

小型画面機器に対する
入力インタフェースに関する研究

明比 宏太

電気通信大学大学院情報理工学研究科

博士(工学)の学位申請論文

2019年3月

小型画面機器に対する
入力インタフェースに関する研究

博士論文審査委員会

主査 板倉直明 教授

内海彰 教授

水野統太 准教授

水戸和幸 准教授

山田哲男 准教授

著作権所有者

明比 宏太

2019

Abstract

The research-study outlined in this paper aims at examining the input interface for small devices like smartphones.

This research proposes an input interface with a low degree of freedom using 8 buttons by 3 different input techniques: flick input, eye glance input, and gesture input. By combining input operations multiple times, we aim to increase the number of choices and aim to make an interface that is able to be used in different situations.

This paper consists of 6 chapters, which are summarized as follows:

Chapter 1: As an input interface of small size mobile terminals, we list the conventional input interfaces, their problems and explain the necessity of a new input interface.

Chapter 2: We introduce design for the screen of the input interface that solves the above problems in chapter 1. The proposed design consists of 2 vertical \times 4 horizontal sections that make 8 degrees of freedom and let us choose one section. 64 choices are available by continuously repeating this selection twice. Since the proposed design consists of a few sections, the screen occupancy is low. Further, the design is horizontal, and it is able to use the QWERTY keyboard layout, etc., which is used as a general keyboard layout.

Chapter 3: As a method with low dependence on the touch area, we propose a method of inputting up and down flick operations on 4 buttons. By limiting the number of choices to 8 and repeating the input operation twice in a row, 64 choices can be used. We devised a screen corresponding to this input method and conducted an evaluation experiment focusing on comparison with the conventional methods. As a result of this experiment, the input speed is slightly slower due to the number of inputs, but the correct input rate is higher than the conventional methods. According to these results, the input interface which is designed in this research is suggested.

Chapter 4: an input method without using a hand, we explain about the eye gaze input. We explain basic knowledge about eye movements and introduced conventional eye-gaze input methods. We described the Eye Glance input method which uses reciprocation of quick eye movement as an input operation and the method of estimating eye movement by performing image analysis on the region near an eye. In addition, we proposed a method of dividing the input into two kinds according to the length of time required for input operation as a method of increasing the choice of Eye Glance input and described the result of the evaluation experiment.

Chapter 5: We proposed an input method using a gesture to move the hand while holding the smartphone. The input operation of the proposed method was measured with

an acceleration sensor built in the smartphone and the discrimination method was examined from the characteristics of the obtained waveform. As a result, a high discrimination rate could be obtained for the four types of motion.

Chapter 6: The results obtained in the above study were summarized and the results of this research were evaluated. In addition, future tasks have been discussed.

小型画面機器に対する入力インタフェースに関する研究

明比 宏太

論文概要

本論文では、小型化する情報端末への入力方法として、既存の操作自由度と選択肢数が等しい入力方法と異なり、簡単なジェスチャ動作の組み合わせによって、操作自由度を低くしつつも多数の選択肢数を確保する手法を提案し、その実現について検討した。

近年の技術の発展に伴い、個人が携帯する情報端末は、ノートパソコンのような嵩張るサイズからスマートフォンやタブレットのような比較的小型の端末に変わりつつある。これらのデバイスの多くはネットワークに接続されており、時と場所を問わず、誰でも手軽にインターネットを利用することができる。このような利便性の一方で、入力に関して様々な問題がある。

小さな画面を持つスマートデバイスへの入力はタッチパネルによる操作が一般的である。タッチパネルに表示された入力対象に指で触れることで入力が可能であり、どのような操作が入力として反映されるかが直感的にわかりやすい。しかし、文字入力のような多数の選択肢を要求される場合、小さな画面上に表示された入力画面では入力対象も小さくなってしまい、指の接触位置のわずかなズレが誤入力の原因となる可能性がある。誤入力低減のために入力対象のサイズを大きくする場合、提示できる選択肢数が少なくなってしまう。

本研究では、これらの問題を解決するため、入力対象の大きさへの依存度が低い入力インタフェースを提案する。選択肢数を確保しつつ入力対象の大きさへの依存度を低下させるために、入力対象の数を少なくして、入力動作を連続して複数回行うことを1つの入力とすることを検討した。入力対象の数、すなわち操作自由度を少なくすることで、画面に表示されるボタンの数が減少し、キーボードの画面占有率の低下や誤入力の低減が期待できる。また、操作自由度の減少に伴って選択肢数も減少してしまうが、複数回の入力動作を連続して行うことで、操作自由度の2乗の選択肢数を利用できる。本研究では、このような少操作自由度・多選択肢型入力インタフェースを実現する画面デザインを提案した。また、入力方法としてタッチ操作を用いる手法、視線の移動を入力とする手法、把持したスマートデバイスを動かすことで入力とする手法の3つを提案する。また、これらの手法の妥当性を検証するための実験の結果についても報告する。

本論文は全6章で構成され、各章の要旨は以下の通りである。

第 1 章では、小型の携帯情報端末に対する入力操作として、従来の入力インタフェースやそれらに関する先行研究とその問題点を挙げ、新しい入力インタフェースの必要性を述べる。

第 2 章では、上記の問題点を解決する入力インタフェースの画面デザインを提案する。提案デザインは縦 2×横 4 の区画によって構成され、8 自由度をもつ操作によって 1 つの区画を選ぶ。この選択を 2 回連続で繰り返すことで 64 選択肢を利用できる。提案デザインは少ない区画で構成されるため画面占有率が低いですが、一般的なキーボード配列として利用されている QWERTY 配列を活用することができる。

第 3 章では、タッチ領域への依存度を低減する手法として、4 ボタンに対して上下のフリック操作を入力とする手法を提案する。一度に提示される選択肢を 8 個に限定し、入力動作を 2 回連続で繰り返すことで、64 個の選択肢を利用することができる。この入力手法に対応する画面を考案し、従来手法との比較を中心とした評価実験を行った。実験の結果より、入力回数が多くなるため入力速度は劣るものの、誤入力率は従来手法よりも低く、入力インタフェースとしての有用性が示された。

第 4 章では、タッチ領域への依存度がない入力方法として、視線入力について述べる。眼球運動についての基礎知識の解説と、従来の視線入力方式について紹介する。また、これらを踏まえて提案された、素早い視線移動の往復を入力動作とする Eye Glance 入力方式と、眼球近傍の領域に対して画像解析を行うことで視線移動を推定する手法について記述する。さらに、一度に利用できる選択肢が少ない Eye Glance 入力の選択肢増加の手法として、入力動作にかかる時間の長短によって入力を 2 種類に分ける方法を提案し、評価実験の結果について述べる。長短の入力で選択肢を増加できる可能性が示されたが、入力完了時以外のフィードバックや閾値の再検討が必要であることがわかった。

第 5 章では、スマートフォンを把持する手を動かすことをジェスチャとした入力方法を提案する。第 3 章で提案された少操作自由度・多選択肢型入力インタフェースや第 4 章で提案された Eye Glance 入力インタフェースを参考に、把持したデバイスを斜め方向に小さく傾けて、すぐに元に戻すという動作を入力として用いる。提案手法の入力動作を、スマートフォンに内蔵された加速度センサで計測し、得られた波形の特徴から判別方法を検討した。その結果、4 種類の動作に対して高い判別率を得ることができた。

第 6 章では、上記の研究で得られた結果をまとめ、研究の成果を評価する。また、今後の課題や展望について述べる。

目次

1. 序章	4
1.1. 背景	4
1.2. タッチ入力によるスマートフォンへの入力	5
1.3. タッチ入力によらない入力	5
1.3.1. 視線入力	6
1.3.2. ジェスチャ入力	6
1.4. 本研究の目的	7
1.5. 論文の構成	7
2. 小型画面での入力を考慮した画面デザインの検討	9
2.1. 利用しやすい画面デザインの条件	9
2.1.1. 物理キーボードと同様の文字配列	9
2.1.2. 画面占有率の低減	9
2.1.3. 少操作自由度と多選択肢への対応	10
2.1.4. 選択肢の視認性	10
2.2. 提案画面デザイン	11
3. タッチ入力による提案画面デザインへの入力方法	13
3.1. 小型画面へのタッチ入力に関する問題と先行研究	13
3.2. 提案手法	14
3.3. 実験	16
3.3.1. 実験画面	16
3.3.3. 結果	18
3.3.4. 考察	18
3.4. まとめ	20
4. 視線入力による提案画面デザインへの入力方法	21
4.1. 視線入力とは	21
4.2. 眼球運動	21
4.2.1. サッケード	22
4.2.2. スムースパーシュート	22
4.2.3. 固視微動	22
4.3. 眼球運動計測方法	22
4.4. 先行研究と問題点	23
4.4.1. ユーザの拘束性	23
4.4.2. Midas Touch 問題	24

4.4.3.	入力画面の大きさ	24
4.5.	視線移動を用いた入力方式.....	25
4.5.1.	Eye Gesture 入力	26
4.5.2.	Eye Glance 入力	27
4.6.	交流増幅 EOG を用いた視線移動検出	28
4.6.1.	交流増幅 EOG	28
4.6.2.	Eye Glance 入力の動作検出.....	29
4.6.3.	選択肢増加の検討.....	32
4.7.	EOG による計測の欠点.....	33
4.8.	ビデオカメラを用いた画像解析による視線移動計測.....	33
4.9.	オプティカルフローを用いた視線移動計測	34
4.10.	Eye Glance 入力動作波形の判別アルゴリズム	36
4.11.	瞬目の影響	37
4.12.	提案画面デザインとの対応に関する検討	38
4.12.1.	Eye Glance 入力インタフェースの選択肢増加の検討.....	38
4.12.2.	実験.....	39
4.12.3.	結果.....	42
4.12.4.	考察.....	42
4.13.	64 選択肢の利用に関する検討	44
4.13.1.	実験.....	44
4.13.2.	結果.....	45
4.13.3.	考察.....	46
4.14.	まとめ.....	49
5.	ジェスチャ入力による提案画面デザインへの入力方法.....	50
5.1.	ジェスチャ入力とは.....	50
5.2.	提案手法.....	51
5.2.1.	提案画面デザインとジェスチャ入力の対応.....	51
5.2.2.	動作計測アプリケーションの開発	51
5.3.	実験 1：加速度波形解析	53
5.3.1.	概要.....	53
5.3.2.	結果・考察.....	53
5.4.	実験 2：判別波形解析.....	56
5.4.1.	概要.....	56
5.4.2.	結果・考察.....	57
5.5.	実験 3：リアルタイム判別.....	59
5.5.1.	概要.....	59

5.5.2.	実験・解析方法①.....	59
5.5.3.	結果・考察.....	61
5.5.4.	実験・解析方法②.....	62
5.5.5.	結果・考察.....	64
5.6.	まとめ.....	65
6.	まとめ.....	66
6.1.	本研究の成果概要.....	66
6.2.	3種類の入力について.....	67
6.3.	今後の課題・展望.....	68
	謝辞.....	69
	参考文献.....	70
	関連論文の印刷公表の方法及び時期.....	75
	参考論文の印刷方法及び公表時期.....	76
	著者略歴.....	77

1. 序章

1.1. 背景

近年の技術の発展に伴って、コンピュータの高性能化・低価格化・小型化が進み、ノートパソコンに迫るほどの高性能でありながら、わずか数インチのサイズの小型情報端末(スマートデバイス)や、時計や眼鏡などの装飾品としても使えるようにデザインされたウェアラブル端末が普及している^[1]。特に、携帯電話としての機能を持ちながらも、コンピュータのように様々なアプリケーションを利用し、ネットワークに接続して情報のやり取りができるほどの利便性を有しながらも、手の平に収まるほどの小型端末であるスマートフォンは、2009年に登場して以来、急速に普及が拡大し、2016年には世帯保有率が70%を超えている^[2]。また、図1.1に示すように、スマートフォンなどの携帯端末でインターネットなどのメディアを閲覧したり、SNSでコミュニケーションをとったりする機会が非常に多くなっている^{[3][4]}。このような背景から、スマートフォンなどの小型端末で入力操作を行う機会が増加しており、入力インタフェースに関する研究が盛んに行われている。

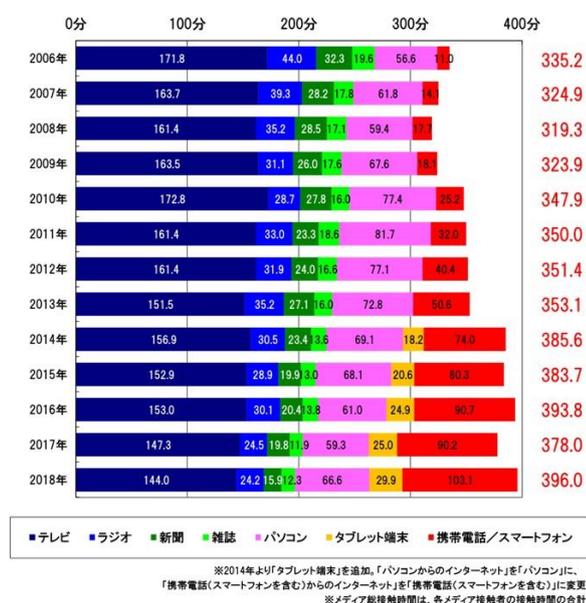


図 1.1 メディア接触時間(1日あたり・週平均)^[3]
Fig. 1.1. Time to view media (per day・average of a week) ^[3]

1.2. タッチ入力によるスマートフォンへの入力

スマートデバイスは入力用の物理ボタンをわずかにしか有しておらず、入力のほとんどはタッチパネルを用いて行われる。タッチやスワイプなどの動作を用いてメニューの選択を行ったりゲージの調整を行ったりすることができ、フィーチャーフォン(一般にガラケーと呼ばれる旧式の携帯電話の総称)で採用されていた物理ボタンによる操作に比べて直感的にわかりやすく、素早く入力操作を行うことができる。文字入力に関しては、画面上にキーボードやテンキーを表示し、これらをタッチすることで入力を行う。

タッチパネル上でのタッチ操作による入力にはいくつかの問題が挙げられている。タッチパネルは情報提示と入力操作を同一画面上で行うため、タッチ領域となるボタンの視認性に難がある。また、文字入力のような多数の選択肢を要求される場合、基本的に選択肢と同じ数の入力対象が必要になるため、入力対象となるボタンが非常に小さくなり、入力しづらくなる。これは **Fat Finger 問題**^[5] と呼ばれ、スマートデバイスをはじめとするタッチパネルの操作性に関する検討事項として議論されている。画面の小型化でもボタンサイズは小さくなり、入力しづらくなる^{[6][7]}。これに対し、入力のしやすさを優先してボタンのサイズを大きくすると、入力キーボードの画面占有率が高くなり、情報提示量が減少する。さらに、表示できるボタン数に限界があり、同時に提示できる選択肢数も減少するため、一般的なタッチ操作では入力できる内容が限定される。また、机上などに設置された物理キーボードは両手の指 10 本を入力に利用できるが、スマートデバイスは手に把持して入力を行うことが多く、画面も小さいため、基本的に把持している手の親指や、把持していない手の人差し指しか利用できない。このように入力に利用できる指の数も異なるため、タッチ操作を用いた入力方法は、PC の物理キーボードに比べて入力速度や正確性、利便性は劣ると考えられる。

1.3. タッチ入力によらない入力

これらの問題に対し、タッチ操作を用いない入力も利用されている。タッチ操作によらない手法として、音声入力が用いられることが多い。しかし、音声入力の入力精度は騒音など周囲の環境に影響を受けやすく、利用可能な状況が限定される。また、周囲に人が多い環境だと音声入力を使うことに抵抗があるユーザーが多い^[8]。そのため、環境に依存しない入力方法が必要となる。

周辺環境の影響を受けにくく、タッチ操作を用いない入力手法として、視線入力とジェスチャ入力が考えられる。どちらも画面に直接触れることなく入力可

能なため、ボタンサイズに影響を受けず、タッチ領域に関する問題を回避できる。

1.3.1. 視線入力

視線入力とは、眼球運動によって計算機に対して入力操作を行うものである。眼球運動を利用する利点として、随意的に素早い動きを行うことができる点や、重度の身体障害者でも眼球の随意運動が可能な場合が多い点などが挙げられる。

視線入力で主に用いられる注視入力は、注視した対象が入力されるという入力方式である。この入力方式では注視位置のわずかなズレが誤入力に直結するため、注視位置の精密な計測が必要である^[9]。そのため、複数のカメラを用いたり、頭部を固定したり、様々な装置を用いて頭部や眼球の位置・向きを正確に測定しなければならない。そのため、頭部と端末の相対的な位置が固定されておらず、入力対象を表示する画面が非常に小さいスマートデバイスでの使用が困難である。また、入力のためにはある程度注視を継続する時間が必要であり、連続での入力に長い時間が必要となる。この入力にかかる時間を短くすると、入力のための注視と走査など入力のためでない注視の区別が困難になる。

1.3.2. ジェスチャ入力

ジェスチャ入力は、本論文ではタッチパネル上で指先を動かすジェスチャによる入力方式ではなく、タッチパネルに直接触れることなく身体を動かして入力を行う方式を指す。入力ジェスチャとして、スマートフォンを把持する手やスマートウォッチを巻いた腕など、スマートデバイスを装着した部位動かすことを入力動作とし、デバイスに内蔵された種々のセンサを利用することで動作を解析し入力判別することが出来れば、画面に触れずとも様々な入力操作が可能となる。また、内蔵されたカメラなどで手の動きを認識できれば、スマートデバイスを装着していない部位のジェスチャも利用できると考えられる。

特にスマートウォッチに関しては、腕を振る動作や腕の回転などのジェスチャを入力操作の1つとして採用しているものがあり、ジェスチャ入力は今後も様々な場面で利用されていくと考えられる。

ジェスチャ入力の難点として、ユーザが行った動作が入力のためのジェスチャなのか、入力のためでない動きなのかの区別が難しい点が挙げられる。区別を明確にするために日常的に行わないような大きな動きをジェスチャとして用いる場合、一度の入力に時間がかかる他、連続での入力が困難になる。そのため、入力として利用するジェスチャは日常的に行わない動作でありながらも小さな動作であることが望ましい。また、ジェスチャを覚えることが難しい点も、ジェ

スチャ入力の難点として挙げられる。基本的に 1 つのジェスチャで行える入力は 1 種類であり，文字入力などの多数の選択肢を要求される場面では，必要なジェスチャも多くなる。そのため，入力内容が関連したジェスチャは動作が類似したものを利用することが必要となる。

1.4. 本研究の目的

上記のように，スマートデバイスで利用できる入力方法にはそれぞれの利点と欠点があり，使用する状況やユーザの好みによって，適した入力方法が異なる。そのため，1 つの入力方法のみしか利用できないインタフェースではなく，ユーザが入力方法を任意のタイミングでシームレスに切り替えて利用できるような入力インタフェースが求められている。そこで本研究では，上記の 3 種類の入力方法を同じ画面デザインで利用できるような小型画面携帯端末向けの入力インタフェースを検討する。これにより，文字入力のような多数の選択肢が必要となるような場面でも快適に入力を行えるような入力インタフェースの実現を目指す。

1.5. 論文の構成

本論文の構成は以下のようになっている。

第 2 章では，小型画面の情報端末向けの入力インタフェースの画面デザインを提案する。画面占有率や操作自由度，キー配列などを考慮し，小型画面を持つ端末上の操作に適切な条件を満たす画面デザインや入力シーケンスを示す。この画面デザインに対応する入力方法を第 3 章～第 5 章で提案する。

第 3 章では，タッチ領域への依存度を低減する手法として，操作自由度を低減した手法を提案する。画面下部に配置された小さな 4 ボタンに対して上下のフリック操作を入力とすることで，ボタン数を抑えながらも 8 個の選択肢を利用できる。これにより，入力画面の占有率と入力の誤判別率の低下が期待できる。また，入力動作を 2 回連続で繰り返すことで，64 個の選択肢の利用を可能にする。この入力手法に対応する画面を考案し，従来手法との比較を中心とした評価実験を行った。

第 4 章では，タッチ領域への依存度がない入力方法として，視線入力について述べる。眼球運動についての基礎知識の解説と，従来の視線入力方式について紹介する。また，これらを踏まえて提案された，素早い視線移動の往復を入力動作とする **Eye Glance** 入力方式と，眼球近傍の領域に対して画像解析を行うことで視線移動を推定する手法について記述する。さらに，一度に利用できる選択肢

が少ない Eye Glance 入力を選択肢増加の手法として、入力動作にかかる時間の長短によって入力を 2 種類に分ける方法を提案し、評価のために行った実験の結果について述べる。

第 5 章では、スマートフォンを把持する手を動かすことをジェスチャとした入力方法を提案する。第 3 章で提案された少操作自由度・多選択肢型入力インタフェースや第 4 章で提案された Eye Glance 入力インタフェースを参考に、把持したデバイスを斜め方向に小さく傾けて、すぐに元に戻すという動作を入力として用いる。この提案動作を、スマートフォンに内蔵された加速度センサを用いて計測し、入力動作とそれ以外を区別できる波形が得られるか調査した。

第 6 章では、上記の研究で得られた結果をまとめ、小型端末向けの入力インタフェースとしての研究の成果を評価する。また、今後の課題や展望について述べる。

2. 小型画面での入力を考慮した画面デザインの検討

第 1 章で述べたように、スマートフォンなどの小型画面をもつ携帯端末の入力には様々な課題がある。特に、文字入力のような多数の選択肢を要求される状況では画面占有率や入力対象の小ささが問題となる。そのため、入力に纏わる課題を解決できるような画面デザインおよび入力方法を検討する必要がある。本章では、文字入力を快適に行うことが可能な入力画面デザインを提案する。

2.1. 利用しやすい画面デザインの条件

1 章で述べたような問題に対応できるような画面デザインの条件として、以下のようなものが挙げられる。

2.1.1. 物理キーボードと同様の文字配列

入力効率のために文字の配置を新規のデザインにした場合、文字配置を覚え直す必要が出てくる。そのため、一般的な物理キーボードと同様の配置にして、文字配置を覚え直す手間を省くことが望ましい。

一般的に物理キーボードでもソフトウェアキーボードでも QWERTY 配列と呼ばれる配列が用いられる。この配列は 1880 年ごろにタイプライター向けに開発されたものであり、当時の年号や使用頻度の高い綴りなどを考慮して設計されたと言われている。そのため、現代の語彙や入力機器を考慮した設計ではなく、人間工学的に使いやすいデザインとは言い難い。これに対し、使いやすさ現在に至るまでに入力効率や使いやすさを考慮した配列として Dvorak 配列や Colemak 配列など様々なキーボード配列が提案されてきたが、QWERTY 配列以上に普及している配列はなく、QWERTY 配列はデファクトスタンダードとして確立されている。そのため、配列を新たに覚えなおす手間を省くために、ソフトウェアキーボードでも QWERTY 配列が用いられるケースが多い。しかし、アルファベットや数字に加えて `backspace` や `enter` などの入力を補助するキーを考慮した場合、キー数が非常に多くなり、画面占有率が高くなる。

2.1.2. 画面占有率の低減

先述のように、文字入力は必要な選択肢数が非常に多く、入力対象既存のキーボードの画面占有率が高くなる。情報閲覧と入力を同じ画面で行う情報端末に

において、ソフトウェアキーボードの表示領域の占有率が高いと、情報表示領域が減少してしまう。そのため、情報表示領域を確保するために、画面占有率の低いキーボードデザインが求められる。

しかし、選択肢数と操作自由度が等しい通常のタッチ入力インタフェースでは、キーボードの画面占有率が低下するとタッチ対象が小さくなり、入力しづらくなってしまう。タッチ対象の大きさに依存しない視線入力でも注視対象が小さくなれば要求される精度が非常に高くなる。ジェスチャ入力では、選択肢数の増加に伴って必要なジェスチャが増加・複雑化してしまう。そのため、画面占有率を低下させた状態で文字入力を実現するには、操作自由度を少なくする必要がある。

2.1.3. 少操作自由度と多選択肢への対応

先述のように、画面占有率を低減した状態で入力を行う際の操作性の向上には、操作自由度を少なくすることが必要だと考えられる。操作自由度を少なくした状態で文字などの多数の選択肢から入力を行う場合、複数回の操作を組み合わせることで対応する。例えば、フリック入力はひらがなの子音が表示されたボタンを指でタッチすることで子音を選択肢、そこから指を離すか上下左右のいずれかの方向にスライドさせてから離すという動作によって母音を選択する。これによって、10個のボタンでひらがな48文字すべてを入力できる。このように、操作自由度を低減しながらも多選択肢に対応できるインタフェースが研究されている。平山らは、親指でスライドした場所にキーボードが生成され、5つのキーに対してタップかフリック操作を行う日本語入力インタフェースを提案した^[10]。

2.1.4. 選択肢の視認性

上記のように操作自由度を低減し、複数回の入力動作によって多数の選択肢に対応する試みが多く行われている。しかし、これらの入力インタフェースでは、キーボード上に選択肢の一部しか表示されていない場合が多い。選択肢の全容が表示されていない場合、入力内容を熟知しているユーザ以外は、どの入力操作にどの入力内容が対応しているのかを覚えなければ使用が難しい。例として、フリック入力は子音のみがキーボード上に表示され、それぞれのボタンにタッチした際に母音を含んだ入力内容が表示される。そのため、日本語を熟知しているユーザにはわかりやすいが、そうでないユーザはどの操作で何が入力できるのかをキーボードから知ることができない。このような問題があるため、選択肢は

すべて視認できる状態で、なおかつ選択する方法が直感的にわかりやすいデザインが望ましい。

2.2. 提案画面デザイン

上記の条件を考慮し、本研究では図 2.1 のような入力画面デザインを提案する。この提案デザインは 2×4 の区画を内包しており、操作自由度は 8 となる。操作自由度が低いため、画面占有率を低くすることが可能であり、情報閲覧を妨げない。また、各区画の中にさらに 2×4 の区画を内包しており、2 回の入力操作を行うことで利用可能な選択肢は 64 となる。さらに、横長な配列を持つ提案デザインは、QWERTY 配列などの物理キーボードと同様の配置を内包することができる。これにより、配列が非常に広く普及しているものを利用して文字入力を行うことができる。



図 2.1 提案画面デザイン

Fig. 2.1. Proposal screen design

このデザインが持つ利点として、物理キーボードと同じキーに加え、**shift** や **ctrl**、予測変換など様々な入力補助キーを利用できるだけの選択肢数が挙げられる。また、操作自由度が 8 と少ないため、多数の自由度を持つ入力方法に比べて必要な注意リソースが少なく済む。これは誤入力の低減につながると考えられる。

このデザインの欠点として、入力を 2 段階に分けることによる入力速度の低下が挙げられる。1 つの入力に対して 2 度の入力動作が必要となるため、単純計算で 2 倍の時間がかかることになる。しかし、先述の通り誤入力の低下を考慮したデザインであり、従来手法に比べて誤入力に伴う入力し直しが少なくなると思われる。また、近年は予測変換による入力補助機能が向上しており、入力に必要な文字数はそれほど多くない。そのため、速度低下に関する問題は重要性

が高くないと考えられる。

次章以降では、この画面デザインに対する入力として、タッチ操作を用いた入力、視線入力、ジェスチャ入力の3つを検討する。

3. タッチ入力による提案画面デザインへの入力方法

第 2 章では、スマートデバイス向けの少操作自由度・多選択肢型入力インタフェースのための画面デザインを提案した。第 3 章では、この画面デザインに対応するような入力方法として、タッチ操作による入力方法を検討する。

3.1. 小型画面へのタッチ入力に関する問題と先行研究

第 1 章で述べたように、スマートフォンにおけるタッチ入力に関しては様々な問題がある。そのため、小型画面のデバイスに対してタッチ領域の位置及び大きさへの依存度や指による操作である点を考慮し、操作性と選択肢を両立するための手法が検討されている。

西村らは、タッチパネル上のタッチ対象の大きさや形状が操作性に与える影響について調査し、エラー率やポインティング時間などから使いやすい大きさと形状について検討した^[11]。井川らは、画面上でタッチされた任意の場所にキーボードを生成し、フリック操作によって入力を行う手法を提案した^[12]。この手法は画面を見ずに入力できるアイズフリーな手法であるが、画面占有率が非常に高く、持ち方によっては入力しづらいという従来手法の欠点を解消できていない。深津らは、最大 3 回のフリック操作の組み合わせを 1 つの入力とするアイズフリーな入力方法を提案した^{[13][14]}。この手法ではタッチ開始点が画面の 3 種類に分かれており、タッチ開始位置への依存度が低い。

片手で操作することを考慮し、スマートフォンを把持する手の親指の可動域に着目した研究も存在する^{[15][16]}。平山らは、片手親指特性を考慮したソフトウェアキーボードの自動生成手法を提案した^[10]。親指で円状のフリック操作を行うことで、親指の位置と可動範囲を考慮したソフトウェアキーボードを画面上に自動的に生成する手法であり、指の長さや持ち方などの個人差に対応できると考えられる。Flit Keyboard^[17]や FlickKey Mini Keyboard^[18]のように、多方向のフリック入力を採用することで、多くの選択肢数を確保しつつもボタンの数を減少させる試みもある。

また、スマートフォンより小型な端末であるスマートウォッチなどの端末は、画面のサイズが極端に小さく、スマートフォンよりもタッチ操作が困難な場合が多い。そのため、単純なタッチ操作に頼らない、様々な工夫を加えた手法が提案されている。画面の小ささを考慮して、画面の端に入力対象を配置し、画面端からの指の動きを入力ジェスチャとした研究は少なくない。久保らは、小型端末のベゼル(画面の枠の部分)間の距離の短さに着目し、ベゼル間のスワイプ動作を

入力とする手法を提案した^[19].

アルファベット入力方法として、物理キーボードと同じ QWERTY 配列のソフトウェアキーボードに対する入力操作に対する検討が多い。Zoomboard^[20]のようにタップ操作で対象を拡大することで入力を行う手法や、SplitBoard^[21]やSwipeboard^[22]のようにキーボードを分割して表示領域を限定する手法が研究されている。近年ではキーボードをタップするのではなく、なぞることで入力を行い、軌跡から入力したい単語を推定する手法も検討されている。下岡らが提案した ShuttleBoard^[23]は子音キーから母音キーになぞる動作を入力とすることで、入力速度の向上とエラー率の低減を図った。

3.2. 提案手法

本研究では、小型画面を持つ情報端末への入力インタフェースとして、横方向に並んだ 4 ボタンに対して上方向または下方向へのフリック操作を 2 回行うことで入力とするという、操作の自由度を少なくしつつも多くの選択肢を利用できる入力インタフェースを提案する。

第 2 章で提案した画面デザインと本項で提案する入力方法の対応を図 3.1 に示す。縦に並んだ黒と白の 2 つの選択肢は、上方向または下方向へのフリック入力を行うことで選択される。これにより、この入力インタフェースは 8 操作自由度を持つ。この入力動作を 2 回繰り返すことで 1 つの入力として扱う。そのため、本研究で提案するこの入力インタフェースは、操作方法に関しては上下のフリックという 2 種類しかなく、タッチするボタンも 4 種類と、操作自由度は非常に少ないが、最終的に入力できる選択肢数は 64 個となる。この選択肢数は、日本語の平仮名 50 音に加え、Backspace や Enter、予測変換など、様々な補助キーを選択肢に含めるのに十分な選択肢であり、スマートデバイスでの文字入力にも利用できると考えられる。

一般的なソフトウェアキーボードは、タッチしたボタンが入力される仕様であり、操作自由度と選択肢数が等しいため、選択肢数の増加に伴って 1 つ 1 つのボタンのサイズが小さくなり、入力しづらくなってしまふ。しかし、本研究で提案する入力インタフェースであれば、少ないボタンと入力動作の組み合わせで、入力しやすさと選択肢数を両立している。



図 3.1 提案画面デザインとの対応

Fig. 3.1. Correspondence between touch input and suggested design

入力のシーケンスは次のようになっている。入力例を図 3.2 に示す。

- ① 入力したい文字を含むボタンに対して上下方向のフリック操作を行う。このとき、黒い部分を入力する場合は上方向へ、白い部分は下方向へフリック操作を行う。
- ② 対応する部分が拡大表示される。
- ③ 入力したい文字があるボタンでフリック操作を行う。このとき、入力したい文字が黒であれば上方向へのフリック操作を、白であれば下方向へのフリック操作を行う。
- ④ 入力が完了し、該当する部分が入力される。



図 3.2 入力例

Fig. 3.2. Example of input

3.3. 実験

提案インターフェースの評価を目的とした実験の結果を報告する。

スマートフォンの画面をタッチして文字入力を行う際に、タッチ領域の大きさが変化することで文字入力速度や誤入力率にどのような影響があるかを明らかにする。

被験者は 20 代の成人男性 5 名とした。本実験の実施に際し、被験者には実験の手法や目的について十分な説明を行い、実験への協力、および被験者を特定できない状態での実験データの公開について同意を得たうえで実施した。

3.3.1. 実験画面

使用する実験画面を図 3.3 に、提案画面デザイン部分を図 3.4 に示す。本実験では入力に使用する文字として、アルファベットおよび数字を想定し、提案インターフェースの文字の配列に際し、物理キーボードで一般的に用いられる QWERTY 配列を参考にした。

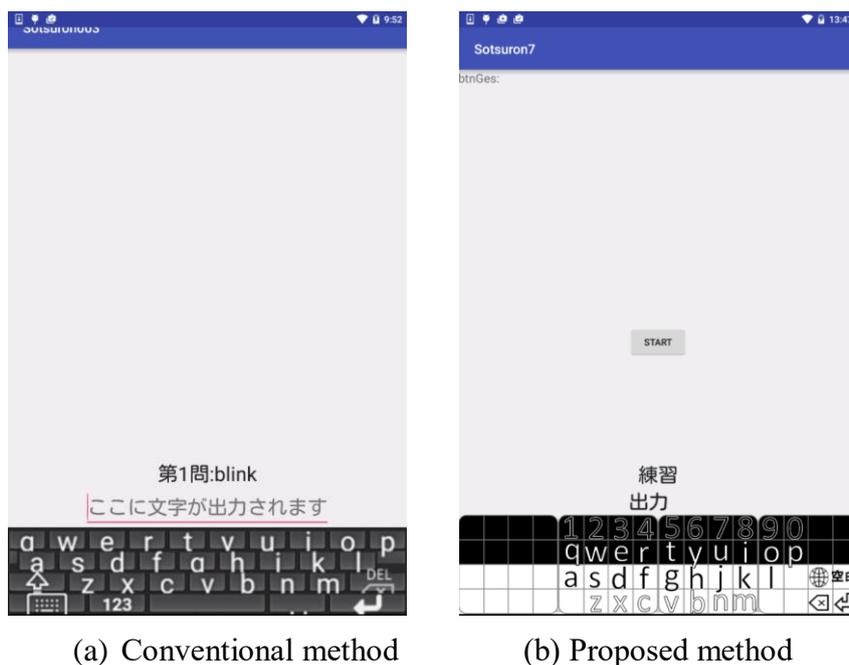


図 3.3 実験画面

Fig. 3.3. Experiment screen



図 3.4 入力画面

Fig. 3.4. Input screen

3.3.2. 実験方法

入力実験用スマートフォンとして、Nexus6 を使用した。従来方式として Android SDK のサンプルの QWERTY 配列ソフトウェアキーボードを用いた。この方式では、操作自由度は選択肢数と等しい。

ソフトウェアキーボードの画面表示面積は 4.0cm^2 とし、ディスプレイ下部に表示した。被験者は椅子に座り、普段通りにスマートフォンを把持した。この際、端末把持や入力の指などは自由にしてよいと指示した。

初めに、実験に用いるスマートフォンの把持や操作に慣れさせるために入力

練習を本実験の開始前に行った。被験者は画面下部に表示された画面に対して任意の入力操作を数回行った。その後、実験開始ボタンを押して本実験を開始した。被験者は入力領域の上に表示された文字列を入力した。文字列は3~6文字の英単語200種類からランダムに表示した。

入力した文字列が指示した文字列と一致していた場合に次の問題に進んだ。問題は1試行あたり10問とし、提案手法について10試行を行った。試行間には任意時間の休憩時間を設けた。全試行終了後に被験者はアンケートでインタフェースの使用感に対する評価を行った。

3.3.3. 結果

表3.1に全被験者の1分間あたりの入力文字数と誤入力率を示す。誤入力率は、総入力文字数に対する誤入力の割合とした。従来手法については、先行研究^[24]で同じ画面サイズで実験を行った際のデータを用いた。なお、従来手法は3試行分とした。

提案手法の入力文字数はすべての被験者において従来手法より少ない結果となった。誤入力率に関しては、すべての被験者において従来手法より提案手法の方が低くなった。

表 3.1 実験結果

Table. 3.1. Result of experiment

被験者	従来手法 平均	A	B	C	D	E	Ave
入力文字 数/min	40.9	26.8	24.3	29.4	25.3	21.2	25.4
誤入力率 (%)	23.0	4.7	10.1	6.8	21.2	16.7	11.9

3.3.4. 考察

まず、文字入力速度について考察する。第2章で述べたように、提案手法では1文字の入力に2回のフリック入力を行う必要があり、1度のタッチで入力可能な従来手法に比べると入力に時間がかかるため、文字入力速度は劣ることが予

想されていた。実際に得られた結果から、入力速度は劣っていることが示された。しかし、入力シーケンス数が 2 倍になったにも関わらず、従来手法に比べて提案手法の 1 分あたりの入力文字数は 60~70%程度となった。これは、操作自由度の低減が誤入力数の低下につながり、文字の入力し直しが少なくなったためだと考えられる。実際に誤入力率を調べたところ、すべての被験者で提案手法のほうが優れた結果となった。従来手法に比べてボタンを大きくしたことが大きな要因の 1 つであると考えられる。ボタンの大きさについて、操作自由度と選択肢数が等しい従来手法では、 4.0cm^2 という狭い領域ではボタンのサイズが指の大きさに対してとても小さく、誤入力が頻発した。これに対し、提案方式はボタンが 4 つしかなく、従来手法に比べて非常に大きくなる。そのため、意図しないボタンを押すことが少なく、入力に必要な注意リソースも減るため、誤入力が減少したと考えられる。これらのことから、従来手法では入力困難なほどの領域しかない状態でも、提案手法であれば低い誤入力率で入力可能であると考えられる。ただし、入力の際に配置に慣れないため、入力に慣れず、被験者 D のように誤入力の変化が少ない場合も見られた。そのため、今後は学習効果を調べるために回数を増やして実験を行う必要がある。

文字入力速度について、本研究と同様に操作自由度の低減を試みた先行研究と比較を行った。その結果を表 3.2 に示す。

表 3.2 先行研究との比較

Table 3.2. Comparison with conventional studies

研究	ボタン数	自由度	選択肢数	被験者数	cpm
Chen ら[20]	1	9(3)	28	16	19.58
平山ら[13]	5	10	50	8	18.39
提案手法	4	8	64	5	25.40

本研究の手法は、先行研究と比較して最も低い自由度でありながら選択肢数は最多であり、文字入力速度も最速となった。このことから、提案手法は少操作自由度の入力インタフェースの有用性が示唆された。

次に、誤入力率について考察する。

これらの結果から、提案手法は従来のソフトウェアキーボードと比較して、入力速度は劣るものの、小さい画面でも低い誤入力率で運用でき、文字入力に十分な選択肢を持つインタフェースとなる可能性が示唆された。

実験終了後のユーザビリティに関するアンケートで、下方向へのフリック入力が画面下部のメニューと干渉するという意見が得られた。メニューとの干渉

を防ぐために、一律で画面下部に入力画面を表示させず、文字表示領域に隣接させることで対応できると考えられる。また、縦方向ではなく横方向のフリック入力であれば下部のメニューに干渉することがないので、箱田らの研究^[25]を参考に、提案手法の画面デザインを画面端に縦に配置し、4つのボタンに対して左右方向のフリック入力を行うように変更することでも対応できる可能性がある。

3.4. まとめ

第3章では、小型画面を持つ携帯情報端末に対して入力しやすく画面占有率の低い少操作自由度多選択肢型入力インタフェースを提案した。また、従来手法の比較実験を行い、本手法の有効性を検証した。

しかし、タッチ操作を用いる以上、**Fat Finger** 問題に起因する操作性や誤入力に関する課題が付きまとう。指の乾燥が原因でタッチパネルが反応しないなど、タッチ操作を用いた入力が適切でない状況も考えられる。

そこで、次章以降ではタッチ操作によらない入力方法を検討する。

4. 視線入力による提案画面デザインへの入力方法

第3章では、タッチ操作を用いながらもタッチ領域の大きさに依存しにくい少操作自由度・多選択肢型インタフェースを提案した。また、その評価実験を行い、有効性が示唆された。しかし、タッチ操作を用いる場合の問題点は解消しきれていない。そこで、タッチ操作によらない入力方法として、視線入力を用いた入力インタフェースを提案する。

4.1. 視線入力とは

視線入力とは、眼球運動を利用してPCやスマートデバイスなどの計算機に対して入力操作を行う手法である。眼球運動を利用する利点として、随意的に素早い動きを行うことができる点や、重度の身体障害者でも眼球の随意運動が可能な場合が多い点などが挙げられる。

入力インタフェースとして一般的に普及しているマウスやキーボードがユーザの手の使用を前提として設計されているのに対し、視線入力は眼球の運動のみで入力操作が可能のため、手の運動機能に障害を持つ人や手を入力に利用できない状況でも利用できる。従来は重度肢体不自由者のための入力として研究されていた^{[26][27]}が、近年では技術の発達に伴い、肢体不自由者以外でも利用できるような手法として、タッチ操作が困難なウェアラブル端末などへの利用が検討されている。

4.2. 眼球運動

人間は、網膜上に投影された画像情報（網膜像）をもとに高度な視覚情報処理を行うことで、外界の状況の認知、文字・画像の認識等ができる。しかし、そのような高度な視覚情報処理ができるのは中心窩と呼ばれる網膜中心部のごく狭い部分に限られているため、人間が視覚情報処理を行うためには、文字や画像などの、より興味のある対象に対して自ら網膜の中心窩を移動させる必要がある。また、網膜像が静止した状態では像が消失し認知を行えなくなるため、対象に対して中心窩を移動させた後も、微少に眼球を振動させて静止網膜像を作り出すことを防ぐ。このような目的で、人間が随意的または不随意的に眼球を移動させる運動を眼球運動と呼ぶ。眼球運動は、外眼筋による眼球の回転運動であり、その目的及び運動の特性から以下の3種類に分類される^{[28][29]}。

4.2.1. サッケード

サッケードは、視覚情報の処理対象に対して随意的に素早く視線を移動させ、網膜の中心窩をその方向に合わせるための眼球運動である。また、サッケードの速度は極めて速く、サッケード中の流れた外界像に対しては視覚情報の獲得及び処理は行われず、視覚機能が著しく抑制される。そのため、サッケード中に移動方向を修正することはできないとされており、目標の位置へと視線移動を行うとき、何度かのサッケードを繰り返す場合がある。この傾向は、視線移動を行うべき距離（＝眼球回転角度）が大きくなるにつれて顕著になる。また、最初のサッケードが終了してから次のサッケード（補正サッケード）を開始するまでには、150～500ms程度の注視が必要であるとされている。また、このような、当初のサッケード計画が不正確であるために起こるとされる無意識的な注視が発生する割合は、最初の視線移動を行うべき距離（＝眼球回転角）が大きくなるにつれて高くなる。

4.2.2. スムースパーシュート

スムースパーシュートは、ゆっくりと移動する処理対象に対して視線を追従させる眼球運動である。サッケードの速度が300deg/sec～500deg/sec程度であるのに対して、スムースパーシュートは30deg/sec以下の低速な運動である。

4.2.3. 固視微動

固視微動は、処理対象に対して注視を行うときに静止網膜像を作り出すことを防ぐために自らが眼球を微小に振動させる眼球運動である。固視微動はさらに、微小な振動成分である Tremor、注視点のゆるやかなずれである Drift、Drift によるずれを補正して再び注視点を対象へと戻すための Flick に分類される。Flick はその特徴からマイクロサッケードとも呼ばれる。

4.3. 眼球運動計測方法

上記の眼球運動を計測する方法として、以下の3つが挙げられる。

●強膜反射法

眼球に赤外線などを照射して得られる強膜と虹彩および角膜の反射率の違いから境界を検出し、眼球運動を計測する手法を強膜反射法と呼ぶ。

●角膜反射法

眼球に赤外線などを照射し、角膜上の反射点位置の変化や角膜の内外の反射光の組み合わせを用いて眼球運動を計測する手法を角膜反射法と呼ぶ。最も一般的に用いられている手法で、非接触でも計測が可能である。

●EOG 法

眼球の角膜と網膜の電位差を利用して眼球運動を計測する手法を眼電図法と呼ぶ^[30]。眼球の角膜側を+、網膜側を-とする 10~30 μ V 程度の電位を持つ。この特徴を利用して、眼球近傍に電極を貼付し、角膜と網膜の電位の差を計測することで眼球運動を記録する。

4.4. 先行研究と問題点

視線入力に関する研究は、眼球運動の計測から入力方法まで、様々な手法が長年にわたって研究されている。

画像解析による視線計測を用いた先行研究では、瞳孔の相対位置を用いた入力装置^[31]や視線によるマウス操作補助システム^[32]、黒目中心検出による入力システム^[33]など、様々な研究が報告されている。

一方で、EOG(眼電図)による視線計測を用いた手法として、ALS コミュニケーション支援装置^[34]や選択支援装置^[35]、車いす操作装置^[36]など、多くの研究が報告されている。

また、近年ではマウスやキーボードによる入力が難しい小型デバイスへの入力方式として注目されており、HMD のような頭部装着型インタフェースを用いた手法^[37]^[39]や、眼鏡型のデバイスに電極を装着して眼球運動を計測する手法^[40]^[41]が研究されている。

これら従来の手法の問題点として、以下のようなものが挙げられる。

4.4.1. ユーザの拘束性

眼球運動の測定では眼球の回転角度を計測するため、ユーザの頭部と入力画面の相対的な位置が変化してしまうと、測定した眼球回転角度から計算した入力画面上の視線位置も同時に変化してしまう。そのため、ユーザの頭部を顎台などで固定することでユーザの頭部と入力画面の位置を固定する方法が頻繁に用いられるが、ユーザに大きな負担を強いることは明らかである (図 4.1 参照)。身体を動かすことができない重度肢体不自由者でも、常に同じ位置に頭部が存在し続けるとは言えない。近年では複数のカメラを用いることで上半身や頭部の動きを計測し、頭部の動きを許容可能にしたインタフェースも提案されているが、通常的环境ではカメラが 1 台しかなく、視線計測には専用の装置が必要

になる。



図 4.1 従来手法の実験の様子

Fig. 4.1. A state of the experiment (conventional method)

4.4.2. Midas Touch 問題

視線入力の入力手法として、一般的に注視入力を用いられる。この入力方式では、GUI上のボタンなど、入力したい対象を探索した後で意識的な注視を行うことで、その指標が選択される方式であった。しかし、この方式では入力のための意識的な注視に加えて、入力したい対象を探索する過程における無意識的な注視でも、入力が行われてしまうという問題点がある。これは、触ったものが全て金になるような魔法をかけられたというギリシャ神話に登場する Midas 王になぞらえて、Midas Touch Problem^{[42]-[44]}と呼ばれている。この探索における注視は、視線移動に伴うサッケード中の視覚抑制で、一定時間の注視が必要となるため、発生自体を抑制することができない。そのため、インタフェースを設計する上で、この二つの注視を区別する必要があるが、これらの眼球運動における特徴はほぼ同じであるため、測定での区別は非常に難しい。そのため、入力との区別をつけるために入力に必要な注視時間を長く設定するのだが、一点を注視し続けるのは集中力が必要であり、入力にかかる時間も長くなる。その結果、入力速度やユーザビリティの低下を招き、インタフェースとして低性能になってしまう。

4.4.3. 入力画面の大きさ

前述したように注視入力方式では、入力したい対象となる一点を注視し続けるなければならない。しかし、固視微動などによって眼球は常にわずかに動いている。そのため、微少な動きを許容できるように、GUI上の指標領域を大きくとる必要がある。しかし、指標を大きくする場合、選択肢数に応じて入力画面を大き

くしたり選択肢数を削減して領域を確保したりしなければならず、ウェアラブル端末など小型のデバイスには向かないシステムとなってしまう。逆に小型デバイス向けに入力指標を小さくした場合、より精密な注視点計測精度が要求されてしまう。そのため、スマートデバイスのような小型の端末向けの視線入力に関する検討は多くない。

4.5. 視線移動を用いた入力方式

従来の視線入力は上記の通り、注視を用いた入力方式が主流である。一方で、注視ではなく眼球の移動を利用する方向入力がある。注視入力は特定の条件下では精度が高く直感的な入力が可能であるが、頭部の動きなど、実際に使用する場合に発生する問題への対処が難しい。これに対し、方向入力は大きなサッケードを検出し、その方向を識別することで入力を判別する。そのため、眼球の運動方向がわかれば入力が可能であるが、視線の移動方向や移動量が一定になりづらく、判別精度が十分でないだけでなく、利用可能な選択肢数も限られるという問題がある。しかし、注視入力と異なり、端末の画面の大きさに影響されずに入力を行うことができるため、スマートデバイスのような小型端末の入力手法として有用だと考えられる。そのため、視線の移動を組み合わせるジェスチャ入力が研究されている^{[45]-[47]}。

4.5.1. Eye Gesture 入力

先行研究^[48]で、斜め方向の視線移動の組み合わせを入力に用いる「Eye Gesture 入力インタフェース」が提案された。従来の注視入力と異なり、Eye Gesture 入力インタフェースでは斜め方向への視線移動(左上, 左下, 右上, 右下の4種類)を入力に用いる。この4種類の動作を複数回行うことで入力可能な選択肢を増加させている。この手法では入力のための視線移動の方向のみが分かればよく、移動量に精度を必要としない。図 4.2 に Eye Gesture 入力インタフェースの画面デザインを示す。

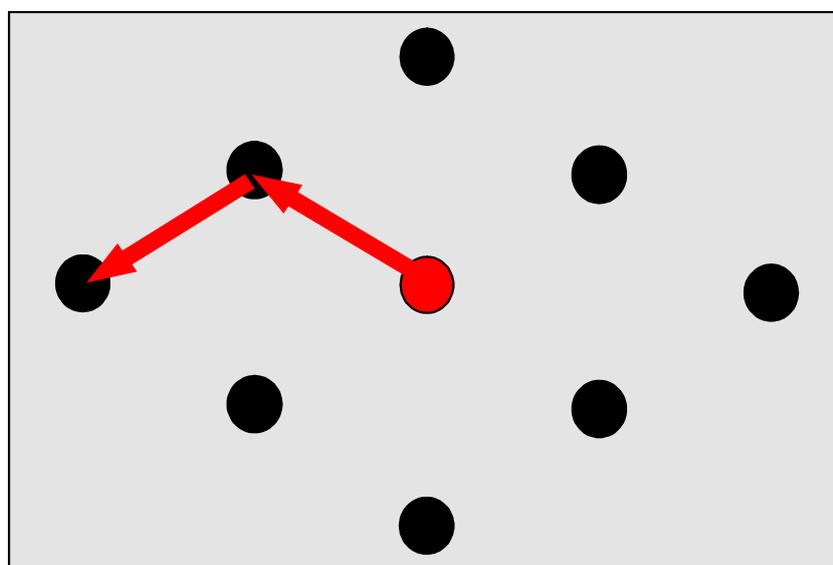


図 4.2 Eye Gesture 入力インタフェースの入力画面

Fig. 4.2. Eye Gesture input interface input screen

この入力画面では2つの斜め方向視線移動の組み合わせを1つの入力としており、入力可能な選択肢は12個となる。この入力手法の眼球運動を EOG によって計測する実験を行ったところ、リアルタイムの判別実験で95%を超える高い判別率を得られた。

高い判別でありながら、注視入力のような制限された環境下でなくても利用でき、ユーザの拘束性やシステムの費用問題が大きく軽減された。

4.5.2. Eye Glance 入力

先行研究^[48]において提案された Eye Gesture 入力インタフェースでは、複数回の斜め方向視線移動の組合せによって多選択のインタフェースを実現していた。しかし、斜め方向の視線移動であればどのような組合せでも入力と判別されてしまうため、入力のためでない通常の視線移動と Eye Gesture 入力のための視線移動の区別が困難であった^[49]。そのため、Eye Gesture 入力動作の前に Wink などによって入力開始の宣言を行う必要があった。

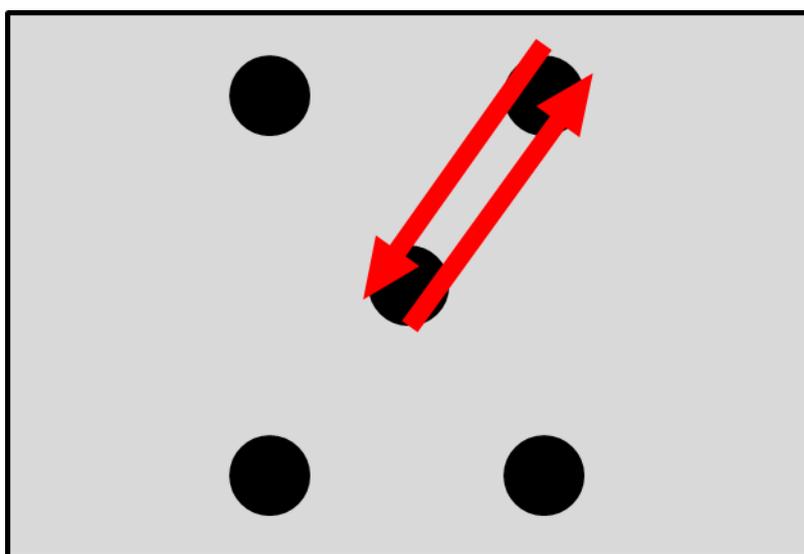


図 4.3 Eye Glance 入力インタフェースの入力画面

Fig. 4.3. Input screen of Eye Glance input interface

そこで、このような Eye Gesture 入力インタフェースが持つ課題を克服するため、新しい手法として Eye Glance 入力インタフェース^[50]が提案された。図 4.3 の入力画面デザインに示す矢印のように、中央の指標を起点として画面隅への素早い斜め方向視線移動の往復を入力動作とする。Eye Gesture 入力での入力条件を斜め方向視線移動の往復に限定することで、Wink などの宣言なしに入力のための視線移動とそれ以外の視線移動の区別が可能となる。

4.6. 交流増幅 EOG を用いた視線移動検出

4.6.1. 交流増幅 EOG

眼球は角膜側を+，網膜側を-とする 10~30mV 程度の角膜-網膜電位 (corneoretinal standing potential) を持っている。正中線にある視対象を注視しているときには，角膜側と網膜側の電位は相殺され，左右目尻の外側に貼り付けられた電極間に電位差は生じない。また，眼球が右を向くと右側の電極が+，左側の電極が-に，逆に左側を向くと左側の電極が+，右側の電極が-の電位となる。水平方向に関しては左右 30 度程度までで，1 度当たり約 15 μ V の電位を検出することができる。このように，EOG の発生原理は角膜-網膜電位の変動によるものであり，外眼筋の筋電図とは異なるものである。

眼電図の測定に用いる電極は眼の周辺に貼付するため，被験者に違和感を生じさせない大きさの小型表面皮膚電極が用いられる。先行研究^[50]では電極と電極糊との間に発生する分極電位を少なくするために銀-塩化銀電極を用いていた。図 4.4 に電極貼付位置を示す。

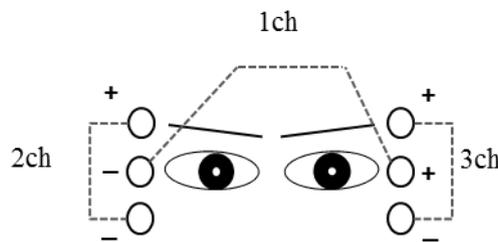


図 4.4 電極貼付位置

Fig. 4.4. Electrode attachment position

眼球運動の測定に眼電図を使う利点としては，計測が容易である，装置が安価である，簡易なキャリブレーションができる，光の照射がないため疲労が少ない等が挙げられる。欠点としては，電極を直接皮膚に貼り付けなければならない点が挙げられる。

眼電図の測定には一般的に直流増幅が用いられていたが，電極皮膚間の分極によって直流成分が時間変化によって変動するドリフト現象により，長時間使用した場合に注視位置が正しく検出できないことが大きな問題点となっていた^[51]。そこで，先行研究^[52]において，低域周波数成分を取り除いて EOG を交流増幅する手法が提案された。交流増幅の特徴として，時定数の影響によって電位波形が常に基線へ戻るため，ドリフト現象の抑制が可能となる。

図 4.5 に示すように眼電図の各時点の電位から 1 つ前の電位を引いた差分値

を求めることで、素早い視線移動が強調され、それ以外の動きは抑えられる。このような手法で得られた波形に対して、フィルタを用いてノイズを除去し、閾値を設けることで視線移動を簡易に検出できる。さらに、視線移動と判別されたゼロクロス波形の積分値から視線移動量を求めることができる。このように交流増幅 EOG を用いて眼球運動の計測が可能となる。

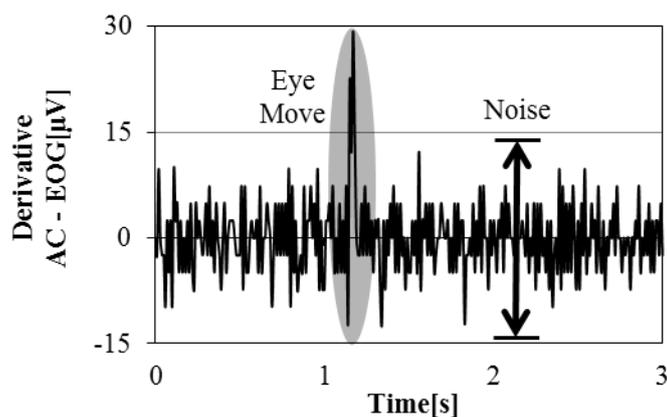


図 4.5 EOG の差分値

Fig. 4.5. Differential waveform of EOG

4.6.2. Eye Glance 入力 of 動作検出

Eye Glance 入力は入力画面の四隅のいずれかを一瞬だけ見る動作で発生する斜め方向の視線移動の往復を入力動作として用いる。先行研究^[50]ではこの入力動作を EOG による計測で検出した。

図 4.6 に右上方向へ Eye Glance の入力動作を行った時の理想的な差分眼電図例を示す。この差分眼電図は水平方向においてプラスが左方向、マイナスが右方向への視線移動を表し、垂直方向においてはプラスが上方向、マイナスが下方向の視線移動を表す。a 点付近が右上方向、d 点付近が中央(左下方向)への視線移動により発生した波形である。

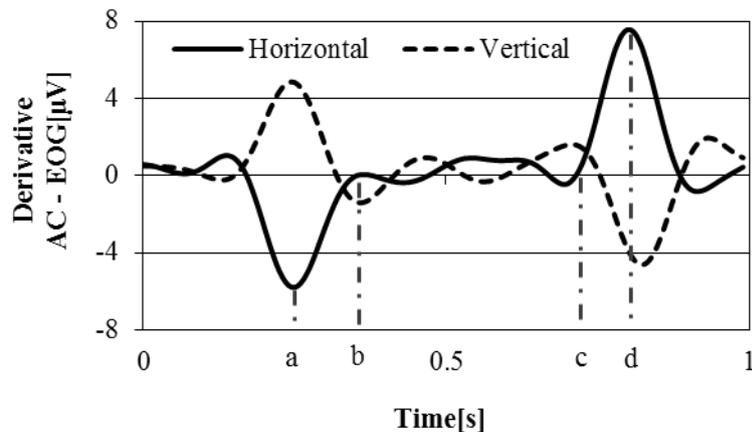


図 4.6 波形例

Fig. 4.6. Example of a waveform

EOG から得られる波形は，Eye Glance 入力動作以外にも，画面を見る際の通常の視線移動やまばたきなどが混在するため，Eye Glance 入力動作のみを抽出する処理が必要である．Eye Glance 時の交流 EOG の差分値波形において，次の 3 つの特徴が得られる．

- ① 水平方向について，逆向きの視線移動波形が 2 回連続で発生する．
- ② 素早い視線移動の往復であるため，2 回の視線移動波形の間に短い時間が存在する．
- ③ 斜め方向の視線移動であるため，垂直方向についても水平方向の波形と同じタイミングで視線移動波形が発生する．

これらの特徴を判別に用いることで，様々な情報が混在した波形から Eye Glance 入力動作の波形を抽出できる．ただし，視線移動時の波形の大きさや特徴②の時間は個人差が大きいため，事前にキャリブレーションを行って閾値を決定する必要がある．先行研究^[50]では，キャリブレーションとして右上と左下に 1 回ずつ Eye Glance を行い，閾値を設定している．

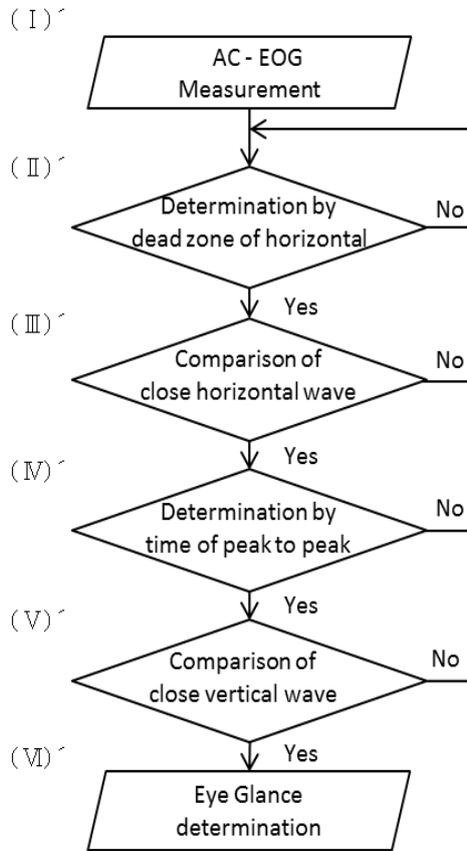


図 4.7 Eye Glance 入力の解析アルゴリズム
 Fig. 4.7. Determination algorithm of Eye Glance

図 4.7 に交流 EOG を用いた Eye Glance 入力判別のアルゴリズムを示す。

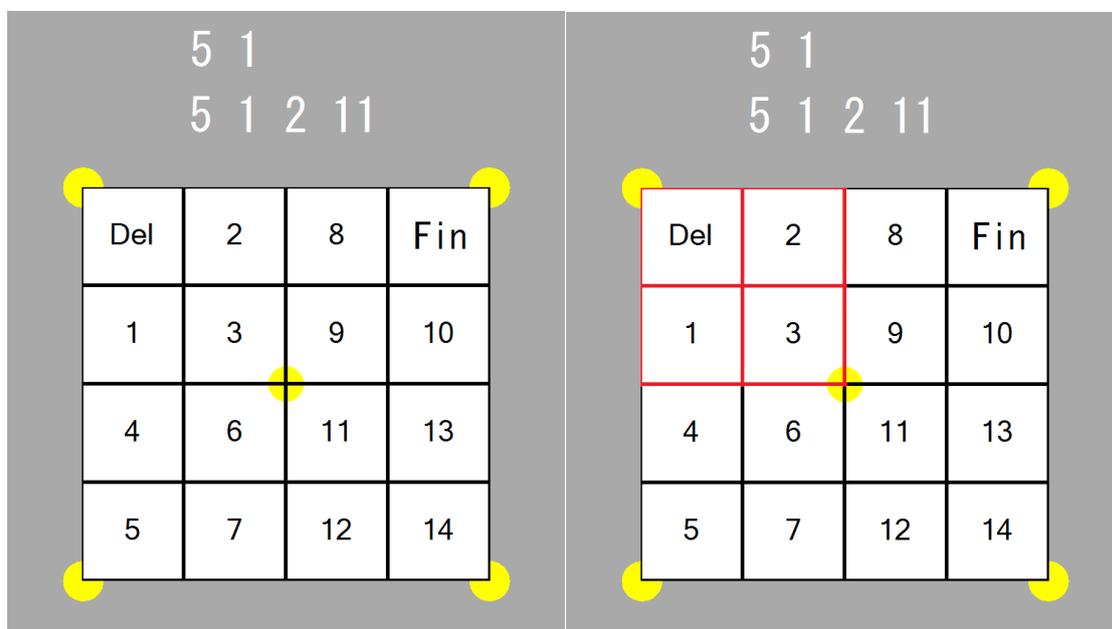
まず(I)において、視線移動の方向の判別を行うため、水平、垂直方向の交流 EOG の差分値を取得する。(II)において、水平差分値が閾値を超えるものが 2 回発生しているかを探索する。(III)において、特徴①の判定を行うため、得られた 2 つの波形が逆向きであるかを調べる。(IV)において、特徴②の判定を行うため、得られた 2 の波形のピーク間の時間がキャリブレーションで得られた時間内であるかを調べる。(V)では特徴③の判定を行うため、垂直方向の波形を確認し、水平成分のピーク時と同じタイミングの垂直成分の波形の凹凸を調べる。(VI)において、瞬目の波形であるかを確認する。瞬目はまぶたを上下に動かす往復運動であり、波形の形状が Eye Glance 入力動作のものと類似している。Eye Glance 入力動作になく、瞬目にのみ見られる特徴として、閾値を超える波形のピーク間に、ノイズなどの小さいピークが存在しないことが挙げられる。そのため、垂直成分について小さなピークの有無の評価と、垂直方向のピークの高さとキャリブレーション時のピークとの比較を行ってまばたきを判別する。(I)~(VI)すべての

条件を満たした場合に入力と判別する。

また、先行研究で述べられていた、視線移動方向の左右でピーク値に差がある被験者に対処するため、左右別で閾値を設定し、水平と垂直のピークのズレに関しては、キャリブレーションでズレの時間を計測し、入力判別に反映させる。

4.6.3. 選択肢増加の検討

Eye Glance 入力は、斜め方向の視線移動の往復動作を入力として扱うものであり、詳細な移動量に依存しない入力方法である。そのため、一度の入力で提示できる選択肢が4つしかない。web ページ閲覧中の「進む」や「戻る」など、選択肢数の少ない入力場面であれば問題ないが、文字入力など多数の選択肢が要求される場面での利用は難しい。しかし、1回の Eye Glance 入力は1秒弱という短時間で行えるため、連続で複数回の視線移動の往復を行うことを1つの入力とすることができる。先行研究^[53]では2回の Eye Glance を1つの入力として扱うことで、16(4×4)個の選択肢を検討した。図 4.8 のように縦横ともに4つずつの選択肢を配置して実験を行った結果、平均判別率は91.5%となり、1分あたりの平均入力文字数は15.2文字となった。これにより、Eye Glance 入力の選択肢増加の可能性が示唆された。



(a) Normal (b) Input detected (Upper Left)

図 4.8 実験画面

Fig. 4.8. Experiment screen

4.7. EOG による計測の欠点

これまで述べた通り, 先行研究では交流増幅 EOG を用いて眼球運動を計測し, 視線移動方向を推定することで **Eye Glance** 入力を実現した. 入力手法としては精度も十分で, 一般的な性能の PC を用いてもリアルタイムで判別結果をフィードバックできるほど計算負荷も軽い. また, 先行研究では, 信号増幅のための生体アンプと信号取込のための A/D ボードの役割を 1 つに集約したデバイスを開発し, 計測装置の小型化・低価格化を実現した^[54].

しかし, EOG による計測手法では電解ペーストを用いて電極をこめかみ付近の皮膚に貼付しなければならない, 実用性が高いとは言えない. また, アンプなどの専用機器も必要となる. スマートデバイスにおける入力への対応など, より汎用性の高いインタフェースを実現するには, 特殊な機器を使用せず, 身体への接触がない計測手法を使用する必要がある.

4.8. ビデオカメラを用いた画像解析による視線移動計測

前述の問題点を解決するための方法として画像解析による視線移動計測が検討された. これまでも画像解析によって眼球運動を計測する試みは数多く行われてきたが, 注視入力の実現には非常に高い計測精度が要求されるため, 頭部の拘束や高度な計算処理, 高性能カメラの利用など, ユーザや計算機に対して高い負荷をかけたり, 計測に特殊な装置が必要になったりしてしまう.

しかし, これまでに述べた **Eye Glance** 入力は, 一般的な注視入力と異なり, 注視位置ではなく画面隅を一瞬見る素早い視線移動を入力として用いる. そのため, 頭部の固定や頭部モデルの推定など, 複雑な処理を行わなくても, 視線の移動方向とある程度の大きさが計測できれば入力動作を判別できると考えられる. そこで, 高速カメラのような高価な機材ではなく, web カメラや PC 内蔵カメラなど, 情報端末に簡単に接続できるビデオカメラを用いて視線移動を計測する, 非接触な **Eye Glance** 入力インタフェースが提案された^{[55][56]}.

4.9. オプティカルフローを用いた視線移動計測

画像解析を用いた視線計測は、一般的に角膜反射法などを用いる。これは、注視位置を厳密に計測するためである。

これに対し、本研究の手法では、注視位置ではなく視線の移動方向を計測するため、画像上の黒目の移動を計測できるような方法が望ましい。そこで、視線移動計測にはオプティカルフローを用いる。オプティカルフローとは、時間的に連続した 2 枚の画像を比較し、画素の濃淡の変化から画像中の物体の移動を推定し、ベクトルで表現するものである。眼球近傍の画像から、黒目と白目の画素の差を利用し、オプティカルフローを用いることで眼球運動を計測できると考えられる。

本研究では、眼球のわずかな動きを推定するために、密なオプティカルフローを計測できる Gunnar Farneback のアルゴリズムに基づくライブラリ^[57](`calcOpticalFlowFarneback`)を用いる。図 4.9 に示すように顔検出の座標を元に眼球位置を推定し、両目が入る程度の矩形領域を計測領域とする。

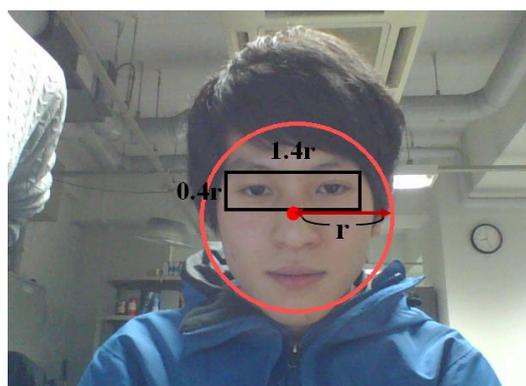
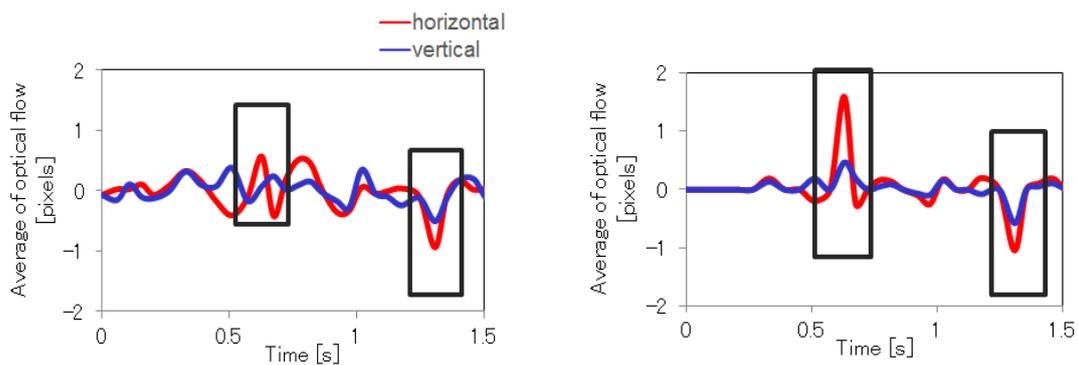


図 4.9 計測領域

Fig. 4.9. Measuring area

領域内に 225 点(15×15)の計測点を配置し、ベクトルを計測する。各点で得られたベクトルを平均化することで 1 つの評価値として扱う。ただし、眼球近傍のみという狭い計測領域でも黒目が占める割合は少なく、得られたベクトルをすべて平均化した場合、顔の動きなどのような眼球運動以外のベクトルがノイズとして多く含まれてしまう。図 4.10(a)に視線移動で得られたベクトルの平均値の波形を示す。四角で囲んだ部分で視線移動が発生しているが、それ以外の部分との区別が難しい状態となっている。そこで、眼球運動とそれ以外の動きの速度差に着目し、得られたベクトルの上位数%を平均化することでノイズの低減を試みた。図 4.10(b)に平均化範囲を縮小した場合の視線移動波形を示す。四角で囲まれた部分では大きな数値が計測されているのに対し、それ以外の部分は数

値が非常に小さい. このように, 視線移動時とそれ以外とで特徴が大きく異なる波形が得られた. また, 得られた入力動作の波形の特徴が, 1 回目の視線移動波形と 2 回目の視線移動波形で正負逆のピークが出ていること, 2 つの波形の間に動きの小さい区間が短時間発生していること, 水平方向と垂直方向で同じ特徴が得られていることという, 交流増幅 EOG による計測で得られた入力動作波形と同様の特徴を持つことが示された.



(a) Averaging the whole

(b) Averaging top of 10%

図 4.10 Eye Glance 入力動作時の波形(左上)
 Fig. 4.10. a waveform of Eye Glance (Upper Left)

4.10. Eye Glance 入力動作波形の判別アルゴリズム

図 4.11 に左下方向に Eye Glance 入力動作を行った際の波形例を示す。水平方向は正が左を，負が右を示し，垂直方向は正が上を，負が下を示している。

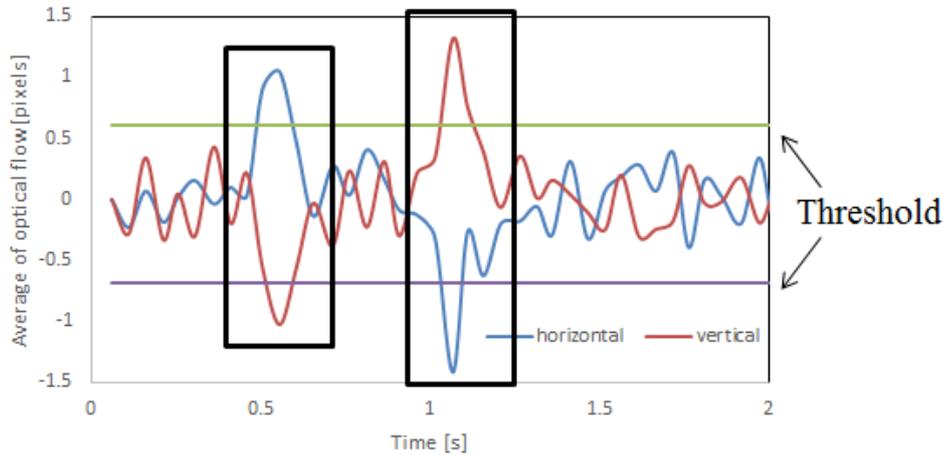


図 4.11 波形例と閾値

Fig. 4.11. Example of waveform and threshold

前項で示したように，オプティカルフローを用いた計測方法でも交流増幅 EOG による計測で得られた波形と同様の特徴を持つ波形が観測される。そのため，先行研究と同様に閾値を用いて視線移動の波形を検出する。先行研究では水平方向の波形で視線移動を検出していたが，視線移動以外の波形で発生するノイズの大きさを考慮して，画像解析を用いた手法では垂直方向の波形で視線移動の検出を行う。水平方向に関しては，垂直方向の波形のピーク時と同じタイミングでのピーク値の正負で方向を判断する。また，最初の視線移動波形の後に入力受付時間を設定し，停留時間が入力受付時間範囲外であった場合には入力として扱わないものとする。

入力判別の閾値については，キャリブレーションを通して決定する。キャリブレーションは右上と左下への Eye Glance 入力 1 回ずつで構成される。キャリブレーション開始から終了までの全データのオプティカルフローについて，水平成分垂直成分ともに正と負のデータに分け，それぞれの平均値と標準偏差およびピーク値(最大値・最小値)を算出する。「平均値と標準偏差の合計値」と「ピーク値」の中間を閾値とする。入力受付時間に関しては，先行研究では 2 回のキャリブレーションでえられたピーク間の時間の平均 $\pm 30\%$ としていたが，本研究では被験者ごとに数値を変更せず，固定値を用いている。

4.11. 瞬目の影響

瞬目とは、一般的にまばたきと呼ばれる生理現象のことである。瞬目は瞼が降り始めてから数百ミリ秒程度で終了する動作として定義されており、数秒にわたる場合は閉眼と呼ばれる^[58]。本手法の計測中に瞬目が発生した場合、Eye Glance 入力時と非常に似通った特徴を持つ波形が計測される。図 4.12 に波形例を示す。

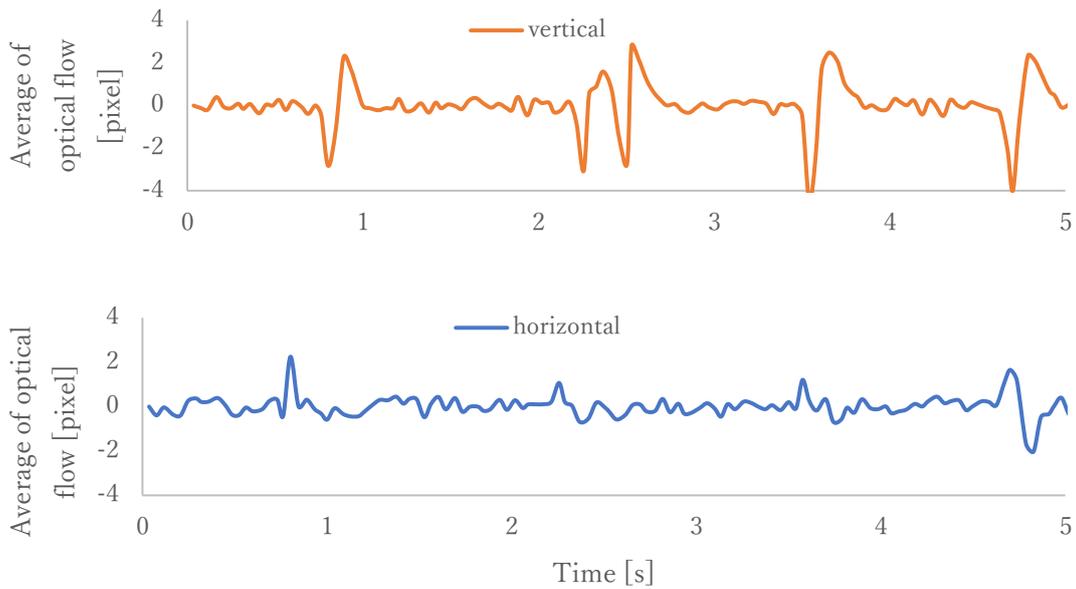


図 4.12 瞬目で得られる波形例

Fig. 4.12. A waveform of blink

先行研究^[54]において、頻繁に誤判別の原因となった。そのため、瞬目のみに見られる特徴を調べたところ、水平方向に関しては共通した特徴が見られなかったが、垂直方向については、まぶたが閉じる際に下方方向に視線移動以上の大きな波形が発生し、その後瞼が開くときにやや大きな波形が発生することがわかった。また、この波形間の時間差が非常に短いこともわかった。そのため、瞬目を視線移動と誤判別しないための方法として、瞼が閉じる際と開く際の波形のピークの傾きの大きさに閾値を設け、閾値以上の傾きの際には瞬目であり、視線移動ではないものとして扱う。

この手法はあくまで誤判別を低減するためのものであり、瞬目そのものを判別するものではない。特徴的な波形を得られるため、瞬目を入力の 1 つとして用いることが出来る可能性はあるが、瞬目そのものの判別を実現するには、瞬目専用の閾値を設け、意図して行われる随意性瞬目と意図しない自発性瞬目の特徴の違いを考慮したアルゴリズムを構築する必要がある。

4.12. 提案画面デザインとの対応に関する検討

これまでに記したように、Eye Glance 入力インターフェースは、簡単な眼球運動のみでスマートフォンのような小型の画面を持つ端末に対して入力操作を行うことができる。そこで、前章で提案された入力画面デザインを利用できるような入力方法を検討する。Eye Glance 入力は斜め方向の 4 種類の動作を入力に用いるため、図 4.13 のように提案画面デザインを 4 つの領域に分けて入力する方法を検討する。

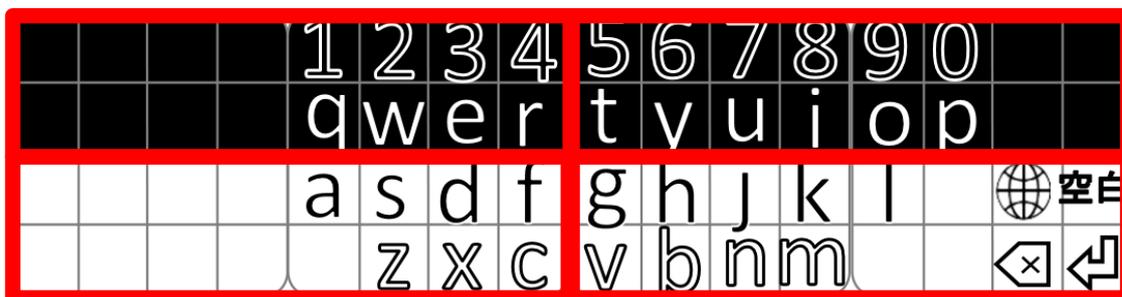


図 4.13 Eye Glance 入力と提案デザインの対応

Fig. 4.13. Correspondence between Eye Glance input and suggested design

この時に考えられる Eye Glance 入力の課題の 1 つに、利用できる入力の種類の少なさが挙げられる。Eye Glance 入力では、入力を行う際に一度に提示できる選択肢が 4 つしかなく、ページの進む・戻るなど選択肢が少ない状況では利用できるが、文字入力等の多数の選択肢を必要とする場面では利用が難しい。先行研究^[53]では 2 回の Eye Glance を 1 つの入力とすることで、16 選択肢を実現したが、提案画面デザインを利用するには選択肢数が足りない。この問題を解決するために、一度に提示できる選択肢を増加させることを検討した。

4.12.1. Eye Glance 入力インターフェースの選択肢増加の検討

選択肢増加の方法として、本研究では、Eye Glance 入力の画面隅を一瞬見る動作の長さを変えることに着目した。通常の Eye Glance 入力では画面隅を見る時間はほんのわずかであり、動作全体の時間は 0.5 秒もかからない。そこで、ボタンの長押しにヒントを得て、画面隅を見る時間を長くしたものを加えることで選択肢の増加を図った。この方法が実現すれば、一度に提示できる選択肢が 4 つから 8 つに倍増する。また、先行研究^[53]と同様に 2 回の入力動作を 1 つの入力とすれば、 $8 \times 8 = 64$ の選択肢を扱うことができる。この数は、平仮名 50 音に加えて補助キーをいくつか加えても十分な数であり、文字入力に Eye Glance 入力を

利用できる可能性がある。また、2章で述べた画面デザインを応用することもできる。外側に配置されている。図 4.14 に示すように、ボタン 1 および 4 の領域を長めの入力に、内側に配置されているボタン 2 および 3 を短めの入力に用いることで、デザインを大幅に変更せずとも直感的に使いやすい GUI として利用できる可能性がある。



図 4.14 入力の長短に対応するボタン配置

Fig. 4.14. Button layout corresponding to input length

4.12.2. 実験

先行研究^[54]で、入力判別をリアルタイムで行い、判別結果を被験者にフィードバックするシステムを構築し、判別精度の評価実験を行った。その結果、120回の入力時の平均判別率は76%となった。被験者によっては入力を繰り返すうちに判別率が上昇し、最後の30回の平均判別率は90%以上となった。そのため、この時のアルゴリズムを元に、判別する入力を、画面隅を一瞬見る通常の Eye Glance 入力(以下、短入力)と画面隅をやや長めに見る入力(以下、長入力)の2種類に分ける手法の実験を行った。被験者は20代の成人男性4名とし、うち3人が眼鏡装着者とした。今回の実験は短入力と長入力の区別の可否を調査するため、被験者には Eye Glance 入力に関する実験の経験者のみを徴用した。実験システムのハードウェアは顔画像を撮影するカメラを内蔵し、撮影された動画画像を記録し、画像への分割、および画像の解析を行うラップトップ PC1 台を使用した。カメラの画素数は92万画素であり、時間分解能は30fpsである。

また、実験は室内で行い、一般的な蛍光灯照明と自然光下で行った。計測時、被験者はパソコンのモニタの正面から約 60cm 程度に設置された椅子に座った状態で実験を行った。姿勢については、普段 PC を利用する際の姿勢を取るよう指示した。また、今回の実験で初めて運用する短入力と長入力の区別について、被験者には、短入力の際には通常通りの Eye Glance 入力を行い、長入力の際には画面の隅をしっかりと見るように指示した。

図 4.15 に実験の流れを、図 4.16 に実験画面を示す。実験画面は、第 3 章で述べた手法を元にデザインし、上下に分かれた 4 つのボタンを水平に配置した。今回の実験では文字などは表示せず、指定された箇所の選択のみを行った。なお、入力のための視線移動は、このボタンの四隅ではなく、画面の四隅を見るものとした。

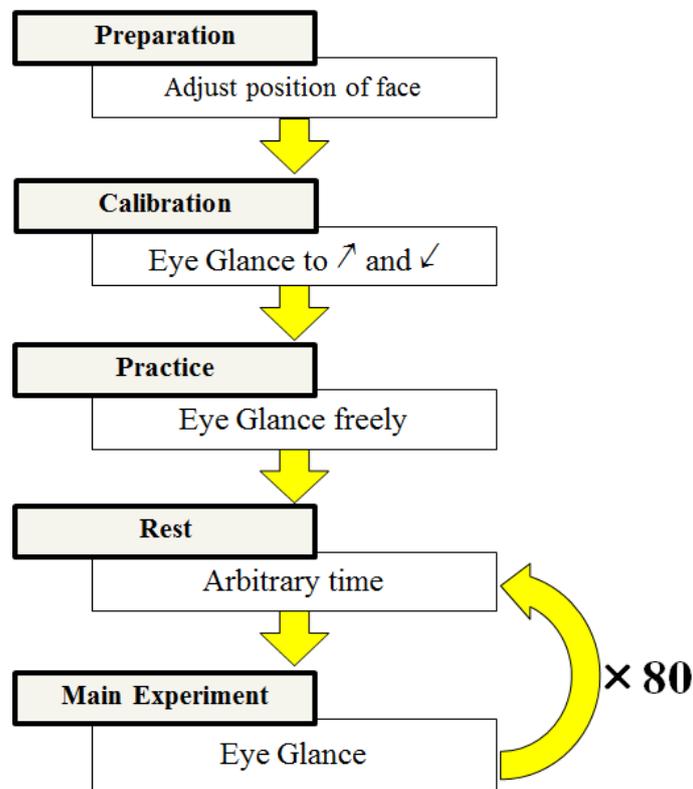
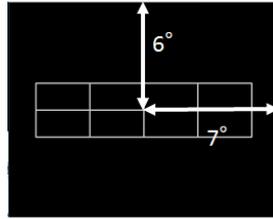
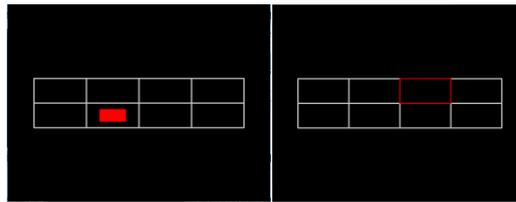


図 4.15 実験の流れ

Fig. 4.15. Flow of experiment



(a) Size



(b) Instruction (c) Detection

図 4.16 実験画面

Fig. 4.16. Experiment screen

最初に、入力判別を行うための閾値を決定するキャリブレーションとして、実験画面を呈示し、右上と左下に対して Eye Glance を 1 回ずつ行った。指示画像の呈示は 2.5 秒間ずつで、2 つ連続で呈示した。被験者には指示画像が呈示されたらなるべく早く入力動作を行うように指示した。この時に得られた波形から 2.2 で述べた方法を用いて入力判別用の閾値を決定した。小型画面での運用を想定し、中央と四隅の間の視角度は水平方向が約 7° 、垂直方向は約 6° とした。

次に、入力に慣れるために 60 秒間の練習時間を設けた。練習時間中、被験者は自由に Eye Glance 入力を行った。被験者へのフィードバックとして、入力判別が発生した際には、図 4.16(c) のように、その場所に赤い枠線を 0.5 秒間表示した。この際に得られたデータに関しては、閾値の調整などには利用しない。

練習時間の後に、本実験を行った。任意時間の休憩を挟んだのちに、指示を含んだ実験画面を 3 秒間呈示し、その後再び休憩に移った。被験者は指示後にその方向に Eye Glance を行った。入力指示の際には図 4.16(b) のように、その方向に赤い四角を表示し、入力判別がされた際には、図 4.16(c) のように正誤を問わず練習と同様に赤い枠線を 0.5 秒間表示した。被験者にはキャリブレーションと同様に、指示画像が表示された場合、なるべく早く入力動作を行うように指示した。指示順はランダムとし、入力前の休憩時間中にも次の入力指示を表示した。8 入力を 10 回ずつ、合計 80 回の入力から判別率を導出し、考察を行った。

実験終了後に、被験者に対して口頭で簡単なアンケートを行い、入力の長短の違いに関する事項を中心に使いやすさを調査した。

4.12.3. 結果

入力指示に対して正しく判別された回数と、指示通りの入力ができなかった回数を表 4.1 に示す. 入力指示回数に対して正しい入力が行われた回数の割合を判別率として、平均判別率は 83.1%となった.

表 4.1 判別結果

Table 4.1. Result of detection.

被験者	a	b	c	d
正答	78	57	61	70
長→短	0	8	5	3
短→長	0	3	6	1
他	2	11	8	6
計	80	57	80	80

4.12.4. 考察

図 4.17 に、各入力にかかった時間の平均を示す. 図中の直線は長短の入力の境界時間(0.35 秒)である. 今回の実験では入力受付時間の限界を試験的に 0.9 秒に設定したが、実際に入力にかかった時間は最大で 0.7 秒程度となった.

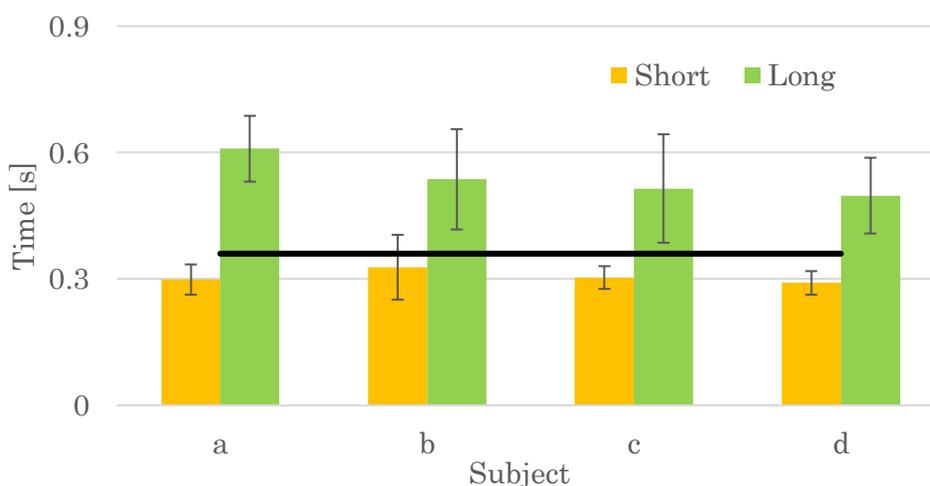


図 4.17 入力にかかった時間

Fig. 4.17. Time taken for input

被験者 b は長入力の指示に対して短入力と判別された回数が多く、「長入力の

受付時間を延長してほしい」という意見があった。被験者 c は、短入力と長入力の誤判別数には差が見られなかったが、「短入力の受付時間が短すぎるため、延長してほしい」という意見が得られた。そのため、入力の長短の境界時間を変更し、被験者 b は長入力の受付時間を 0.05 秒延長し、短入力の受付時間を 0.1 秒延長して再度同じ実験を行った。結果を表 4.2 に示す。被験者 b は長入力が短入力に誤判別される場合が減少し、判別被験者 c は判別率が 76.3% から 87.5% まで上昇した。このように、利用者によって入力しやすい入力受付時間は異なるので、現在利用されているダブルタップや長押しのように、手動で自分に合った時間を選択できるように調整する。

表 4.2 条件変更に伴う判別の変化

Table 4.2. Change in detection accompanying condition change

被験者	b		c	
	前	後	前	後
正答	57	61	61	70
長→短	8	1	5	2
短→長	3	4	6	6
他	11	14	8	2

また、被験者 b は、入力方向とは逆方向に判別が行われるケースが見られた。これは、キャリブレーションによって設定された閾値が小さく、視線移動の直前に見られたやや大きめの波形が視線移動と判別されてしまったためだと考えられる。被験者 c にも同様の誤判別が見られたため、閾値を適切に設定するための手法を検討する必要がある。

4.13. 64 選択肢の利用に関する検討

前項の実験の結果、Eye Glance 入力の時間の長短で入力を 2 種類に分割し、一度に提示できる選択肢が 4 個から 8 個に倍増する可能性が示唆された。そこで、選択肢増加の手法の 1 つとして、先行研究で提案されていた 2 回の Eye Glance 入力動作を 1 つの入力として扱う方法を検討する。8 選択肢の入力を 2 回行うことで、最終的に使用できる選択肢は 64 となる。この数は、日本語入力で用いられる平仮名 50 音に加え、Delete や Enter などの入力補助となるキーも利用できるほどの選択肢数であり、Eye Glance 入力で文字入力を実現できる可能性がある。

4.13.1. 実験

被験者および設備などの実験環境は先述の 8 選択肢評価実験と同様とした。

実験画面には、図 4.18 を用いた。これは 8 選択肢評価実験で用いたものさらにボタン内部の選択肢を追加したものであり、文字などの具体的な情報は配置していない。

実験手順の流れを図 4.19 に示す。キャリブレーションや 60 秒の練習時間など、本実験前のプロトコルは 8 選択肢評価実験と同様に行った。

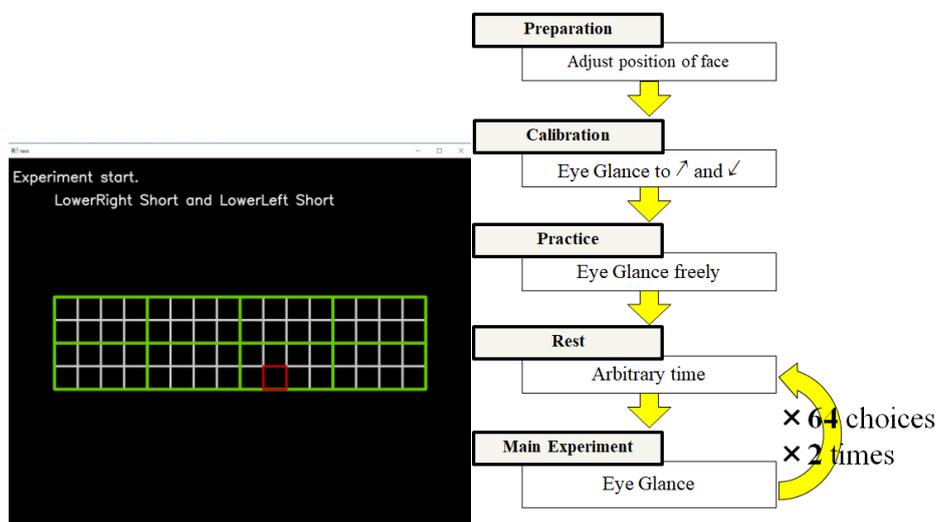


図 4.18 実験画面

Fig. 4.18. Experiment screen

図 4.19 実験の流れ

Fig. 4.19. Flow of experiment

本実験では、64 個の選択肢から指示された選択肢に対して入力を行わせた。任意時間の休憩をとったあと、指示を含んだ実験画面を 60 秒間呈示し、その後再び休憩に移った。被験者は指示後にその選択肢を入力するための入力動作を

行った。指示画面として、画面上部に入力に必要な視線移動方向の組み合わせを表示し、入力対象となる箇所を赤い四角で示した。入力時のフィードバックとして、一度目の Eye Glance の際には判別された箇所に赤い枠線を表示し、二度目の Eye Glance の際には判別された箇所に赤く塗りつぶされた四角を表示した。一度目の入力から二度目の入力は 2 秒以内とし、それまでに入力判別がされなかった場合は表示を元に戻し、一度目の入力からやり直させた。指示と異なる入力が判別された場合は正しい入力判別ができるまでやり直させ、指示通りの入力が判別された場合は試行を終了し、休憩に移った。また、試行開始から 60 秒経過した場合は入力の成否に関わらず試行を終了した。被験者にはキャリブレーションと同様に、指示画像が表示された場合、なるべく早く入力動作を行うように指示した。指示順はランダムとし、入力開始前の休憩時間中にも次の入力指示を表示した。1つの選択肢に対して2試行ずつ、合計で128試行を実施し、終了後に被験者に対して口頭でアンケートを行った。

4.13.2. 結果

今回の実験では入力が成功するまで入力動作を繰り返させたため、判別率ではなく、入力にかかった時間や誤入力数を調べた。

1試行あたりの入力にかかった時間の平均を、入力動作の組み合わせごとに図 4.20 に示す。

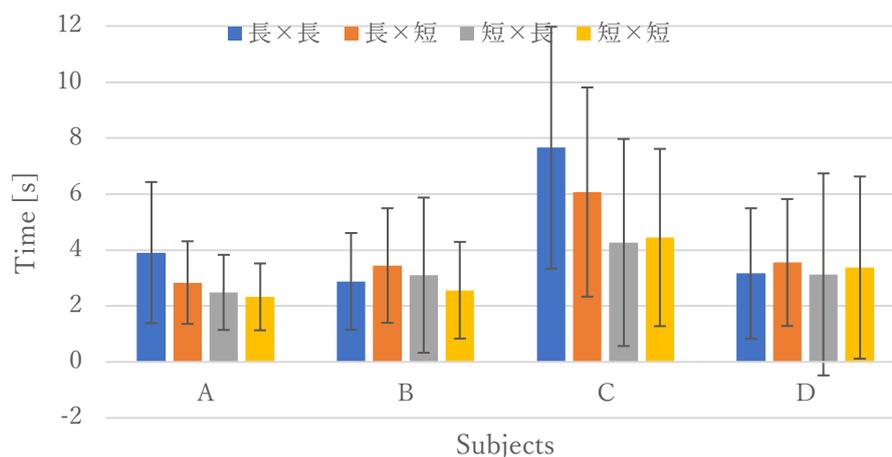


図 4.20 入力にかかった時間

Fig. 4.20. Time taken for input

4.13.3. 考察

・入力間にかかった時間

1 試行あたりにかかった時間の平均は全体で 3.8 秒となった。今回の実験では二度目の入力動作を受け付ける猶予時間を 2 秒と長く設けており、これを適切な時間に調整することで入力にかかる時間は短くなると考えられる。入力インタフェースとして実装する際に、一度目の入力と二度目の入力の間にどの程度の入力猶予時間を設ければよいかを検討するため、今回の計測で入力動作間にどの程度の時間がかかったかを調べた。各被験者の一度目と二度目の入力の間の時間を図 4.21 に、入力の組み合わせ別に示す。

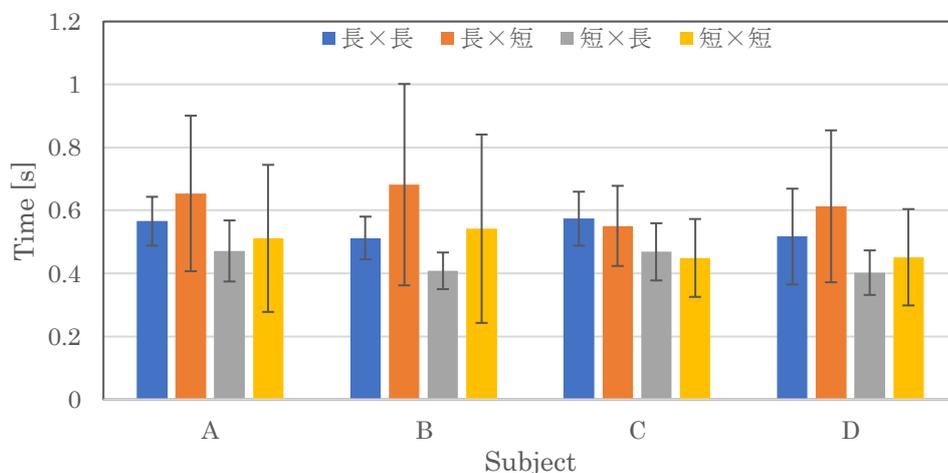


図 4.21 2 回の Eye Glance 入力の間にかかった時間

Fig. 4.21. Time between 2 Eye Glance input

全体の平均は 0.53 秒となった。全体の傾向として、二度目の入力が短入力の場合に標準偏差が大きくなる傾向がみられた。これは、一度目の入力のあとに二度目の入力動作を行う際に失敗して、2 秒間の猶予時間中に再度入力動作を行ったことが原因だと考えられる。これに関しては、入力間の猶予時間を短くすることで対処できると考えられる。このことから、二度目の入力を行うまでの猶予時間は 0.5~0.6 秒程度が妥当と思われる。

・誤入力

指示された入力と異なる入力が判別された場合と一度目の入力の後で二度目の入力が判別されなかった場合を誤入力とし、試行ごとの誤入力の回数の平均を図 4.22 に入力の組み合わせ別に示す。

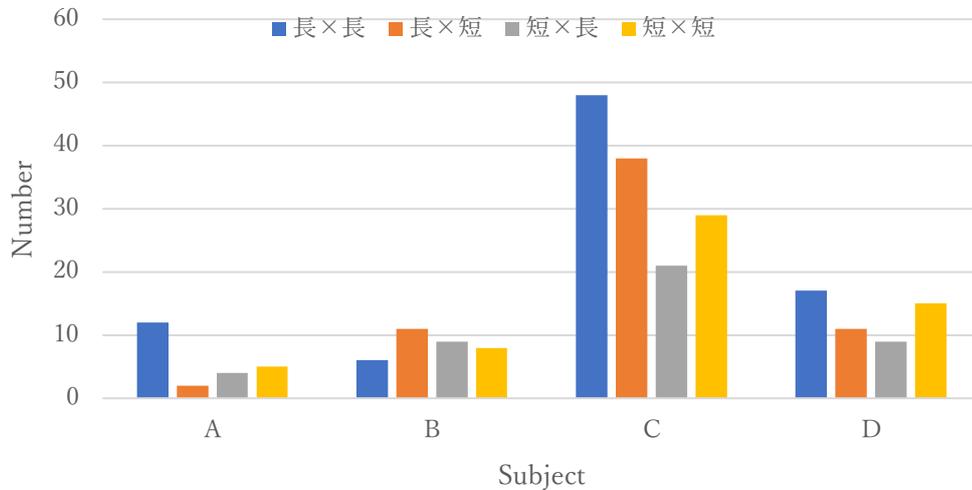


図 4.22 誤入力数

Fig. 4.22. Number of miss input

被験者 A, B は誤入力数が非常に少ないが、被験者 C は誤入力数が多くなった。これは、閾値の設定が被験者に対して不適切だと考えられる。今回の計測方法では垂直方向の波形にのみ閾値を設けていたが、被験者 C は視線移動時の垂直方向の波形が小さく、入力以外のノイズとの区別ができない場合が見られた。しかし、水平方向については視線移動時の波形が大きく出ているため、水平方向の波形について閾値を設けて入力の有無を判別し、垂直方向の波形では閾値を設けず波形の凹凸で入力の方向のみを判別すれば、判別率向上に繋がる可能性がある。そのため、今後はキャリブレーションの仕様を見直し、被験者やデバイスの画面の縦横比に合わせて閾値を設ける必要がある。

また、1 回の入力の際に、一度目よりも二度目の入力動作のほうが多くの誤入力が見られた。さらに、複数の被験者から「入力画面が見辛く、二度目の入力対象を勘違いしてしまうことが多かった」という感想が得られた。今回の実験では画面の情報量が少なく、見やすさが考慮されていない。また、被験者に対して入力のフィードバックが入力完了後にしか与えられない。これらのような GUI の情報呈示不足が誤入力の原因だと考えられる。誤入力低減のために、一度目の入力のあとに選択した部分を拡大表示したり、入力終了時だけでなく入力の途中にもフィードバックを与えたりするなど、画面の変化を利用することで入力しやすくなるような工夫が必要である。

・先行研究との比較

視線入力に関する先行研究との比較をまとめた表を以下に示す.

表 4.3 先行研究との比較(※換算値)

Table 4.3. Comparison with previous research

研究	入力方法	計測方法	操作自由度	判別精度(%)	入力速度(文字/min)
新井ら ^[59]	注視+瞬目	カメラ+HMD	9	53	35
Chen ら ^[60]	注視+瞬目	カメラ	-	97	12
伊藤ら ^[50]	Eye Glance	EOG	4	92	15.2
本研究	Eye Glance	web カメラ	8	75	15

新井ら^[59]は小型ディスプレイと web カメラを組み合わせたデバイスを用いて, 9 個の指標に対して入力を行った. 入力速度は約 1.5 秒/文字と高速だが入力に失敗するケースも多く見られた.

Chen ら^[60]は眼鏡に取り付けた web カメラを用いて注視点位置と瞬目の検出を行うシステムを提案した. 判別率は約 97%と高いが, 5 秒以上の随意性瞬目を入力条件としており, 入力速度は高速とは言えない.

伊藤らの研究^[50]では EOG を用いて Eye Glance 入力を計測し, 2 回の入力で 16 選択肢を利用可能とするシステムを開発した. 判別率が 90%以上で文字入力速度は 15 文字/min となった.

本研究と新井らの研究を比較すると, 入力速度は劣るが, 判別精度は本研究のほうが優れている. また, Chen らの研究に対しては, 本研究の手法は入力速度が大きく優れている. 伊藤らの研究は本研究と同じ入力方法を採用しており, 判別精度は劣るが, 入力速度はほぼ同等で, 操作自由度の増加を実現している. また, これらの先行研究と比べて本研究は計測専用の装置を必要としない点で優れており, PC だけでなくスマートデバイスなど幅広いデバイスで利用できる.

4.14. まとめ

第4章では、小型画面への入力方法の1つとして、視線入力について述べた。また、注視位置の特定の難しさと、この問題に対処するために提案された Eye Glance 入力について述べた。さらに、提案画面デザインとの連携を考慮するうえで、利用できる選択肢が少ないという Eye Glance 入力の問題点を解決するために、入力にかかる時間の長短を用いて入力の種類を増加する手法を提案した。この手法の評価実験を行い、文字入力にも対応できるほどの選択肢を利用できる入力インタフェースとしての有用性が示唆された。

5. ジェスチャ入力による提案画面デザインへの入力方法

先行研究において、スマートフォン上で Eye Glance 入力インタフェースを実装し、視線移動を計測する研究^[61]が行われた。しかし、その判別率は芳しくなく、カメラのフレームレートなどの問題から、現行のスマートフォンで素早い視線移動を計測するのは難しい可能性が示唆された。そこで、スペックの高くない携帯情報端末でもタッチ操作によらず入力できる手法を検討した。

タッチ操作に依存しない入力方法として、前章で紹介した視線入力の他に音声入力がある。音声入力は、入力に手を使わないことに加え、入力速度が速いことが利点として挙げられる。そのため、スマートウォッチをはじめとするタッチ操作が難しいデバイスで利用されている。しかし、スマートデバイスは周囲に他の人がいる状態で利用する機会が多く、精度が雑音などの周辺環境に大きく依存するという欠点がある。

これに対し、タッチ操作や利用環境に依存しない方法として、ジェスチャ入力が研究されている。本項ではこのジェスチャ入力に関する研究を報告する。

5.1. ジェスチャ入力とは

本論文では、タッチ操作を伴わず、身体の動作のみによって入力を行うものをジェスチャ入力とする。

スマートデバイスでジェスチャ入力を実現しようとする試みは多く報告されている。先行研究では、照度センサを用いてハンドジェスチャを認識する手法^[62]やカメラに写る指によってポインティングを行う手法^{[63][64]}などが検討された。また、センサを増設して入力手段を増やす試みとして、外部マイク^[65]やフォトリフレクタ^[66]や近接センサ^[67]を用いた研究がある。手や指をトラッキングする Leap motion を用いて手指のジェスチャを認識する手法も研究されている^[68]。

しかし、文字入力のような多数の選択肢を要求される入力では必要なジェスチャの種類も多様化・複雑化し、再現性や繰り返し性に課題が伴う。また、ジェスチャの計測に近接センサなどを外付けする研究も多く、デバイスに内蔵されたセンサのみでジェスチャ入力を実現しようとする試みは少ない。

そこで本研究では、上記の問題を解決するために、少操作自由度の入力動作を、スマートフォンに内蔵されたセンサのみで計測・解析し、この動作を複数回行うことで入力の選択肢を増加させる手法を検討する。これにより、ジェスチャ計測に専用の外部機器を用いず、覚えるジェスチャの数も低減できるため、先行研究に比べて導入のしやすさや利便性が向上すると考えられる。

5.2. 提案手法

5.2.1. 提案画面デザインとジェスチャ入力への対応

これまでの入力方法と同様に、提案画面デザインへの入力に対応したジェスチャの検討を行う。提案画面デザインは横4×縦2の区画を持つため、横方向と縦方向の2つのベクトルを同時に持つような動作が望ましい。また、スマートフォンへの入力であるため、スマートフォンを片手で把持している状態で行えるような動作が必要となる。さらに、文字入力は連続で行うことが多いため、1動作にかかる時間が短い小さな動きが望ましい。

上記の条件を満たすようなジェスチャ入力として、Eye Glance入力と同じように、デバイスの四隅に対する往復動作として、各隅を身体から遠ざけ戻す4つの動作を検討した。これらの動作はジェスチャのベクトルが異なるだけで、動作自体は同じ「スマートデバイスを傾けて戻す」という簡単なものであり、小さい動作で覚えやすく、かつジェスチャ数が少ないという条件を満たした動作であるといえる。しかし、実際にこれらの動作を試してみたところ、手首の近位にあるデバイス下側二隅の動かすにくさが課題に挙げられたため、代わりとして、同じベクトルを持つ動作でありながら動かす隅の異なる、上側二隅を近づけ戻す動作を検討した。以上のことから、提案する4つの入力動作は
動作①：右上隅を身体から遠ざける方向に動かし戻す(以下、右遠)
動作②：右上隅を身体から近づける方向に動かし戻す(以下、右近)
動作③：左上隅を身体から遠ざける方向に動かし戻す(以下、左遠)
動作④：左上隅を身体から近づける方向に動かし戻す(以下、左近)
となる。

このように、スマートデバイスを把持した状態で特徴ある動作を行い、スマートフォンに内蔵された加速度センサから得られるデータを計測・判別することで入力を行うインタフェースを開発した。

5.2.2. 動作計測アプリケーションの開発

上記の4動作を判別するため、スマートデバイスの3軸加速度センサによって加速度値を取得するアプリをAndroid上で作成した。スマートデバイスの3軸方向を図5.1に示す。サンプリング周波数は各軸50Hzとした。

また、加速度センサの値は重力の影響を受けるため、各軸には軸方向の重力成分がオフセットとなって観測される。今回は動作による変動成分に注目するため、 $gr(i)$ (i :データ番号)をローパスフィルタに通し、重力などの緩やかに変化する

るオフセット成分 $gl(i)$ を抽出する. その後, ハイパスフィルタに通すことで $gr(i)$ から $gl(i)$ を取り除き $gh(i)$ を算出する. これにより得られた $gl(i)$ および $gh(i)$ を用いてその特徴を明らかにする. 計算式は従来研究(3)より, 以下の式(1), (2)を使用した($0 < \alpha < 1$).

$$gl(i) = gr(i) \times \alpha + gr(i-1) \times (1-\alpha) \dots \dots \dots (1)$$

$$gh(i) = gr(i) - gl(i) \dots \dots \dots (2)$$

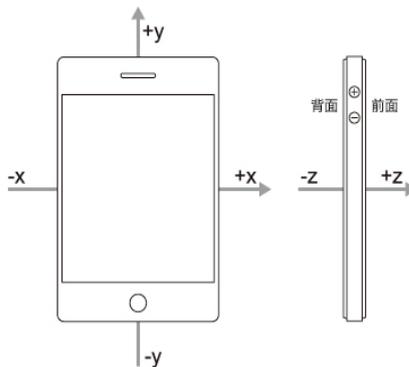


図 5.1 : スマートデバイスの 3 軸方向
 Fig.5.1. Three-axis direction of smart device

5.3. 実験 1 : 加速度波形解析

5.3.1. 概要

まず、提案動作によって特徴的な加速度波形が観測できるかどうかを確認するための実験を行った。

実験用のスマートデバイスとして、Sony 社の Xperia XZ を使用した。被験者は日頃からスマートデバイスを使用している 21~27 歳の右利き男性 3 名、右利き女性 1 名である。実験は室内の一般的な蛍光灯照明の下で行った。被験者にはスマートデバイスを普段から使用している際の持ち方で持たせ、楽な姿勢で椅子に座ってもらった(図 5.2)。

提案した 4 つの入力動作に対して、①~④の順に 10 回ずつ計 40 回動作を行った。これを 1 セットとし、5.2 節の式(1)の係数 α が 0.1 から 0.9 になるまで 0.1 ずつ計 9 セット行い、係数によって加速度波形がどう変化するかを確かめた。



図 5.2 : 実験風景

Fig.5.2. Experiment image

5.3.2. 結果・考察

波形例として左近の加速度波形特徴を、x 軸は図 5.3 に、y 軸は図 5.4 に、z 軸は図 5.5 に示す((a)は $\alpha=0.1$, (b)は $\alpha=0.9$ の場合を示す)。図 5 において、赤線の LOW は $gl(i)$ の、青線の HIGH は $gh(i)$ の波形を表している。また、表 5.1 に各入力動作で得られた加速度波形におけるピークの特徴をまとめたものを示す。

x 軸成分は、図 5.3 より左近において、特に $\alpha=0.9$ の場合の LOW にノイズが

多く発生していることが分かった。このことから、判別に LOW 成分を使う場合は $\alpha=0.1$ が適すると考えられる。

y 軸成分は、図 5.4 より α の値が高くなるにつれて HIGH の振幅が小さく、LOW の振幅が大きくなる変化することが分かった。加えて、LOW にオフセット成分が存在し、ピーク時以外の値(以下、基準値)が 0 よりも上に存在していることが分かった。これらの傾向は y 軸成分のみに限らず、他軸成分においても同様に見られた。また、表 5.1 より、HIGH のピーク特徴が他軸に比べ不規則的であることが分かった。このことから、動作を判別するための波形としては HIGH ではなく LOW が適すると考えられる。

z 軸成分は、図 5.5 より、y 軸と同様の特徴であることが分かった。

これらの特徴をまとめると、 α の値が高くなるにつれて HIGH の振幅変動は小さく、LOW の振幅変動は大きくなることが分かった。振幅変動は小さい方が動作間の差が減り、繰り返し性が高いと予想できる。また、x 軸成分は $\alpha=0.9$ の LOW にノイズが多く発生し、y 軸成分は HIGH のピーク特徴が α の値によらず不規則的であることが分かった。これらの結果から、判別に用いる波形としては $\alpha=0.1$ の LOW が最適であると考えられる。

この実験から得られた課題としては、左近にのみ x 軸成分にノイズが見られたこと、各軸成分の LOW のオフセット成分が基準値に影響していることの 2 点が挙げられる。ノイズが発生してしまうと波形を誤判別してしまう可能性が考えられ、オフセット成分はデバイスの持ち方や姿勢によって変動し一定の値を取らないため、環境に依存しないためには基準値を 0 に固定化する必要がある。これらは、更なるフィルタ処理によって影響を減少出来ると考えられる。

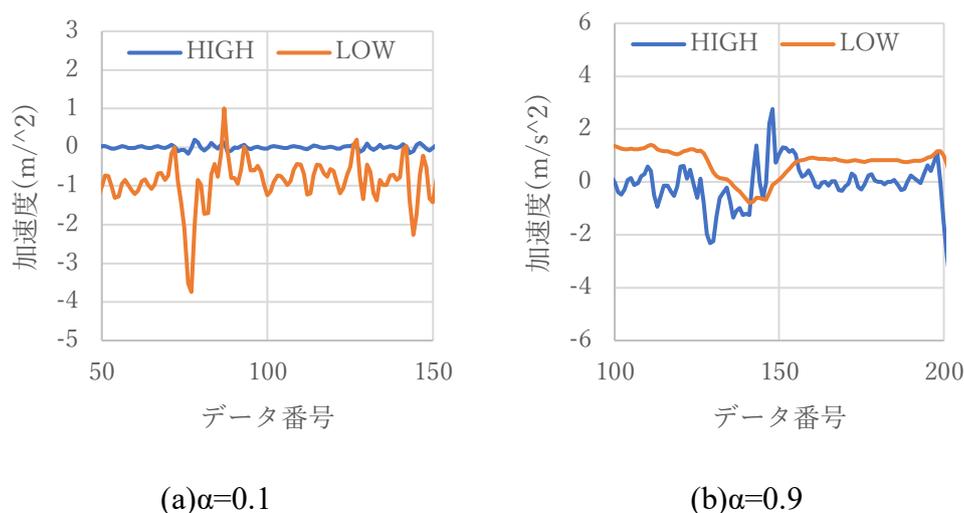
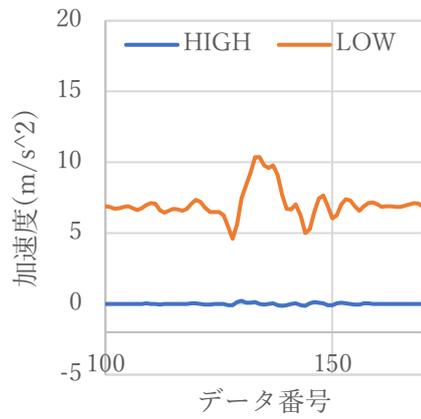
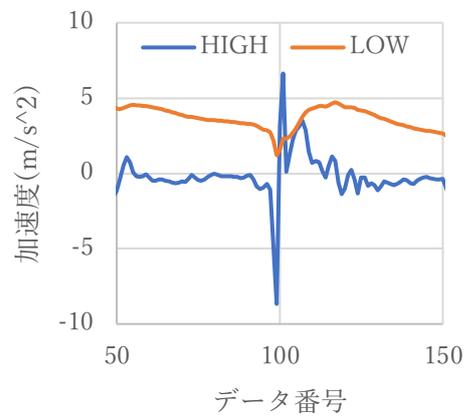


図 5.3 : 動作④における x 軸成分加速度波形例

Fig.5.3. Example of the x-axis acceleration wave pattern in movement ④



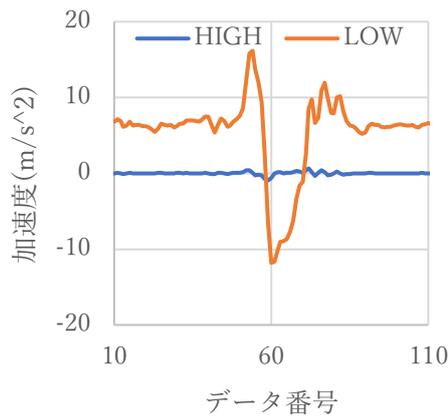
(a) $\alpha=0.1$



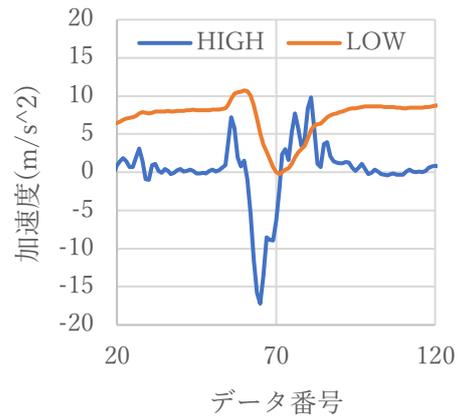
(b) $\alpha=0.9$

図 5.4 : 動作④における y 軸成分加速度波形例

Fig.5.4. Example of the y-axis acceleration wave pattern in movement ④



(a) $\alpha=0.1$



(b) $\alpha=0.9$

図 5.5 : 動作④における z 軸成分加速度波形例

Fig.5.5. Example of the z-axis acceleration wave pattern in movement ④

表 5.1：各軸加速度波形のピークの特徴

Table 5.1. Characteristic of the peak of each axis acceleration wave pattern

		右遠	右近	左遠	左近
gh(i)	x	負から正	正から負	正から負	負から正
	y	負から正	正から負	負から正	負から正
	z	負から正	正から負	負から正	正から負
gl(i)	x	負	正	正	負
	y	負	正	負	正
	z	正	負	正	負

5.4. 実験 2：判別波形解析

5.4.1. 概要

実験 1 の結果より，動作の判別には $\alpha=0.1$ の LOW が最適であると考えた．しかし課題として，基準値が 0 よりも上に存在していることと，左近の x 軸成分にノイズが見られたことから，更にフィルタ処理をかける必要性が挙げられた．そこで本実験では， $\alpha=0.1$ の LOW に対して更にフィルタ処理をかけた値に対して実験 1 同様の実験を行い，入力動作のリアルタイム判別に用いる波形を決定する．実験 1 で使用した HIGH は加速度センサの値と LOW の差分値であり，基準値を 0 にとることが分かったので，今回の実験では $\alpha=0.1$ の LOW にハイパスフィルタをかけ，基準値を 0 にする．計算式は以下の(3), (4)を使用した．

$$wl(i) = gl(i) \times 0.1 + gl(i-1) \times 0.9 \dots \dots \dots (3)$$

$$wh(i) = gl(i) - wl(i) \dots \dots \dots (4)$$

ここで係数を 0.1 としたのは実験 1 より，HIGH の係数を高く設定すると変動が限りなく 0 に近くなってしまうことが分かったためである．本実験では，式(4)により得られた wh(i)の値(以下，LH)の波形を解析し，入力動作の判別方法を検討する．

実験に用いたスマートデバイス・被験者・環境等，実験 1 と同様の実験条件下で，提案した 4 つの入力動作に対して①～④の順に 10 回ずつ，計 40 回動作を行い，LH 波形の変化を確かめた．

5.4.2. 結果・考察

波形例として、x 軸成分は図 5.6 の(a)に右遠、(b)に左近の、y 軸成分は図 5.7 に右遠の、z 軸成分は図 5.8 に右遠の LH 波形特徴を示す。図 5.6,7,8 より、基準値が 0 になり、また各軸実験 1 により得られた波形よりもノイズが減少する傾向が見られた。また、右遠において LH 波形のピーク特徴は、x 軸成分は負から正に移行し、y 軸成分も負から正に移行、z 軸成分は主なピークが正に存在していることが分かる。

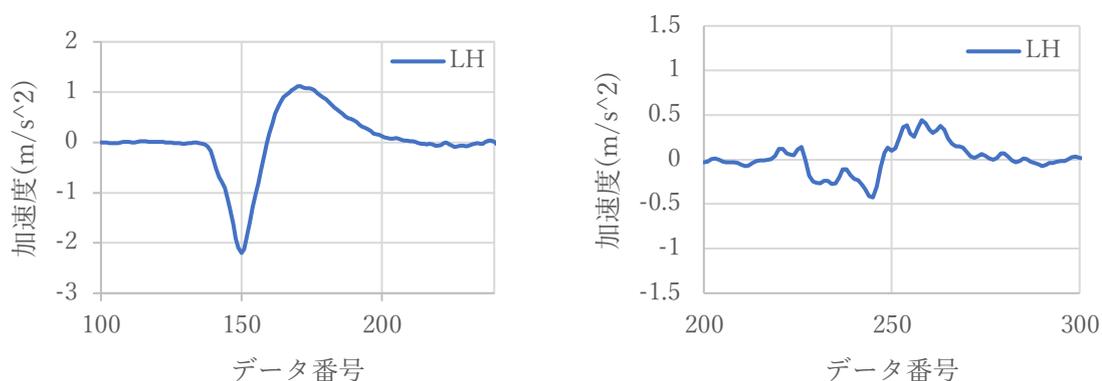


図 5.6 : x 軸成分 LH 波形例

Fig.5.6. Example of the x-axis LH wave pattern

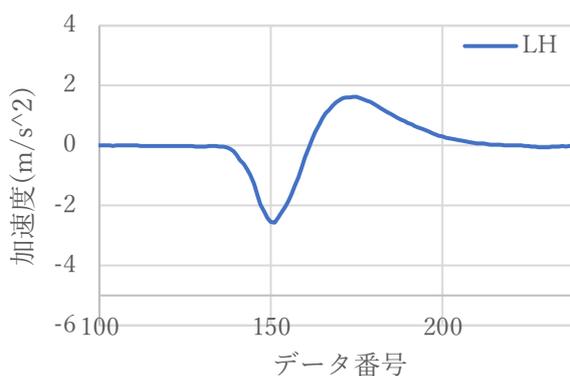


図 5.7 : 右遠における y 軸成分 LH 波形例

Fig.5.7. Example of the y-axis LH wave pattern in movement ①

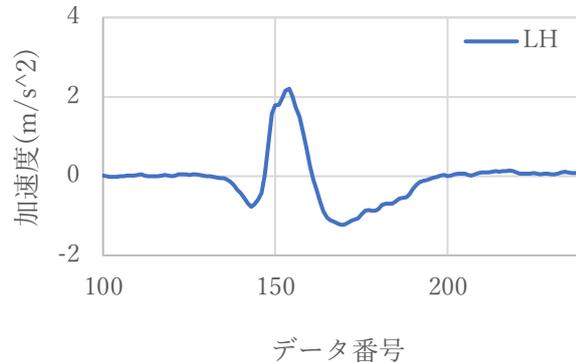


図 5.8 : 動作①における z 軸成分 LH 波形例
 Fig.5.8. Example of the z-axis LH wave pattern in movement ①

表 5.2 に各入力動作の LH 波形におけるピークの特徴をまとめたものを示す。図 5.6(b)および表 5.2 より、左近の x 軸成分にはノイズが発生していること、y 軸成分のピーク特徴が不規則的であることが分かったが、表 5.2 および図 5.8 から、z 軸成分のピーク特徴が鮮明かつ規則的で判別しやすいことが分かった。これらのことから、z 軸成分を入力基準とし、それに加えて x 軸もしくは y 軸成分の組み合わせによって入力が判別可能であると考えられる。具体的には、右遠と左遠は z 軸と x 軸成分によって、右近と左近は z 軸と y 軸成分を判別に用いることで、他の動作と混同することなく判別が行えると考えられる。

表 5.2 : 各軸 LH 波形のピークの特徴

Table 5.2. Characteristic of the peak of each axis LH wave pattern

		動作①	動作②	動作③	動作④
LH成分	x	負から正	正から負	正から負	負から正(※)
	y	負から正	正から負	負から正	負から正
	z	正	負	正	負

(※) ノイズが多次発生

5.5. 実験3：リアルタイム判別

5.5.1. 概要

実験2の結果より得られた各軸のLH波形特徴を用いて、提案動作がリアルタイムで判別できるかを確認するための実験を行った。

実験に用いたスマートデバイス・被験者・環境等、実験1,2と同様の実験条件下で、まず被験者には動作①～④に対して5回ずつのキャリブレーションを行ってもらった。これにより、LH波形のピークを検出するための閾値を決定した。その後、動作①～④を10回ずつ計40回ランダムに提示し、対応した入力動作を行ってもらった。これにより、動作毎、被験者毎の判別率(正しい入力回数 / 入力指示回数)を算出した。

5.5.2. 実験・解析方法①

判別実験には別途作成したプログラムを使用した。判別アルゴリズムのフローチャートを図5.9に示す。このプログラムでは、右遠と左遠はz軸とx軸を、右近と左近はz軸とy軸のLH成分を判別に使用する。判別例を図5.10に示す。図中の赤線は閾値(ここではピークの最大(小)値の60%とした)を表している。入力動作を行った際、x軸およびy軸においてピーク移行が負から正に移行する入力では(図5.10(a))、設定した負の閾値をLHが下回り、その後正の閾値を越え、更にそれを下回った時に動作が行われたと判別する。ピーク移行が正から負へ移行する場合は上記とは逆の処理を行う。z軸においてピークが正に存在する入力では(図5.10(b))、設定した正の閾値をLHが越え、その後それを下回った際に動作が行われたと判別する。ピークが負に存在する場合は上記とは逆の処理を行う。両軸で動作が行われたと判別された時、初めて対応した入力動作がカウントされる。

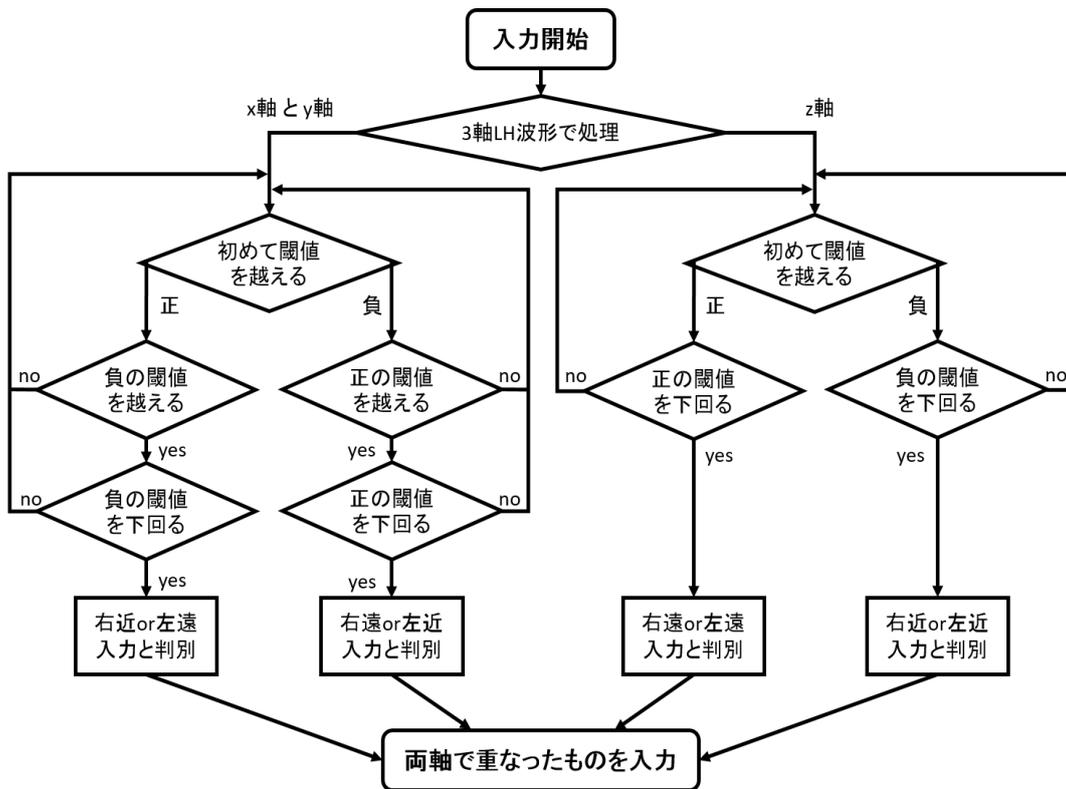
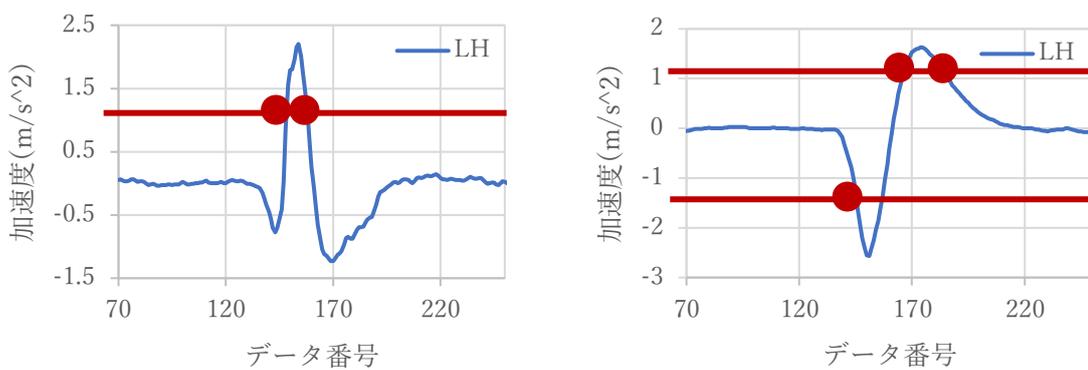


図 5.9 判別アルゴリズム

Fig.5.9. Determination algorithm



(a) Example of x or y-axis LH wave pattern (b) Example of z-axis LH wave pattern

図 5.10 : 判別方法の例

Fig.5.10. Example of determination method

5.5.3. 結果・考察

表 5.3 に判別率をまとめたものを示す. 表 5.3 より, 全体の平均判別率は 79%, 動作別の最低判別率は右近の 63%, 被験者別の最低判別率は被験者 B の 55% であった.

動作別で判別率が最低だった右近において, 被験者全体で判別ミスが 40 回中 15 回あった. その内, 8 回は動作が何も判別されない未判別であり, 7 回が他の動作と判別される誤判別であった(右遠 1 回, 右近 2 回, 左近 4 回). 判別ミスの過半数が未判別であったことから, LH 波形が設定した閾値を越えていない可能性が考えられる. そのため未判別数を減少させるためには, 閾値の条件を下げる等の検討が必要である.

被験者別で判別率が最低だった被験者 B において, 最も判別率が低かった左遠の判別ミス 7 回のうち, 4 回が右近との誤判別であった. 右近は z 軸と y 軸の LH 波形を組み合わせて判別しており, 左遠の y 軸波形は右近と同じ特徴を持っている. これらのことから被験者 B の左遠入力は, z 軸成分において他の被験者とは逆側にピークが検出されている場合があると考えられる. z 軸成分は大きなピークの前に小さな逆側のピークを持つことが図 5.8 から見て取れ, これが閾値を越えた場合に誤判別が起きると推測できる. そのため z 軸は, 大小問わず 2 つ目のピークを検出するようなアルゴリズムが最適であると考えられる.

以上より改善すべき点をまとめると, 未判別を減少させるためには閾値を下げ, 誤判別を減少させるためには z 軸成分の判別方法を再検討することが必要である.

表 5.3 : 判別率まとめ(%)

Table.5.3. Summary of discrimination rate (%)

被験者	A	B	C	D	平均
動作①	100	70	90	100	90
動作②	70	40	70	70	63
動作③	100	30	90	80	75
動作④	90	80	100	90	90
平均	90	55	88	85	79

5.5.4. 実験・解析方法②

上記の結果をふまえ、判別方法を改善した後に再度リアルタイム判別実験を行った。

具体的に改善したことは、閾値の条件として従来はピークの最大(小)値の 60% としていたところを 50%とし、z 軸の判別方法を図 5.10(a)に示した方法から図 5.11 に示す方法とした。図 5.11 における赤線は閾値を表している。z 軸のみ閾値をピークの 50%ではなく、 $\pm 0.3[\text{m/s}^2]$ で上下固定した。この値は、実験 2 により得られた被験者全員の LH 波形の z 軸成分から、大小問わず 2 つ目のピークを検出するための小さなピークも読み取れる値として選定した。図 5.11 のように、主なピークが正に存在する場合は、 $-0.3[\text{m/s}^2]$ と設定した負の閾値を LH が下回り、その後正の閾値を越え、更にそれを下回った時に動作が行われたと判別する。主なピークが負に存在する場合は上記とは逆の処理を行う。図 5.12 に、これらの判別アルゴリズムのフローチャートを示す。

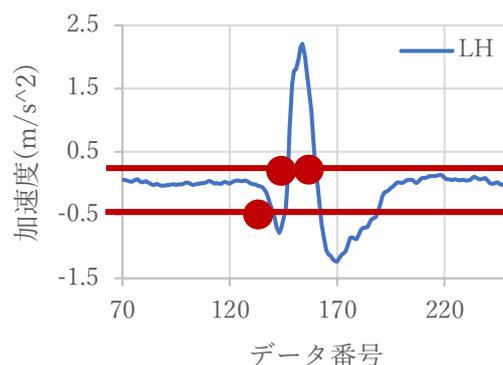


図 5.11 : z 軸 LH 波形の判別方法の例(改善後)

Fig.5.11. Example of determination method of z-axis LH wave pattern
(After improvement)

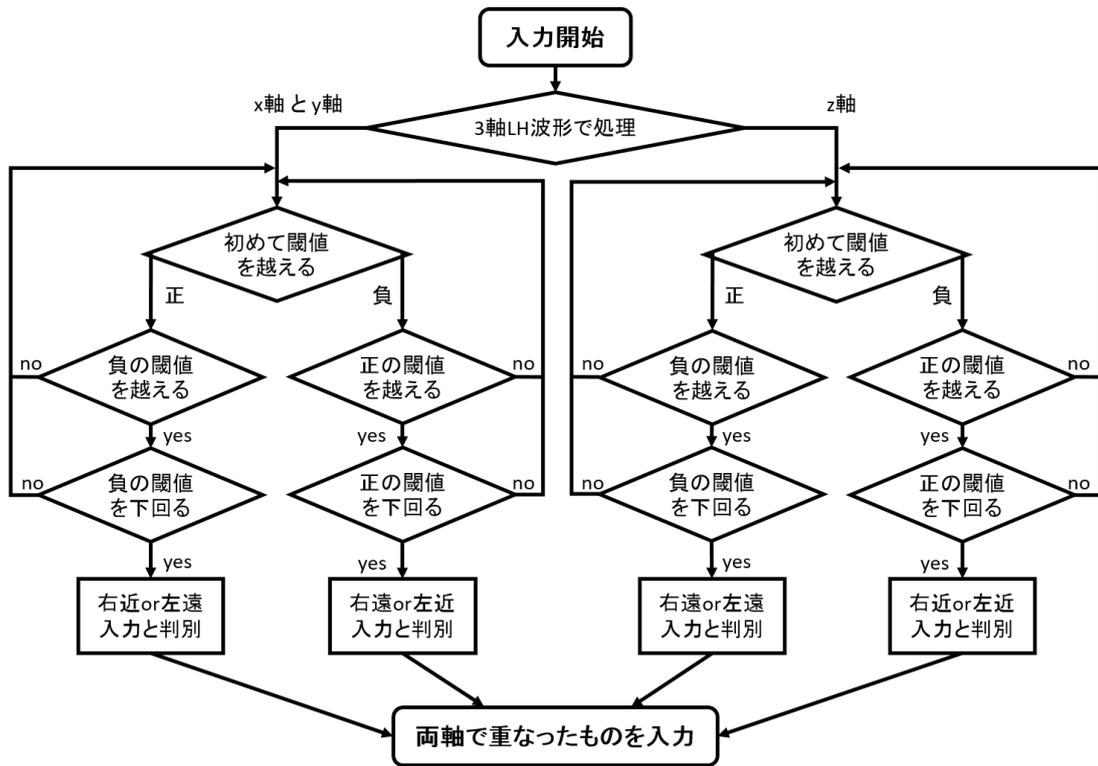


図 5.12 : 判別アルゴリズム(改善後)

Fig.5.12. Determination algorithm (After improvement)

5.5.5. 結果・考察

表 5.4 に、改善後の判別率をまとめたものを示す。表 5.4 より、全体の平均判別率は 93%、動作別の最低判別率は右近の 85%、被験者別の最低判別率は被験者 C の 88%であった。全体の未判別数は 0 回となり、誤判別も全体で 11 回であった。平均判別率も改善前から大きく向上したことから閾値の条件や z 軸成分の判別方法の改善が成功したと考えられる。

誤判別数 11 回のうち、右近が 6 回(左遠と 6 回誤判別)、左近が 5 回(右近と 2 回、左遠と 3 回誤判別)であった。右近の 6 回全ておよび左近のうち左遠と誤判別した 3 回は改善前と同じ理由から、z 軸成分の閾値を更に下げることによって改善が可能だと考えられる。しかし基準値付近は微細な変化を検知してしまい、逆に誤判別を引き起こす可能性があるため、最適な閾値を検討する必要がある。一方、左近のうち右近と誤判別した 2 回に関しては、z 軸成分は同様の特徴を持つことから、y 軸成分に対する判別方法を再検討することで改善が可能であると考えられる。

表 5.4 : 改善後の判別率まとめ(%)

Table.5.4. Summary of discrimination rate after improvement (%)

被験者	A	B	C	D	平均
右遠	100	100	100	100	100
右近	100	100	70	70	85
左遠	100	100	100	100	100
左近	90	90	80	90	88
平均	98	98	88	90	93

5.6. まとめ

本研究では、スマートデバイスにおいてタッチ操作に依存しない入力手法として、加速度センサを利用した手首動作入力を提案した。

実験 1 によって、提案動作には特徴的な加速度波形が観測されることを確認し、実験 2 によって判別に用いるフィルタ処理と波形を決定した。その後、作成した提案動作判別プログラムを用いてリアルタイム判別実験を重ね、平均判別率を 93%まで向上させることが出来た。また、改善を重ねることで判別率を更に向上できる可能性が示唆された。

今後は、Eye Glance 入力同様に動作を 4 選択肢から 8 選択肢に増加させることを目的とする。提案した 4 動作の動作時間に着目し、同じ動作でも入力動作にかかる時間が長いものと短いもので 2 種類に分割するようにプログラムを改善する。その後、Eye Glance 入力と同様に第 3 章で提案された画面デザインを用いて入力インタフェースとして実装し、その実用性を検討する方針である。

6. まとめ

6.1. 本研究の成果概要

本研究では、一般的に普及しているスマートフォンなどの小型の携帯情報端末に対する入力方法として、入力画面や入力対象の大きさに依存しない入力手法を検討した。解決方法として、一度に提示する選択肢を少なくし、入力動作を複数回繰り返させることで1つの入力動作とする少操作自由度・多選択肢型入力インタフェースを提案した。

第2章では、小型画面機器に対する入力のための画面デザインを提案した。横4×縦2の区画を二重に設けることで、操作自由度と画面占有率を低減しつつもQWERTY配列のような物理キーボードと同様のキー配列を利用できる画面デザインとなった。

第3章では、提案インタフェースの実現の先駆けとして、フリック操作を用いた入力方法を提案した。4ボタンに対して上下のフリック操作を行って8選択肢の中から1つを選ぶ動作を2回繰り返すことを1つの入力とすることで、64個の選択肢を利用可能にした。また、その評価実験を行い、有効性が示唆された。

第4章では、手を使わずに計算機に対して入力操作を行う手法として、視線入力を紹介した。また、一般的に用いられている注視入力に代わる手法として提案されているEye Glance入力の選択肢増加に関する検討を行った。入力にかかる時間の長短を利用して一度に提示できる選択肢を倍増し、2回の入力動作の組み合わせで64選択肢を利用できる可能性が示唆された。

第5章では、スマートフォンを把持する手を動かすことを入力ジェスチャとする手法を提案した。スマートフォンを小さく傾けてすぐに元に戻す動作を入力とし、スマートフォンに内蔵された加速度センサで計測することで、入力動作を識別できるような特徴的な波形を得ることができた。また、入力判別アルゴリズムを実装し、評価実験を行ったところ、90%以上の判別率が得られた。これにより、提案手法が入力ジェスチャとして利用できる可能性が示唆された。

これらの3手法は有効に利用できる状況が異なる。基本的にはタッチ操作を用いるが、タッチパネルの反応が悪いときなど、タッチ操作が適さない状況では視線入力やジェスチャ入力が望ましい。また、視線入力やジェスチャ入力にも個人によって得手不得手がある。状況やユーザの好みによって入力方法を切り替えることができる汎用的な入力インタフェースとしての運用が望ましいと考えられる。

6.2. 3種類の入力について

今回の研究では4×2の操作自由度を持つ3種類の異なる入力方法について検討した。これらの方法はすべてスマートフォンなどのデバイスに内蔵されたセンサのみで入力動作を計測しており、外部に特別な機器を装着することなく利用可能である。また、すべての入力手法において、同じ画面デザインを利用できるように設計されている。そのため、同じ画面デザインで複数の入力を利用できる。その性能を表6.1に示す。

表 6.1 : 3種類の入力方法の性能
Table.6.1. Performance of 3 input method (%)

入力方法	入力速度 (文字/min)	判別率(%)
タッチ入力	25	88.1
視線入力	15	75
ジェスチャ入力	-	93(4 択)

ジェスチャ入力については、動作の判別の可否を検討した段階であり、入力インタフェースとしての性能評価ができていない。また、判別率や誤入力率についても、他の2種類と異なり4選択肢でしか行っていない。そのため、現状では他の手法との性能比較は困難である。タッチ入力と視線入力について比較すると、入力速度も誤入力率もタッチ入力の方が優れていることが示された。しかし、これらの入力方法は使用できる条件や状況が異なる。表6.2に、各入力方法の有効な場面、そうでない場면을示す。

指を入力に利用できる場合にはタッチ入力があるが、手袋や指の乾燥度合いなどの影響でタッチパネルを利用できない場合には使用できない。また、パスワードのロック解除などのような、入力の軌跡を他人に見られたくない状況でも使用しづらい。これに対し、視線入力やジェスチャ入力はタッチパネルの状況に依存することなく使用できる。しかし、周囲の明るさの影響でカメラに眼球が映りづらい場合には視線入力を利用できない。また、ジェスチャ入力は小規模ながらも手首を動かす動作を伴うため、他人に見られることに抵抗を感じる場合もある。このように、入力方法によって有効な場合とそうでない場合があるため、状況や好みによって利用する入力方法をシームレスに切り替えられるような入力インタフェースを構築すれば、ユーザビリティの向上に繋がると考えられる。

表 6.2 : 各入力方法の有効性

Table.6.2. Effectiveness of each input method

	指入力可	指入力不可	環境	照度	装飾
タッチ	◎	×	△ (セキュリティ面)	○	△ (手袋など)
視線	○	○	○	△ (暗所など)	△ (サングラスなど)
ジェスチャ	○	○	△ (見られることに抵抗)	○	○

6.3. 今後の課題・展望

今回提案した3つの入力方法の今後の課題について述べる。

タッチ操作を用いた手法では、4つのボタンと上下のフリックによって8選択肢を実現した。しかし、画面下部にキーボードを配置したために、下部のメニューボタンに干渉するケースが見られた。これに対し、キーボード表示位置を文字表示画面直下に配置したり、特定の操作でキーボードを生成したりする方法が考えられる。

視線入力について、Eye Glance 入力で64選択肢の実現の可能性が示唆された。今後は文字入力を始めとした様々な条件下での入力実験を行い、入力インタフェースとしての評価を行う。

ジェスチャ入力について、スマートフォンに内蔵された加速度センサによって4つの入力ジェスチャを計測し、判別可能な特徴的な波形を得た。今後は選択肢の増加を中心に検討を進め、文字入力など多数の選択肢への対応を目標とする。

6.2で述べたように、本研究で提案した3つの入力方法は、入力画面を共有し、任意の入力方法によって入力を行うことが可能な設計となっている。しかし、それぞれの入力ジェスチャは動作のベクトルが異なるため、基本的なデザインは共有しながらも、それぞれの入力に合わせて画面デザインを調整する必要がある。そのため、入力内容や入力方法に合わせた最適な画面デザインを中心としたユーザインタフェースの設計が今後の課題である。

謝辞

最初に、ご多忙にも関わらず本論文をご審査頂いた電気通信大学大学院情報理工学研究科総合情報学専攻の板倉直明教授、内海彰教授、山田哲男准教授、水戸和幸准教授、及び水野統太准教授に感謝の意を表します。

本論文は、板倉・水野研究室の研究グループが取り組んできた入力インタフェースに関する研究を基に、著者らが行った研究の成果をまとめたものです。故に本研究は、板倉直明教授、水野統太准教授をはじめとする板倉・水野研究室の方々のご尽力の賜物と感謝しております。

特に板倉直明教授にあらまはしては、常にあたたかくお見守りくださり、研究に関する相談に乗って頂いた中で、適切なお助言およびご指導を何度も頂きました。また同じ研究グループとして共に入力インタフェースの研究を行った諸先輩方、諸後輩方のご協力のおかげで本研究を進めることが出来ました。筆者が研究を継続し、まとめることが出来たのは先生方および研究室の学生諸氏の御助力があった故と心より感謝いたします。

参考文献

- [1] 総務省, “平成 28 年版情報通信白書” 第 2 部 基本データと政策動向, 第 2 節 ICT サービスの利用動向, <
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h28/html/nc252110.html>>, [accessed 20 November 2018], 2016
- [2] 総務省, “平成 29 年度情報通信白書”(グラフを加工して利用), <
<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h29/html/nc262110.html>> [Accessed 10 October 2017], 2017
- [3] 博報堂 DY メディアパートナーズ, メディア環境研究所, “メディア定点調査 2018”, <
<http://mekanken.com/mediasurveys/>>, [accessed 20 November 2018], 2018
- [4] 内閣府, “平成 29 年度 青少年のインターネット利用環境実態調査”, 政府統計, 2018
- [5] Katie A. Siek, Yvonne Rogers, and Kay H. Connelly, “Fat finger worries: how older and younger users physically interact with pdas”, Proc. the 2005 IFIP TC13 international conf. Human-Computer Interaction (INTERACT), pp. 267-280, 2005
- [6] Mitsuhiro Y, Akihiko M, Jedd Bebedict, Kris T. Mahilum, “Moving IME panel for text input method and Shapekey prototype”, 2013 IEEE 2nd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), pp.474-478, 2013
- [7] 小町守, 木田泰夫, “スマートフォンにおける日本語入力の現状と課題”, 言語処理学会第 17 回年次大会論文集, 2011
- [8] KDDI, “「音声操作」インターフェースとしての可能性”, ニュースリリース, <
<https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2017/10/05/besshi2726.html>>, [Accessed 10 October 2018]
- [9] 大野健彦, 武川直樹, 吉川厚, “2 点補正による簡易キャリブレーションを実現した視線測定システム”, 情報処理学会論文誌, Vol.44, no.4, pp.1136-1149, 2003
- [10] 平山健一, 小枝正直, “スマートフォンにおける片手親指特性を考慮した文字入力方式の提案と実装”, 情報処理学会第 75 回全国大会, 3ZA-7, 2013
- [11] 西村 崇宏, 瀬尾 明彦, 土井 幸輝, “スイッチのサイズ及び形状が抵抗膜方式タッチパネル携帯端末の操作性に及ぼす影響について”, 日本機械学会論文集 C 編, 77(780), pp.3036-3046, 2011
- [12] 井川洋平, 宮下芳明, “アイズフリーで速記できる「方向のみ」のフリック入力手法”, 情報処理学会インタラクティブシステム 2013, pp.651-656, 2013
- [13] 深津佳智, 志築文太郎, 田中二郎, “No-look Flick: 携帯情報端末のタッチパネルにおける片手かな文字入力システム”, 第 20 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, WISS2012, pp.133-138, 2012
- [14] 箱田博之, 深津佳智, 志築文太郎, 田中二郎, “タッチパネル端末における 2 本指を用い

- たアイズフリーかな文字入力手法”, IPSJ SIG Technical Report, Vol2013, HCI-154, No.6, 2013
- [15] 松浦 吉祐, 郷 健太郎, “小型タッチ画面における片手親指の操作特性”, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.9, No.4. pp.37-44, 2007
- [16] Huy VietLe, Sven Mayer, Patrick Bader, Niels Henze, “Fingers' Range and Comfortable Area for One-Handed Smartphone Interaction Beyond the Touchscreen”, CHI '18 Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Paper No. 31, 2018
- [17] Flit Keyboard, <<https://sites.google.com/site/flitkeyboard/home>> [Accessed 10 October 2018]
- [18] FlickKey Mini, <http://www.flickkey.com/FlickKey_Mini.html> [Accessed 10 October 2018]
- [19] 久保勇貴, 志築文太郎, 田中二郎, “ベゼル間の距離の短さを利用した超小型端末向けタッチジェスチャ”, 情報処理学会論文誌, 58(5), pp.1061-1072, 2017
- [20] Oney, S., Harrison, C., Ogan, A., and Wiese, J., “ZoomBoard: a diminutive QWERTY soft keyboard using iterative zooming for ultra-small devices”, Proc. CHI 2013
- [21] Jonggi Hong, Seongkook Heo, Poika Isokoski, Geehyuk Lee, “SplitBoard: A Simple Split Soft Keyboard for Wristwatch-sized Touch Screens”, Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.1233-1236, 2015
- [22] Xiang 'Anthony' Chen, Tovi Grossman, and George, Fitzmaurice, “Swipeboard: A Text Entry Technique for Ultra-small Interfaces That Supports Novice to Expert Transitions”, Proc. UIST 2014. pp.615-620, 2014
- [23] 下岡純也, 山名早人, “スマートウォッチにおけるタップ動作の少ない仮名文字入力手法”, DEIM Forum 2017 I3-2, 2017
- [24] 千田進, 松野省吾, 明比宏太, 板倉直明, 水野統太, 水戸和幸: スマートデバイスにおける小操作自由度・多選択肢型文字入力方式の提案と検討, 電気学会研究会, 光・量子デバイス研究会 医療工学応用一般, OQD-16-054, 2016.
- [25] 箱田博之, 志築文太郎, 田中二郎, “タッチパネル端末向け縦型 QWERTY キーボードの性能評価”, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) 2014-HCI-156(18), pp.1-7, 2014
- [26] 伊藤和幸, 数藤康雄, 伊福部達: “重度肢体不自由者向けの視線入力式コミュニケーション装置”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J83-D-I, No.5, pp.495-503, 2000
- [27] 佐藤寛修, 阿部清彦, 大山実, 大井尚一: “視線入力による重度肢体不自由者向けコンピュータ操作支援システム”, 信学技報, Vol.105, No.507, pp.15-20, 2006
- [28] 宮田洋(編), “眼球運動”, 新生理心理学 I 巻, pp.256-265, 1998
- [29] 産業技術総合研究所人間福祉医工学研究部門(編), “眼球諸機能の計測”, 人間計測ハンドブック, pp.119-127, 2013
- [30] 日本生理人類学会計測研究部会(編), “人間科学計測ハンドブック”, pp.268-272, 1996
- [31] 高野博史, 大藪勇希, 中村清実, “瞳孔の相対的な位置情報を用いた眼球運動のみによる非接触型入力装置の開発”, 知能と情報, 26 巻 2 号, pp.573-580

- [32] 阿部清彦, 仲山泰弘, 大井尚一, 大山実, “視線によるマウス操作補助システム”, 電気学会論文誌 C, vol.129, no.9, pp.1705-1713, 2009
- [33] 新井康平, 上滝寛美, “利用者の動きを許容する黒目中心検出による視線推定に基づくコンピュータ入力システム”, 電気学会論文誌 C, 127 巻 7 号, pp.1107-1114, 2007
- [34] 大矢哲也, 川澄正史, “眼電図による ALS コミュニケーションツールの入力動作の研究”, 生体医工学, 43 巻 1 号, pp.172-178, 2005
- [35] Barea R, Boquete L, Mazo M, López E, “System for assisted mobility using eye movements based on electrooculography”, IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, Vol.10, no.4, pp.209-217, 2002
- [36] R. BareaL. BoqueteM. MazoE. López, “Wheelchair Guidance Strategies Using EOG”, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol.34, Issue.3, pp.279–299, 2002
- [37] 下田宏, 二階堂義明, 梅田直樹, 林直樹, 吉川榮和, “頭部装着型インタフェースデバイス(HIDE)の試作と機能評価”, 計測自動制御学会論文集 36(11), 972-979, 2000
- [38] 板倉直明, 太田拓臣, 清水豊, “ヘッドマウントディスプレイと交流増幅眼電図を用いた視線注視入力インタフェース”, ヒューマンインタフェース学会誌, , Vol.9, No.4, pp.493-502, 2007
- [39] N. Itakura, K. Sakamoto, “A new method for calculating eye movement displacement from AC coupled electro-oculographic signals in head mounted eye-gaze input interfaces”, Biomedical Signal Processing and Control, vol.5, no.2, pp.142-146, 2010
- [40] 起田貴成, Prima Oky Dicky Ardiansyah, 伊藤久祥, 堀江友祐, “共同注視可能なメガネ型視線計測機器の開発”, 情報処理学会 第 78 回全国大会講演論文集, 5Z-06, 2016
- [41] 薄井智貴, 坂匠, 山本俊行, “ウェアラブルメガネを用いた視線方向の推定に関する一考察”, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2016)シンポジウム, pp.1172-1174, 2016
- [42] 大野健彦, “視線を用いたインタフェース”, 情報処理 44(7), pp.726-732, 2003
- [43] Boris Velichkovsky, Andreas Sprenger, Pieter Unema, “Towards gaze-mediated interaction: Collecting solutions of the “Midas touch problem””, Human-Computer Interaction: INTERACT'97, pp.509-516, 1997
- [44] Hana Vrzakova, Roman Bednarik, “That's not norma(n/l)! A detailed analysis of midas touch in gaze-based problem-solving”, Proceeding CHI EA '13 CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp.85-90, 2013
- [45] Diogo de Graça Pedrosa, Maria da Graça Campos Pimentel, Amy Wright, Khai N. Truong, “Filteryedping design challenges and user performance of dwell-free eye typing”, ACM Transactions on Accessible Computing, Vol.6, no.1, 1-37, 2015
- [46] Mollenbach, E., Hansen, J. P., Lillholm, M., & Gale, A. G, “Single stroke gaze gestures”, Proceedings of the 27th international conference extended abstracts on Human factors in

- computing systems, pp.4555–4560, 2009
- [47] Andrew Kurauchi, Wenxin Feng, Ajjen Joshi, Carlos Morimoto, Margrit Betke, “EyeSwipe: Dwell-free Text Entry Using Gaze Paths”, Proceedings of the 34th SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '16, pp. 1952–1956, 2016
- [48] 板倉直明, 山盛元, 水戸和幸: “交流増幅眼電図を用いた Eye Gesture 入力インタフェース”, 電気学会電子, 情報, システム部門大会講演論文集, MC6-5, pp.772-776, 2009
- [49] 板倉直明, 太田拓臣, 坂本和崇, “視線入力インタフェースのための交流増幅眼電図による視線移動量算出方法の検討”, 電子情報通信学会論文 D, J90-D/ 10, pp.2903-2913, 2007
- [50] 伊藤雄太, 板倉直明, 水戸和幸, 水野統太, “Eye Glance 入力インタフェースにおける判定アルゴリズム”, 電気学会論文誌 C(電子・情報・システム部門誌), Vol. 134, No. 7 pp.924-930, 2014
- [51] 久野悦章, 八木透, 藤井一幸, 古賀一男, 内川嘉樹, “EOG を用いた視線入力インタフェースの開発”, 情報処理学会論文誌, Vol.39, No.5, pp.1455- 1462, 1998
- [52] 太田拓臣, 板倉直明, 坂本和義, 廣瀬卓, “交流眼電図を用いた視線入力インタフェース”, 信学技報, Vol.103, No.522, pp.37-42, 2003
- [53] 松野省吾, 伊藤雄太, 明比宏太, 板倉直明, 水野統太, 水戸和幸, “斜め視線移動を用いた多選択肢入力インタフェースの開発”, 電気学会論文 C, Vol.137, No.4, pp.621-627, 2017
- [54] 高トククン, 中井直輝, 板倉直明, 水戸和幸, 水野統太, “Eye Gesture 入力インタフェースシステムの開発”, 信学技報, Vol.112, No.46, pp.31-36, 2012
- [55] 明比宏太, 水野統太, 水戸和幸, 板倉直明, “Open Computer Vision Library を用いた Eye Glance 入力インタフェース”, 平成 25 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, OS13-4, 2013
- [56] 明比宏太, 水野統太, 水戸和幸, 板倉直明, “ビデオカメラを用いた非接触な視線入力インタフェースの検討”, 電気学会論文誌 C, Vol.137 No.4, pp.628-633, 2017
- [57] G. Farneback, “Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion”, 13th Scandinavian Conference, SCIA 2003 Halmstad, Sweden, 2003
- [58] 多田英興, 山田富美雄, 福田恭介, “まばたきの心理学”, 北大路書房, 1991
- [59] 新井康平, 矢島健郎, “視線入力による会話支援システム”, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌) , 128 卷 11 号 p. 1679-1686, 2008
- [60] B.C.Chen, P.C.Wu, and S.y Cien, “Real-time eye localization, blink detection, and gaze estimation system without infrared illumination”, 2015 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), pp.715-719, 2015
- [61] Shogo Matsuno, Sorao Saitoh, Susumu Chida, Kota Akehi, Naoaki Itakura, Tota Mizuno, Kazuyuki Mito, "Eye-Movement Measurement for Operating a Smart Device", IEEE Region 10 Conference 2016, 2016
- [62] 山下大輔, 間博人, 松井健人, 三木光範, “内蔵照度センサによるハンドジェスチャ認識

- を用いたモバイルアプリケーションの検討”, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション(HCI), 2015-HCI-165, no.4, pp.1-8, 2015
- [63] 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”, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) 2016 (11), pp.1-8, 2016
- [64] Zhihan Lv, Alaa Halawani, Muhammad Sikandar Lal Khan, Shafiq Ur Rehman, Haibo Li, “Finger in Air: Touch-less Interaction on Smartphone”, Proceedings of the 12th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia 2013, Luleå, Sweden, luleå, sweden, 2013
- [65] Goel M, Lee B, Aumi I. T. Md, Patel S, Borriello G, Hibino S, Begole J, ”SurfaceLink: Using Inertial and Acoustic Sensing to Enable Multi-device Interaction on a Surface”, Proc CHI 2014, pp.1387-1396, 2014
- [66] 青山周平, 阿部哲也, 志築文太郎, 田中二郎, “ThumbSlide: 親指スライドジェスチャによるスマートウォッチ操作手法”, WISS2015 第23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, 2015
- [67] Jun Gong, Zheer Xu, Qifan Guo, Teddy Seyed, Xiang ‘Anthony’ Chen, Xiaojun Bi, Xing-Dong Yang, “WrisText: One-handed Text Entry on Smartwatch using Wrist Gestures”, Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2018
- [68] 馬雪詩, 北原格, 亀田能成, “歩行中の手指ジェスチャ入力と音によるフィードバックの検討”, 信学技報, vol. 116, no. 245, MVE2016-16, pp.89-92, 2016

関連論文の印刷公表の方法及び時期

1. 著者：明比宏太，松野省吾，板倉直明，水野統太，水戸和幸
論文題目：ビデオカメラを用いた非接触な視線入力インタフェースの検討
印刷公表の方法及び時期：電気学会論文誌 C, 137/4, 628-633, 2017
(第4章の内容)
2. 著者：K. Akehi, S. Matsuno, N. Itakura, T. Mizuno, K. Mito
論文題目：Non-contact Eye-Glance Input Interface Using Video Camera
印刷公表の方法及び時期：Journal of Signal Processing, 21/4, 207-210, 2017
(第4章の内容)

参考論文の印刷方法及び公表時期

1. 著者：千田進，松野省吾，明比宏太，板倉直明，水野統太，水戸和幸
論文題目：スマートデバイスにおける少操作自由度・多選択肢型文字入力方式の提案と検討
印刷公表の方法及び時期：電気学会研究会，光・量子デバイス研究会 医療工学応用一般, 2016
(第3章の内容)
2. 著者：明比宏太, Aliabadi Farahani Marzieh, 水戸和幸, 水野統太, 板倉直明
論文題目：画像処理による Eye Glance 入力インタフェースの多選択肢化に関する検討
印刷公表の方法及び時期：平成30年電気学会電子・情報・システム部門大会, 2018
(第4章の内容)
3. 著者：松浦隼人, 明比宏太, Aliabadi Farahani Marzieh, 水戸和幸, 水野統太, 板倉直明
論文題目：スマートデバイス向け手首動作入力インタフェースの検討
印刷公表の方法及び時期：平成30年電気学会電子・情報・システム部門大会, 2018
(第5章の内容)

著者略歴

明比 宏太 (あけひ こうた)

- 1990年 7月 愛媛県生まれ
- 2009年 4月 電気通信大学電気通信学部システム工学科入学
- 2013年 3月 電気通信大学電気通信学部システム工学科卒業
- 2013年 4月 電気通信大学大学院電気通信学研究科システム工学専攻
博士前期課程入学
- 2015年 3月 電気通信大学大学院電気通信学研究科システム工学専攻
博士前期課程修了
- 2015年 4月 電気通信大学大学院情報理工学研究科総合情報学専攻
博士後期課程入学
- 2019年 3月 電気通信大学大学院情報理工学研究科総合情報学専攻
博士後期課程修了見込