii, Masay Tsuruta, Ippei Suzuki, Shuta Nakamae, Tatsuya Minagawa, Junichi Suzuki, and Yoichi Ochiai. ReverseCAVE: Providing reverse perspectives for sharing VR experience. In *ACM SIGGRAPH 2017 Posters*, SIGGRAPH '17, pp. 28:1-28:2, 2017. ACM.
5. Ippei Suzuki, Shuntarou Yoshimitsu, Keisuke Kawahara, Nobutaka Ito, Atsushi Shinoda, Akira Ishii, Takatoshi Yoshida, and Yoichi Ochiai. Gushed Light Field: Video showcase of aerosol-based fog display. In *Proceedings of the 35th CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '17, p. 453, 2017. ACM.
6. Ippei Suzuki, Shuntarou Yoshimitsu, Keisuke Kawahara, Nobutaka Ito, Atsushi Shinoda, Akira Ishii, Takatoshi Yoshida, and Yoichi Ochiai. Design Method for Gushed Light Field: Aerosol based aerial and instant display. In *Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference*, AH '17, pp. 1:1-1:10, 2017. ACM.



7. Ayaka Ebisu, Kenta Suzuki, Satoshi Hashizume, Akira Ishii, Mose Sakashita, and Yoichi Ochiai. Stimulated Percussions: Techniques for controlling human as percussive musical instrument by using electrical muscle stimulation. In *Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference, AH '17*, pp. 33:1-33:5, 2017. ACM.
8. Ayaka Ebisu, Kenta Suzuki, Satoshi Hashizume, Akira Ishii, Mose Sakashita, and Yoichi Ochiai. Stimulated Percussions: Techniques for controlling human as percussive musical instrument by using electrical muscle stimulation. In *SIGGRAPH Asia 2016 Posters, SA '16*, pp. 37:1-37:2, 2016. ACM.
9. Ippei Suzuki, Shuntarou Yoshimitsu, Keisuke Kawahara, Nobutaka Ito, Atsushi Shinoda, Akira Ishii, Takatoshi Yoshida, and Yoichi Ochiai. Gushed Light Field: Design method for aerosol-based fog display. In *SIGGRAPH Asia 2016 Posters, SA '16*, pp. 26:1-26:2, 2016. ACM.
10. Ippei Suzuki, Shuntarou Yoshimitsu, Keisuke Kawahara, Nobutaka Ito, Atsushi Shinoda, Akira Ishii, Takatoshi Yoshida, and Yoichi Ochiai. Gushed Light Field: Design method for aerosol-based fog display. In *SIGGRAPH Asia 2016 Emerging Technologies, SA '16*, pp. 9:1-9:2, 2016. ACM.
11. Ippei Suzuki, Shuntarou Yoshimitsu, Keisuke Kawahara, Nobutaka Ito, Atsushi Shinoda, Akira Ishii, Takatoshi Yoshida, Yoichi Ochiai, Wataru Yamada, Manabe Hiroyuki, Inrak Choi, Elliot W. Hawkes, David L. Christensen, Christopher J. Ploch, Sean Follmer, Oliver Glauser, Benedek Vartok, Wan-Chun Ma, Daniele Panozzo, Alec Jacobson, Otmar Hilliges, and Olga Sorkine-Hornung. Demo hour. *interactions* 24, 1, pp. 8-11, 2016. ACM.
12. Akira Ishii, and Buntarou Shizuki. Exploring callout design in selection task for ultra-small touch screen devices. In *Proceedings of 28th Australian Conference on Human-Computer Interaction, OzCHI '16*, pp.426-434, 2016. ACM.
13. Akira Ishii, Ippei Suzuki, Shinji Sakamoto, Kanai Keita, Kazuki Takazawa, Hiraku Doi, and Yoichi Ochiai. Optical Marionette: Graphical manipulation of human's walking direction. In *Proceedings of the 29th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '16*, pp. 705-716, 2016. ACM.
14. Ippei Suzuki, Shuntarou Yoshimitsu, Keisuke Kawahara, Nobutaka Ito, Atsushi Shinoda, Akira Ishii, Takatoshi Yoshida, and Yoichi Ochiai. Gushed Diffusers: Fast-moving, floating, and lightweight midair display. In *Adjunct Proceedings of the 29th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '16 Adjunct*, pp. 69-70, 2016. ACM.
15. Akira Ishii, Ippei Suzuki, Shinji Sakamoto, Kanai Keita, Kazuki Takazawa, Hiraku Doi, and Yoichi Ochiai. Graphical manipulation of human's walking direction with visual illusion. In *ACM SIGGRAPH 2016 Posters, SIGGRAPH '16*, pp. 9:1-9:2, 2016. ACM.

16. Akira Ishii, Ipei Suzuki, Shinji Sakamoto, Kanai Keita, Kazuki Takazawa, Hiraku Doi, and Yoichi Ochiai. Graphical manipulation of human's walking direction with visual illusion. In *ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '16, pp. 8:1-8:2, 2016. ACM.
17. Akira Ishii, Tetsuya Abe, Hiroyuki Hakoda, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. Evaluation of a system to analyze long term images from a stationary camera. In *Proceedings of 18th International Conference on Human-Computer Interaction*, HCI International 2016, pp. 275-286, 2016. Springer International Publishing.
18. Akira Ishii, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. Evaluation of callout design for ultra-small touch screen devices. In *Proceedings of the 34th CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '16, pp. 2511-2518, 2016. ACM.

#### 査読付き国内会議論文

1. 石井 晃, 箱田 博之, 志築 文太郎, 田中 二郎. Flickey : 超小型タッチスクリーン端末におけるフリックに基づく QWERTY キーボード. 第 20 回一般社団法人情報処理学会シンポジウム, インタラクシオン 2016, pp. 80-88, 2016. 情報処理学会.

#### 招待

1. 石井 晃, 鈴木 一平, 坂本 慎司, 金井 啓太, 高澤 和希, 土井 ひらく, 落合 陽一. Optical Marionette. 第 24 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ, WISS 2016, 2016. 日本ソフトウェア科学会.

#### 査読なし国内会議論文

1. 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, 8 pages, 2015. 情報処理学会.
2. 阿部 哲也, 箱田 博之, 石井 晃, 志築 文太郎, 田中 二郎. 長期定点カメラ映像の分析支援システムの評価. 情報処理学会研究報告, Vol. 2015-HCI-164, 7 pages, 2015. 情報処理学会.
3. 石井 晃, 崔 雄, 李 亮, 関口 博之, 八村 広三郎. うんこデータを用いたインタラクティブ健康管理システム. 電子情報通信学会 総合大会, p. 290, 2013. 電子情報通信学会.
4. 石井 晃, 崔 雄, 李 亮, 関口 博之, 八村 広三郎. 携帯情報端末を活用したインタラクティブ健康管理システム. 生体情報処理と高度情報処理シンポジウム 2013, pp. 195-197, 2013.

## その他発表等

1. 中村 拓人, 石井 晃, 志築 文太郎, 高橋 伸. 頸部装着型デバイスを用いた頭部姿勢認識システム. 第25回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ, WISS 2017, 2017. 日本ソフトウェア科学会.

## 付録A 実験1にて使用した実験同意書，事前アンケート用紙，事後アンケート用紙，実験手順書

4.1節にて示した評価実験（実験1：操作に最適な指の調査）において使用した実験同意書，事前アンケート用紙，事後アンケート用紙，および実験手順書を示す。

## A.1 実験同意書

### ターゲット選択手法の性能評価実験のお願い

文責：石井 晃

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、IPLAB にて研究中のターゲット選択手法の性能を評価することです。
- 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 \_\_\_\_\_

実験時間 \_\_\_\_\_

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コンピュータサイエンス専攻 署名 \_\_\_\_\_

## A.2 事前アンケート用紙

### 実験に関する事前アンケート

文責：石井 晃

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. 目の状態についてお答えください（よく見える状態）。

裸眼   ・  コンタクトレンズ   ・  メガネ

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

5. HMD の利用歴はありますか？

ない   ・       年               カ月

6. 腕を上げるような作業を普段していますか？

ある場合は，具体的な作業内容と期間をご記入ください。

(例：交通整理，指揮者，ピアノ，肘置きに手をおかずに運転)

\_\_\_\_\_ 年          \_\_\_\_\_ カ月

## A.3 事後アンケート用紙

### 実験に関するアンケート

文責：石井 晃

1. 実験中の眼の状態はどうでしたか？  
裸眼 ・ メガネ ・ コンタクトレンズ
2. 【親指】動かしやすかったですか  
(強くそう思う) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (強くそう思わない)
3. 【親指】思ったように操作できましたか？  
(強くそう思う) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (強くそう思わない)
4. 【親指】どれくらい手が疲れましたか？  
(かなり疲れた) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (あまり疲れなかった)
5. 【親指】どれくらい腕が疲れましたか？  
(かなり疲れた) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (あまり疲れなかった)
6. 【人差し指】動かしやすかったですか  
(強くそう思う) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (強くそう思わない)
7. 【人差し指】思ったように操作できましたか？  
(強くそう思う) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (強くそう思わない)
8. 【人差し指】どれくらい手が疲れましたか？  
(かなり疲れた) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (あまり疲れなかった)

次のページへ続きます

9. 【人差し指】どれくらい腕が疲れましたか？

(かなり疲れた) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (あまり疲れなかった)

10. どちらの指を使ったほうが疲れましたか？ (○で選択してください)

親指 ・ 人差し指

11. 自由記述 (思ったことや感想等を自由に記述してください) 【任意】

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。



## A.4 実験手順書

### 連打実験実施要領

文責：石井 晃

1. ストップウォッチを用いて、実験時間の計測を開始する
2. 実験参加へのお礼と、簡単な説明をする
3. 【ターゲット選択手法の性能評価実験のお願い】に記入してもらう
4. 【実験に関する事前アンケート】に記入してもらう
5. 壁や環境光に応じて適切に被験者の手が認識されるように、アプリ側の【しきい値】を設定する
6. 被験者をグループ A（親指→人差し指）、グループ B（人差し指→親指）に分ける
  - 1 グループ区分は被験者リストに記載されている
  - 2 【ターゲット選択手法の性能評価実験のお願い】にグループ区分を記載する
7. 腕が水平になるように端末を支えるスタンドを設定する
  - 1 水準器を用いる
8. 条件 1 を用いて選択の練習を行う
  - 1 ゆっくり丁寧に選択動作を行ってもらい、確実に操作できていることを確認する
    - 1 真ん中+四隅を一回ずつ
  - 2 高速に 5 回選択動作を行ってもらい、確実に操作できていることを確認する  
(あまりやりすぎると疲れるので注意)
9. 休憩 2 分
10. 条件 1 で実験を行う
11. 条件 1 に関して【実験に関するアンケート】に回答してもらう
12. 休憩 5 分
13. 条件 2 を用いて選択の練習を行う
14. 休憩 2 分
15. 条件 2 で実験を行う
16. 条件 1 に関して【実験に関するアンケート】に回答してもらう
17. 【実験に関するアンケート】の残っているすべての設問に回答してもらう

18.ストップウォッチを停止し、実験時間を【ターゲット選択手法の性能評価実験のお願い】に記録する

19.謝礼【QUOカード】を渡す

## 付録B 実験2にて使用した実験同意書，事前アンケート用紙，事後アンケート用紙

4.2節にて示した評価実験（実験2：ターゲットサイズごとの性能評価）において使用した実験同意書，事前アンケート用紙，および事後アンケート用紙を示す。

## B.1 実験同意書

### FistPointer 性能評価実験のお願い

文責：石井 晃

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、IPLAB にて研究中のターゲット選択手法「FistPointer」の性能を評価することです。
- 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。

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コンピュータサイエンス専攻 \_\_\_\_\_ 署名 \_\_\_\_\_

## B.2 事前アンケート用紙

### 実験に関する事前アンケート

文責：石井 晃

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. 目の状態についてお答えください（よく見える状態）。

裸眼   ・  コンタクトレンズ   ・  メガネ

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

5. HMD の利用歴はありますか？

ない   ・       年               カ月

6. スマートフォンを用いた VR アプリケーションを利用したことはありますか？

ある場合は，具体的なアプリ名と期間をご記入ください。

\_\_\_\_\_ 年               カ月

7. 腕を上げるような作業を普段していますか？

ある場合は，具体的な作業内容と期間をご記入ください。

（例：交通整理，指揮者，ピアノ，肘置きに手をおかずに運転）

\_\_\_\_\_ 年               カ月

## B.3 事後アンケート用紙

### 実験に関するアンケート

文責：石井 晃

1. 実験中の眼の状態はどうでしたか？

裸眼 ・ メガネ ・ コンタクトレンズ

2. FistPointer は操作が簡単でしたか？

(そう思う) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (全く思わない)

3. FistPointer は思ったように操作できましたか？

(そう思う) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (全く思わない)

4. FistPointer による操作について良かった点, 改善すべき点を教えてください

良かった点

改善すべき点

5. FistPointer の応用先について思いついたものを書いてください

応用先, どこに使える?



6. FistPointer を使用した感想を教えてください



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3にて使用した実験同意書，事前アンケート用紙，事後アンケート用紙

4.3 節にて示した評価実験（実験3：手の支えによる影響の調査）において使用した実験同意書，事前アンケート用紙，および事後アンケート用紙を示す。



## C.1 実験同意書

### FistPointer 性能評価実験のお願い

文責：石井 晃

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、IPLABにて研究中のターゲット選択手法「FistPointer」の性能を評価することです。
- 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。

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コンピュータサイエンス専攻 \_\_\_\_\_ 署名 \_\_\_\_\_

## C.2 事前アンケート用紙

### 実験に関する事前アンケート

文責：石井 晃

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)

\_\_\_\_\_

3. スマートフォンの利用歴はどのくらいですか？

     年               カ月

4. スマートフォンを用いた VR アプリケーションを利用したことはありますか？

ある場合は，具体的なアプリ名をご記入ください。

\_\_\_\_\_

5. スマートフォンを用いた VR アプリケーションをどの程度の期間利用していますか？

     年               カ月

### C.3 事後アンケート用紙

#### 実験に関するアンケート

文責：石井 晃

1. FistPointer による操作について良かった点, 改善すべき点を教えてください

良かった点

改善すべき点

2. FistPointer を使用した感想を教えてください

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D 実験4にて使用した実験同意書，事前アンケート用紙，事後アンケート用紙，SUSのアンケートフォーム

4.4節にて示した評価実験（実験4：ターゲット領域別選択性能評価）において使用した実験同意書，事前アンケート用紙，事後アンケート用紙，およびSUSのアンケートフォームを示す。

## D.1 実験同意書

### FistPointer 性能評価実験のお願い

文責：石井 晃

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、IPLAB にて研究中のターゲット選択手法「FistPointer」の性能を評価することです。
- 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。

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コンピュータサイエンス専攻 \_\_\_\_\_ 署名 \_\_\_\_\_

## D.2 事前アンケート用紙

### 実験に関する事前アンケート

文責：石井 晃

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)

\_\_\_\_\_

3. スマートフォンの利用歴はどのくらいですか？

     年               カ月

4. スマートフォンを用いた VR アプリケーションを利用したことはありますか？

ある場合は，具体的なアプリ名をご記入ください。

\_\_\_\_\_

5. スマートフォンを用いた VR アプリケーションをどの程度の期間利用していますか？

     年               カ月

## D.3 事後アンケート用紙

### 実験に関するアンケート

文責：石井 晃

1. 実験中の眼の状態はどうでしたか？

裸眼 ・ メガネ ・ コンタクトレンズ

2. FistPointer は操作が簡単でしたか？

(そう思う) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (全く思わない)

3. FistPointer は思ったように操作できましたか？

(そう思う) 5 ・ 4 ・ 3 ・ 2 ・ 1 (全く思わない)

4. FistPointer による操作について良かった点, 改善すべき点を教えてください

良かった点

改善すべき点

5. FistPointer の応用先について思いついたものを書いてください

応用先, どこに使える?



6. FistPointer を使用した感想を教えてください



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。



## D.4 SUS のアンケートフォーム

[このフォームを編集](#)

### SUS (Service Usability Scale)

FistPointerの評価実験に参加していただきありがとうございます。  
性能評価のため、SUSというアンケートに答えていただきます。

【注意】  
もし、あまり当てはまらない項目があればポジティブ側に回答してください。

**\*必須**

名前 \*

### SUS (Service Usability Scale)

このシステムに関する次の記述に同意しますか。最も当てはまるものを選んでください。

わたしはこのシステムを頻繁に使いたいと思う (I think that I would like to use this system frequently.) \*

1 2 3 4 5

全く思わない      強く思う

このシステムは無駄に複雑であると思った (I found the system unnecessarily complex.) \*

1 2 3 4 5

全く思わない      強く思う

このシステムは簡単に使えると思った (I thought the system was easy to use.) \*

1 2 3 4 5

全く思わない      強く思う

このシステムを使えるようになるには、わたしは技術者の支援を必要とするだろうと思う (I think that I would need the support of a technical person to be able to use this system.) \*

1 2 3 4 5

全く思わない      強く思う

このシステムでは様々な機能がよくまとまっていると思った (I found the various functions in this system were well integrated.) \*

1 2 3 4 5

全く思わない      強く思う

このシステムにはあまりにも多くの矛盾があると思った (I thought there was too much inconsistency in this system.) \*

1 2 3 4 5

全く思わない      強く思う

ほとんどの人々はこのシステムの使い方をすぐに覚えるだろうと思う (I would imagine that most people would learn to use this system very quickly.) \*

1 2 3 4 5

全く思わない      強く思う

このシステムはとても扱いにくいと思った (I found the system very cumbersome to use.) \*

1 2 3 4 5

全く思わない      強く思う

このシステムを使用できる自信がとてもある (I felt very confident using the system.) \*

1 2 3 4 5

全く思わない      強く思う

わたしはこのシステムを使い始める前に、多くのことを学ぶ必要があった (I needed to learn a lot of things before I could get going with this system.) \*

1 2 3 4 5

全く思わない      強く思う

送信

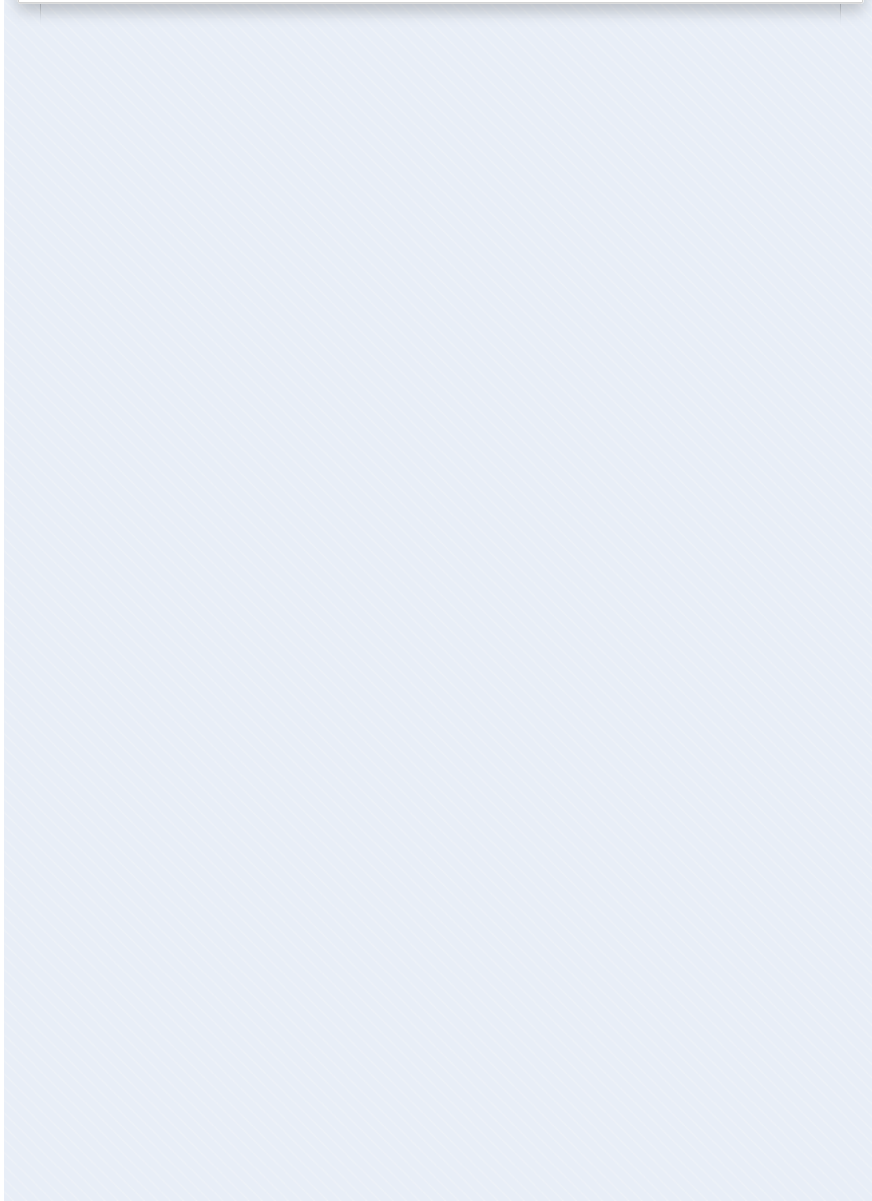
Google フォームでパスワードを送信しないでください。

Powered by



このコンテンツは Google が作成または承認したものではありません。

[不正行為の報告](#) - [利用規約](#) - [追加規約](#)



## 付録E シューティングゲームの評価に使用した事後アンケート用紙

5.1 節にてアプリケーション例として示したにおいてシューティングゲームの評価に使用した事後アンケート用紙を示す。

## E.1 事後アンケート用紙

### 実験に関するアンケート

文責：石井 晃

1. FistPointer を使用した感想を教えてください

--

2. FistPointer による操作について良かった点, 改善すべき点を教えてください

良かった点

--

改善すべき点

--

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。