

NAIST-IS-MT0251104

## 修士論文

# AirGrabber: 小型カメラと傾斜センサを用いた バーチャルキーボード

藤本 昌宏

2004年2月6日

奈良先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科 情報処理学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に  
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

藤本 昌宏

審査委員： 千原 國宏 教授  
木戸出 正繼 教授  
眞鍋 佳嗣 助教授

# AirGrabber: 小型カメラと傾斜センサを用いた バーチャルキーボード\*

藤本 昌宏

## 内容梗概

近年のハードウェア技術の進歩により，コンピュータ本体および周辺機器の小型・軽量化が実現したことで，小型のコンピュータを身体に装着して使用するウェアラブルコンピュータが実用化されつつある．その一方で，ウェアラブルコンピュータを操作するための，従来のキーボードに代わる携帯型文字入力インタフェースも提案されているが，それらは機能や使用環境の制限，操作方法の特殊性等の理由から，使いづらいものが多いのが現状である．

本論文では，ウェアラブルコンピュータへの適用を考慮に入れた，既存のキーボードを使用する感覚で指を動かすことで文字入力を可能にするバーチャルキーボード“AirGrabber”を提案，構築し，実験によりその有効性を示す．

AirGrabberは，何も無い空間での指の動きを，手首に装着した小型カメラを用いて動画像処理により認識し，キーの打ち分けを行う際には傾斜センサを利用する．したがって，動作に必要な機器が手首部分だけでまとまるため，持ち運びに適し，直感的な入力を可能とする新たな文字入力インタフェースであると言える．

## キーワード

ウェアラブルコンピュータ，バーチャルキーボード，非接触タイピング，小型カメラ，傾斜センサ

---

\* 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報処理学専攻 修士論文，NAIST-IS-MT0251104, 2004年2月6日．

# AirGrabber: Virtual Keyboard using a Miniature Camera and a Tilt Sensor\*

Masahiro Fujimoto

## Abstract

The recent developments of computer hardware have stimulated a reduction in the size and weight of personal computers and their peripheral units. While Wearable Computers have been put to practical use, user interfaces are also required for portability in stead of carrying a conventional keyboard to type characters. Some devices have been proposed and provided for this demand. However, they are hard to use because of their restrictions for functionalities and circumstances to use or extremely special operational method.

This paper presents “AirGrabber” a virtual keyboard suitable for Wearable Computers, which can enter characters by moving fingers like typing an existing keyboard in the air. And our experimental results show the effective performance in terms of actual typing situations.

AirGrabber detects key strokes and selected keys by monitoring the motions of the fingers and hand by a miniature camera and a tilt sensor equipped on the user’s wrist. Therefore, this system is easy to carry and enables the user to enter characters intuitively.

## Keywords:

wearable computer, virtual keyboard, contactless keyboard, miniature camera, tilt sensor

---

\* Master’s Thesis, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0251104, February 6, 2004.

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
<b>第2章</b>	<b>文字入力インタフェース</b>	<b>3</b>
2.1.	キーボードの特徴	3
2.2.	可搬型文字入力インタフェース	4
2.2.1	小型キーパッド型	4
2.2.2	卓上投影型	8
2.2.3	グローブ装着型	8
2.2.4	ブレスレット装着型	12
2.2.5	先行研究のまとめ	13
<b>第3章</b>	<b>AirGrabber</b>	<b>15</b>
3.1.	仮想的なタイピングによる文字入力	15
3.2.	タイピング可能なキーの認識	17
3.3.	タイピング動作の認識	18
3.3.1	手領域抽出	19
3.3.2	指先検出	20
3.3.3	タイピング動作の検出	22
3.4.	実装機能	25
3.4.1	基本的な操作方法	25
3.4.2	画面への提示	26
<b>第4章</b>	<b>評価実験</b>	<b>29</b>
4.1.	実験概要	29

4.2.	試作システム	30
4.3.	タイピング可能なキー選択の動作精度評価	32
4.3.1	実験目的	32
4.3.2	実験方法	32
4.3.3	結果	34
4.3.4	アンケート結果	36
4.3.5	考察	37
4.4.	タイピング動作認識の精度評価	38
4.4.1	実験目的	38
4.4.2	実験方法	38
4.4.3	結果	40
4.4.4	アンケート結果	40
4.4.5	考察	44
4.5.	文章入力による評価	47
4.5.1	実験目的	47
4.5.2	実験方法	47
4.5.3	結果	48
4.5.4	アンケート結果	50
4.5.5	考察	51
<b>第5章</b>	<b>システムの考察</b>	<b>55</b>
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>62</b>
	<b>謝辞</b>	<b>64</b>
	<b>参考文献</b>	<b>65</b>

# 目 次

2.1	L3 Systems, WristPC Keyboard . . . . .	6
2.2	Matias Corporation, halfkeyboard . . . . .	6
2.3	FrogPad 社, FrogPad . . . . .	6
2.4	Handykey Corporation, Twiddler2 . . . . .	7
2.5	富士通研究所, SH-Keys . . . . .	7
2.6	Canesta, Canesta Keyboard . . . . .	9
2.7	VKB, Virtual Keyboard . . . . .	9
2.8	Virtual Devices, VKey . . . . .	9
2.9	Thumbcode . . . . .	9
2.10	Key-Glove . . . . .	9
2.11	PinchGloves . . . . .	10
2.12	Kittytech, KITTY . . . . .	11
2.13	Samsung Corporation, Scurry . . . . .	11
2.14	Essential Reality, P5 glove . . . . .	11
2.15	オリンパス株式会社, ウェアラブル操作インタフェース . . . . .	11
2.16	Senseboard Technologies, Senseboard . . . . .	11
2.17	NTT ヒューマンインタフェース研究所, FingeRing . . . . .	11
2.18	Lightglove 社, Lightglove . . . . .	13
3.1	手の位置とタイピング可能なキー . . . . .	16
3.2	AirGrabber 装着図 . . . . .	17
3.3	キー候補選択の動き . . . . .	18
3.4	処理の流れ図 1 . . . . .	19

3.5	処理の流れ図 2	19
3.6	指先検出	21
3.7	下向きのアーチ状部分探索	21
3.8	五指の座標の時間変化	23
3.9	提示画面	26
3.10	タイピング可能候補キー選択	27
3.11	入力文字種類変更	28
4.1	試作システム	30
4.2	試作システム動作画面	31
4.3	仮想キーボード上のタイピングエリア	33
4.4	タスク 1 の所要時間の平均値	35
4.5	タスク 2 の所要時間の平均値	35
4.6	5 段階評価アンケート結果	36
4.7	認識ミスがあった人数	42
4.8	誤入力があった人数	42
4.9	過入力があった人数	42
4.10	5 段階評価アンケート結果	43
4.11	タイピング動作が 10 回認識されるまでのエラー発生回数の合計の 平均	46
4.12	所要時間と総タイプ数の分布図	49
4.13	5 段階評価アンケート結果	50
5.1	タイピング動作と判断できる親指の動き	58
5.2	タイピング動作と判断できない親指の動き	58
5.3	独立して動かし難い薬指の動き	58
5.4	指が重なって映った場合	59
5.5	指と指の間の輪郭線	60

# 表 目 次

2.1	各入力方式の長所と短所 . . . . .	14
4.1	タスク 1 の移動平均所要時間 . . . . .	34
4.2	タスク 1 の移動平均所要時間の平均 . . . . .	34
4.3	タスク 2 の移動平均所要時間 . . . . .	34
4.4	認識ミスがあった人数 . . . . .	41
4.5	誤入力があった人数 . . . . .	41
4.6	過入力があった人数 . . . . .	41
4.7	タイピング動作が 10 回認識されるまでのエラー発生回数の合計の 平均 . . . . .	46
4.8	文字入力タスク結果 . . . . .	49
4.9	被験者 e の誤入力の詳細 . . . . .	52
4.10	被験者 e を除いた平均値 . . . . .	52

# 第1章 序論

小型のコンピュータを身体に装着し、時と場所を問わずに情報パートナーとして利用するウェアラブルコンピューティング社会が実現されつつある。

世界最初のコンピュータと称される ENIAC は、高さ 9 フィートのキャビネット 40 個に、1 万 8 千本近くの真空管から構成され、その重量は 30 トンもあり、床面積 1,800 平方フィート（約 167 平方メートル）という途方もない設置スペースが必要であった [1]。その数十年後には机の上に設置可能な、いわゆるデスクトップコンピュータが登場したが、依然としてユーザは使用の際に計算機が設置してある場所へ移動しなければならなかった。しかし、近年のハードウェア技術の急速な進歩によって、運ぶことすら容易ではなかったコンピュータは、ノートパソコンや PDA といったモバイルコンピュータ、携帯電話のような移動端末に姿を変えた。さらにはこのモバイルコンピュータの新しい利用形態として、時と場所を問わずに利用可能にしようという考えに基づき、コンピュータを身体に装着することで携帯性と利便性を向上する、ウェアラブルコンピュータが提案されている。

ウェアラブルコンピュータが現実のものとなった要因は、コンピュータの構成機器の劇的な小型化とそれに伴う形状の変化であろう。まず、コンピュータ本体やハードディスクドライブ等が著しく小型化され、軽量化に成功した。また、ディスプレイも小型化され、ウェアラブルコンピュータへの適用の際には頭部に小型のモニターを装着する、いわゆるヘッドマウントディスプレイ (HMD) に形態を変えて映像を提示している。しかしコンピュータ本体や周辺機器が目覚しく小型化し変形されていく一方で、文字入力インタフェースであるキーボードには、大きさや形における劇的な変化が見られない。

キーボードの起源はコンピュータが現れるよりも以前の、19 世紀後半のタイプライターの登場にまで遡る。以来、構造は機械式から電子式へ、文字を入力する

対象は紙から電子機器へと変化してきたが、基本的な操作方法である“数多くの並べられたキーを両手の指でタイプして文字入力を行う”という、タイピングによる文字入力のスタイルは今現在に至るまで不変である。したがって、キーボード及びその文字入力のスタイルは、人間にとって最も長く親しまれ続けた、自然なものであると言える。

ウェアラブルコンピュータへの適用を考慮すれば、キーボードも小型化されることが自然である。しかし、キーボードは人間の手や指等の操作機構の物理的サイズに依存せざるを得ないことから、小型化されるほどユーザにとっては使い辛くなってしまうため、可搬性と操作性とが容易に両立し難いという問題を抱えている。

そうした趨勢の中で、既存のキーボードの代わりに、キーボードと同等または類似した機能と、既存のキーボードには無い可搬性とを兼ね備えた仮想のキーボード（バーチャルキーボード）がいくつか提案され、報告されている [2, 3]。しかし、それらは機能や使用環境の制限が多かったり、操作方法が特殊すぎる等の理由から使いづらいものが多く、ウェアラブルコンピュータに適した、既存のキーボードの代替となりうる文字入力インタフェースが未だ存在しないのが現状である。

本論文では、ウェアラブルコンピュータを利用する上で必要不可欠となる文字入力インタフェースに焦点を当て、既存のキーボードと類似した使用感で、キーボードを必要とせずに文字入力が可能となる仮想的な文字入力システム“AirGrabber”を提案する。

以下、本論文の章構成とその概要を述べる。

第2章では、既存のキーボードの特徴であるタイピングについて述べ、これまでに報告されている先行研究を概観する。

第3章では、本研究で提案する文字入力システム“AirGrabber”の概要およびその実現手法、実装した機能について述べる。

第4章では、AirGrabberを実際に用いて、その動作精度およびユーザビリティについて評価を行う。

第5章では、AirGrabberシステム全体について考察する。

第6章では、結論を述べて本論文を総括するとともに、その意義、および今後の課題について述べる。

## 第2章 文字入力インタフェース

### 2.1. キーボードの特徴

既存のPC用文字入力インタフェースであるキーボードの外見的な特徴は、数十個ほどのキーが定められた配列(主にQWERTY配列)に沿って並べられていることである。機能的な特徴としては、これら数十個のキーと文字とがほぼ一対一対応(1自由度)であるということと、キーを指で叩く、いわゆるタイピングによって文字入力を行うこと、そして入力の際に全ての指を使用可能であることが挙げられる。これらの特徴により、入力したい文字を出現させるまでにキーを押す回数がほとんどの場合1回で済むため、ある程度習熟すれば全ての指を用いて視覚に頼らずに高速かつ確実に文字入力が行えるという長所がある。

この“タイピングによる文字入力”のスタイルは、第1章でも述べたように1世紀以上の長きにわたって広く人々に親しまれてきた文字入力方法であり、キーボードの最大の特徴と言える。

短所としては、操作する人間の手や指等の物理的サイズに依存せざるを得ないことから、操作性を考慮すると各々のキー及びキー同士の間隔にある程度の大きさが必要となり、結果としてキーボード全体の大きさも小型化に限界があることである。例えば、多くのキーが並べられている既存のキーボードのような文字入力インタフェースは、キー同士の間隔が14mm以下で配置されていると入力速度が低下し、疲労度・入力ミス等が増加する傾向にあることが知られている[4]。したがって、持ち運びや任意の場所での使用にはあまり向いていないと言える。

## 2.2. 可搬型文字入力インタフェース

ウェアラブルコンピュータは時と場所を選ばずに常に使用できる点が最大の特徴であることから、ユーザが操作に使用する文字入力インタフェースもこの特徴を備えていなければならない。このため、ウェアラブルコンピュータにふさわしい文字入力インタフェースとしては、持ち運びが容易であることはもちろん、

- 任意の場所で使用可能か
- 入力操作が容易か
- 装着時に身体がどのくらい拘束されるか
- キー入力作業以外の動作の妨げにならないか

等の点を考慮する必要があると考える。

現在、キーボードの特長を保持したまま、既存の PC 用キーボードに代わる可搬型の文字入力インタフェースとして提案された代表的なものには、以下のようなものが挙げられる。

1. 小型キーパッド型
2. 卓上投影型
3. グローブ装着型
4. ブレスレット装着型

以下の小節では、各々について、上述した点を考慮しつつ詳述していく。

### 2.2.1 小型キーパッド型

本小節で述べるものは、

- 既存のキーボードと形状が類似したもの
- 既存のキーボードとは形状が異なるもの

の二種類に分けられる。

## 既存のキーボードと形状が類似したもの

図 2.1 に示す L3 Systems の WristPC Keyboard[5] は、必要となるアルファベット部分とその他最低限の部分を残してキーボードを小型化した形状をしており、図に示すように一方の腕の前腕部に装着し、他方の腕の手で使用される。

装着部位の面積を考慮して配置キー数を減らしたものとして、図 2.2 に示す Matias Corporation の halfkeyboard[6, 7] がある。これも同様に腕部に装着して片手で使用されるものであるが、図に示すようにキーボードのアルファベット部分の左半分だけの作りになっている。残りの右半分の文字はスペースキーを押しながらキー入力することで入力可能となっており、全ての文字が入力可能である。

さらによりキー数を減らしたものとして、図 2.3 にしめす FrogPad 社の FrogPad[8] と呼ばれる片手操作キーパッドがある。キーは 20 個だけであるが、多用されるキーをデフォルトでタイプできる配置にし、残りは他のキーとの同時押しにしてあることで、二本の指だけで全てのキーの入力が可能となっている。なお、これは腕部分に装着することを前提として作られたものではない。

例に挙げたこれらは腕部に常に装着すること、または十分に小型化されたことで可搬性に富み、キー入力による確実な文字入力が可能となっている。しかし、WristPC Keyboard は装着部位の面積的な問題からキー一つ当たりの面積およびキー間隔が狭くなりすぎている。halfkeyboard や frogpad は、キーボードを構成するキー数を削減することにより面積的な問題は軽減されているが、文字入力の際にキー同時押し等の特殊な操作が必要となってしまうことから、必ずしも使いやすくなるとは言えない。また、装着するタイプのもものは使用の際に装着部位に手を移動させなければならず、煩わしさも生じる。



図 2.1 L3 Systems, WristPC Keyboard



図 2.2 Matias Corporation, halfkey-board



図 2.3 FrogPad 社, FrogPad

### 既存のキーボードとは形状が異なるもの

図 2.4 に示す Handykey Corporation の Twiddler2[9] は、片手入力タイプのキーボード及びトラックボールが一体化した入力インタフェースであり、片手で完全に操作できることから携帯性に優れている。しかし、構成されるキー数が少ないため、文字入力には複数キーの同時押しなどの特殊な指使いが必要であることと、各キーおよびキー間隔が狭いことから、使用の際には器用さが求められ、疲労感を感じやすいとも報告されている [10]。



図 2.4 Handykey Corporation, Twiddler2



図 2.5 富士通研究所, SH-Keys

富士通研究所の SH-Keys は、カード型のキーパッドを片手でカスタネットのように把持しながら使用するものであるが [11] (図 2.5 左)、現在は Palm 用の片手キーボードとして販売されている [12] (図 2.5 右)。この SH-Keys は、各キーに二つの文字を割り当てることで構成キー数を減らしてある。操作方法はこのキー構成を考慮し、まず二つの文字の区別はせず個々の文字を入力してしまう。次に一つの語を入力しきった最後で、入力したキーの組み合わせから考えられる単語の候補の中から、意図する単語を選択することで、入力文字を決定する。この操作は、一つのキーを複数回連打して各個文字を決定していく方式 (例: 携帯電話の数字キーパッド) や、複数キー同時入力が必要となる方式と比較すると入力速度の面で優れている。しかし、一度に入力した単語の長さに応じて、入力したキーの組み合わせから考えられる単語の候補数が指数関数的に増加してしまう問題がある。

### 2.2.2 卓上投影型

本小節で述べるタイプは、机などの平面上にキーボードの映像を投影し、その投影面を指で触ることで文字入力が可能となるものである。このような投影型のキーボードとして、次ページの図 2.6 に示す Canesta の Canesta Keyboard[13]、図 2.7 に示す VKB の Virtual Keyboard[14]、図 2.8 に示す Virtual Devices の VKey[15]、等が報告されている。実際のキーボードを持ち運ぶことなく既存のキーボードを再現した、視覚的にもまさにバーチャルキーボードと呼べるインタフェースである。これらは平面に可視光でキーボードを投影すると同時に赤外光も照射しており、投影面を指で叩いた時に赤外光の反射率が変化するのを認識することでキー入力を判断している。しかしこれらは投影面となる安定した十分な広さの平面が無ければ使用できないため、使用場所が限定されてしまう。

### 2.2.3 グローブ装着型

本小節で述べるタイプは、

- ボタンが付いた手袋を装着するもの
- グローブ型計測装置を装着するもの
- 手にアクセサリーの類を装着するもの

の三種類に分けられる。

#### ボタン付き手袋装着型

入力ボタンがたくさん付着した手袋を装着するものとして、図 2.9 に示す Thumbcode[16] や、図 2.10 に示す Key-Glove[17] などがある。これらは主に親指でそれぞれのボタンを押す事で各ボタンに応じたキーが入力されるが、ボタン数が少ないため一つのキーを入力する際に複雑な操作が必要となることや、携帯の数字キーパッドのように一つの指で何度もボタンを押す必要があるため、操作性が良いとは言えない。また、この手袋を装着したままでキー入力操作以外の作業をするのは不便である。



图 2.6 Canesta, Canesta Keyboard



图 2.7 VKB, Virtual Keyboard

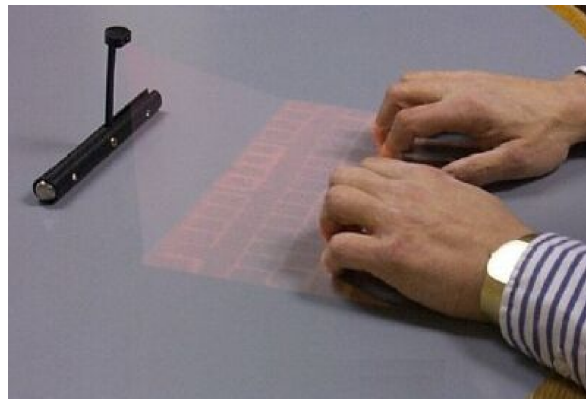


图 2.8 Virtual Devices, VKey



图 2.9 Thumbcode



图 2.10 Key-Glove



図 2.11 PinchGloves

### グローブ型計測装置装着型

グローブ型の指の動きを計測する装置を装着して文字入力を行うものとして、図 2.11 に示す PinchGloves[10] があるが、これは没入型仮想空間内での文字入力を想定して作られたものである。両手にグローブ型計測装置を装着して使用するため、実質両手が完全にふさがってしまうことになり、ウェアラブルでの使用を考えるとあまり実用的とは言えない。

### アクセサリ装着型

手袋ほどの大きさではないが、パッドや指輪のようなアクセサリ類を手や指に装着して使用するタイプのものもある。

Samsung Corporation の Scurry[18] (図 2.13) や、Kittytech の KITTY[19] (図 2.12) , Essential Reality の P5 glove[20] (図 2.14) , オリンパス株式会社が開発したウェアラブル操作インタフェース [21] (図 2.15) は、指に装着した機具および装置を用いて指の動作を検出し、手の甲に装着した装置で手全体の動きを検出する仕組みである。これにより、何も無い中空で既存のキーボードを打つ際の手と指の動きに類似した操作を行うと、実際のキーを押さなくともキー入力が可能である。しかし、これらは手袋のように手をすっぽりと覆って拘束するものではないが、いずれにせよ手全体が拘束されるため、指を使う他の作業への移行が容易に行えず、使用時以外に不便が感じられる。



図 2.12 Kittytech, KITTY



図 2.13 Samsung Corporation, Scurry



図 2.14 Essential Reality, P5 glove

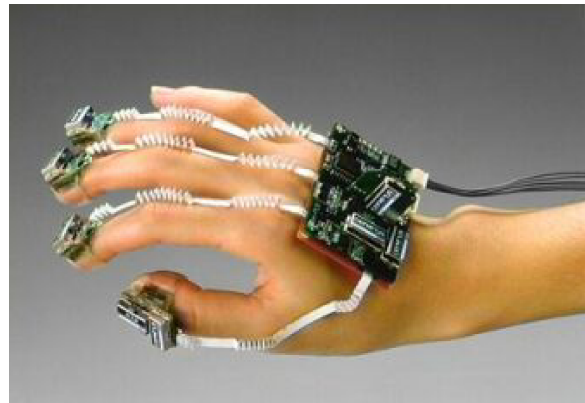


図 2.15 オリンパス株式会社, ウェアラブル操作インタフェース



図 2.16 Senseboard Technologies, Senseboard



図 2.17 NTT ヒューマンインタフェース研究所, FingeRing

図 2.16 に示す Senseboard Technologies の Senseboard[22] も同様の操作方法でキー入力を行うものであるが、上記の 4 つの例とは仕組みが異なっており、手のひらに装着したパッドから、キーボードを打つ際の指の筋繊維の動きを読み取って、キー入力を実現している。しかし、筋繊維の動きの検出は難しく、誤り入力が多いという報告もある。

図 2.17 に示す NTT ヒューマンインタフェース研究所の FingeRing[23] は、各指が床面等をタイプした時に生じる衝撃を指輪を用いて検出することでキー入力を行うものであるが、入力に使用可能なキーに相当するものが 5 つしかないため、1 ストロークであらわせる符号に限界があり、2 ストローク入力や、複数指を組み合わせた同時入力等の複雑な操作が必要となり、使いやすいとは言えない。

#### 2.2.4 ブレスレット装着型

このタイプは、手を全体的に覆ってしまうグローブ装着型とは異なり、必要となる装着機器が手首部分だけでまとまるのが特長であり、Andrew らが提案した手法や [24]、Lightglove 社の Lightglove[25] (図 2.18) がある。

前者は手首の下に腕時計ほどの小型カメラを装着し、指先を監視するというものである。操作方法は、人差し指、中指、薬指の 3 本の指の曲げ伸ばしからなる 8 通りのジェスチャーによりコマンド入力を行うというものであるため、多数のキー入力が必要となる文字入力インタフェースとして使用するには不十分である。

後者は手首の下に指向性がある 5 つの LED と 5 つの光検知器を装着し、各 LED の照射線上に指先を触れさせて光を反射したことを光検知器で感知することでタイピング動作を認識するものである。この仕組みにより、グローブ装着型のよう中空で指を振り下ろすタイピング動作を行うことでキー入力が可能となる。しかし、手首から先が少しでも左右にずれてしまうと、タイピング動作をした時に LED の照射線上から指が外れてしまいキー入力が付けつけられなくなるため、操作性に難がある。



図 2.18 Lightglove 社, Lightglove

### 2.2.5 先行研究のまとめ

前節までに述べてきた入力方式の長所と短所を次ページの表 2.1 にまとめた。

キーボード（キーパッド）を小型化することに重きを置くと、操作性の低下を招いてしまうため、小型化することには限界がある。したがって、親しみやすい既存のキーボードの特長を再現するには、タイピング動作によるキー入力を実現することが必要であると考えられる。また、身体の拘束度合いについては、可能な限り身体を拘束しないものが望ましい。表の中ではブレスレット装着型のものがこの評価項目において最も良い（拘束面積が少ない）と判断される。したがって、ブレスレット装着型のものはこの表において最も多くを満たしていることが分かる。

表 2.1 各入力方式の長所と短所

	小型キーボード型		卓上投影型 (※1)	グローブ装着型			ブレスレット装着型
	既存のキーボードと形状が類似したもの	既存のキーボードとは形状が異なるもの		ボタン付き手袋装着型	グローブ型計測装置装着型	アクセサリ装着型	
任意の場所で使用可能か	○	○	×(※2)	○	○	○	○
入力操作の容易性	△(※3)	特殊な操作が必要	○	特殊な操作が必要	○	○ (一部×)	○
装着時の身体の拘束度合い	腕部分	手で握って持ち運ぶ	—	手全体	手全体	ほぼ手全体	手首部分
手を使う他の作業(※4)に移行しやすいか	○	○	○	×(※5)	×(※5)	×(※5)	○

※<sub>1</sub> 卓上投影型は、身体に装着して使用するものではないため、一部の項目に該当しない。

※<sub>2</sub> キーボードの投影面として、十分な広さの安定した平面が必要

※<sub>3</sub> 操作方法は既存のキーボードとほぼ同じだが、キーおよびキー間隔が狭いため操作しづらくなる。

※<sub>4</sub> メモを取る、物をつかむ、等。

※<sub>5</sub> 常に手全体が拘束されるため。

## 第3章 AirGrabber

本研究では、既存のキーボードの特徴であるタイピングによる文字入力に類似した感覚で文字入力が可能であり、かつ任意の場所で使用可能であるシステムを開発することを目的とする。ウェアラブルに適応するためには、装着機器による身体の拘束度合いを可能な限り削減し、文字入力以外の他の作業への移行が容易になるよう考慮する必要がある。

本章では、これらの問題を解決するウェアラブルコンピュータ向けの新たな文字入力インタフェースとして、小型カメラと傾斜センサを手首に装着して用いるバーチャルキーボードである“AirGrabber”[26, 27]を提案する。

### 3.1. 仮想的なタイピングによる文字入力

物理的なキーボードを用いずに、タイピング動作による文字入力を実現するためには、どの入力キーが選択され、タイピングされたか、をシステムが正確に認識しなければならない。そこでこの認識を、以下の二つの判別処理に分けて考える。

- i. どのキーがタイピング可能な状態か
- ii. タイピングがなされたか

まず、上記 i. について考える。キーボードに配列されているキー上のどこに手が存在しているかによって、その時にタイピング可能なキーの候補は変化する(図 3.1)。したがって、上記 i. を認識することは、現実の手の動きを仮想キーボード上の手の位置変化へと対応付けることと言える。

次に、上記 ii. の判断は、指先の動作をセンシングすることにより行われる。第 2 章で紹介している先行研究では、指に装着された加速度センサを用いているも



図 3.1 手の位置とタイピング可能なキー（指の下の着色部分）

のがあるが、指や手に多くの機器を装着する必要があるため、使用の際の煩わしさが目立ってしまう。身体を可能な限り拘束せずに指先の動作をセンシング出来ることが望ましい。

本研究で提案する手法では、i. と ii. の判別処理に必要となるセンサ機器を最小構成にするために、手首の下に小型カメラと傾斜センサを装着して用いる（図 3.2）。傾斜センサの出力に応じて手と仮想キーボードとの位置関係を対応付け、カメラで撮影した指先の映像から、時々刻々の指先の動作を捉える。この構成により、中空をタイピングする手と指の動作でキー入力が可能になる。また、装着機器が手首だけでまとまるため、手と指は自由になると同時に、キー入力をしていない時に指先を使った他の動作（物を掴む、メモを取る、等）に移行しやすくなる。

また、指先全体をカメラで撮影することで、指先位置が初期位置から少々ずれたとしても、安定して指先の動作を観察し続ける事が可能である。

以降の節では、AirGrabber の実現手法について述べる。

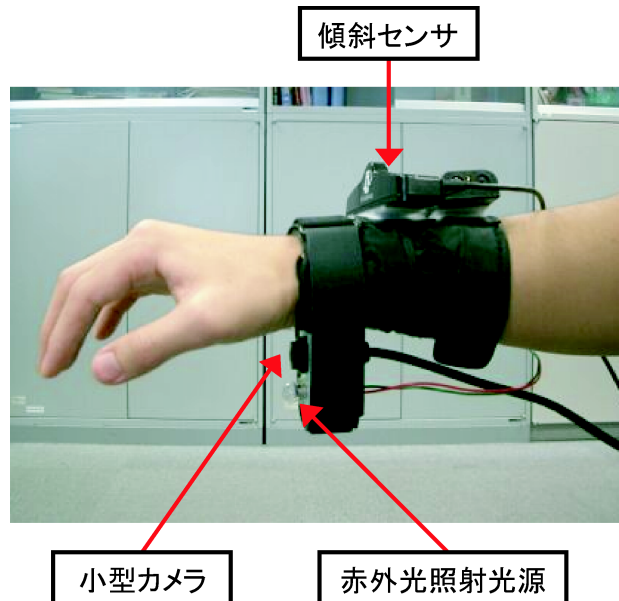


図 3.2 AirGrabber 装着図

### 3.2. タイピング可能なキーの認識

腕に装着した三軸の傾斜センサ（図 3.2）を用いて腕の前後左右への傾きを認識し、その傾きの度合いをホームポジションからの手の移動量として見なすことでキーボード上を移動し、タイピング可能なキーの候補を選択する。具体的には、図 3.3 に示すように、ホームポジションをキーボードの中央とし、手首を前後に傾けるとホームポジションより上もしくは下の段のキーを選択、手首を左右に傾けるとホームポジションよりの左もしくは右の列のキーの選択を行う。

前章で先行研究として挙げた中空でタイピング動作を行うタイプのものの多くは、実際に手を前後左右に動かすことで仮想キーボード上での手の位置変化へと対応付けている。その際に手の動きを認識するセンサとして加速度センサを用いているものもあるが、タイピング可能なキーの候補を選択する際にオーバーアクションになってしまったり、移動しながらや腕を水平にせずに使用すると移動時に発生する加速度や重力により誤認識されることがある、などの問題がある。傾斜センサを用いる提案手法では、ホームポジションの上下に並ぶキーを選択する際には肘から先を上下に少し振る必要があるが、左右に並ぶキーを選択する際に

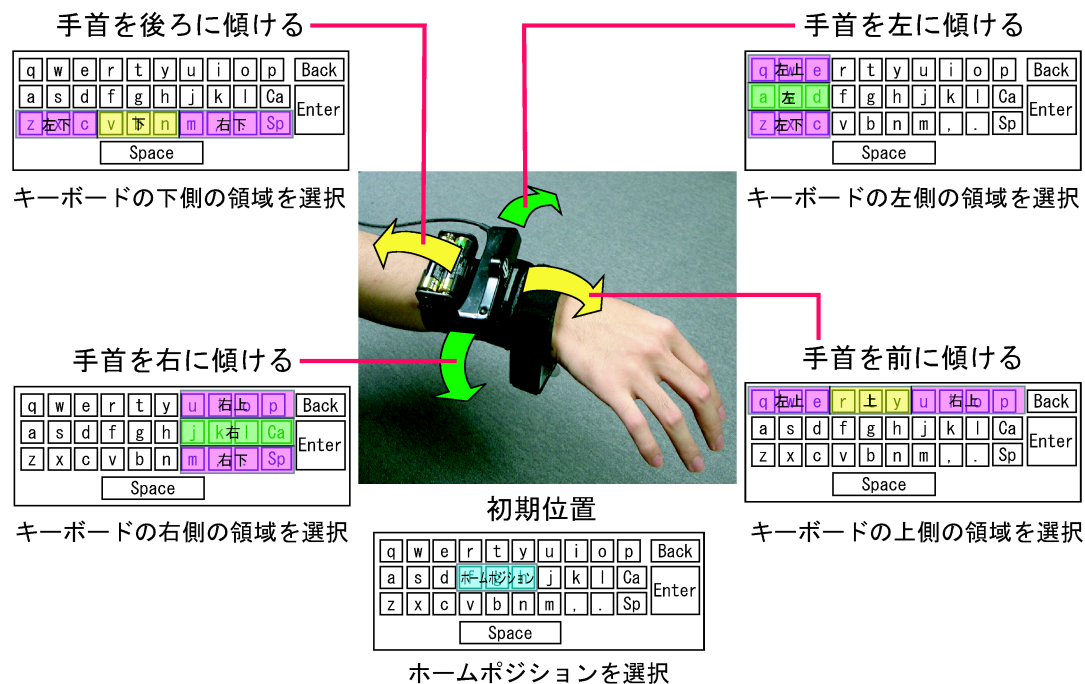


図 3.3 キー候補選択の動き（着色部分：タイピング可能なキーの範囲）

は、その場で手首を左右に回転させる動作だけで済むため、結果的にキーの候補選択の際の動作が少なく済む。また、加速度センサとは異なり、移動しながらの使用でもキーの候補選択に支障が無く、腕を下に下げた状態や、寝転んだ状態など、いかなる状態でも使用が可能である。

### 3.3. タイピング動作の認識

手首の下に指先を観測する小型カメラを装着し（図 3.2），得られた映像を以下の過程を経て解析することでタイピング動作を認識する。

1. 手領域抽出
2. 指先抽出
3. 各指先位置の検出
4. タイピング動作の判定

手領域を抽出し指先を検出するための処理の流れと、指先の動きからタイピング動作を認識するための処理の流れを、図 3.4、図 3.5 に示す。

以降の小節では、これらの各処理について詳述する。

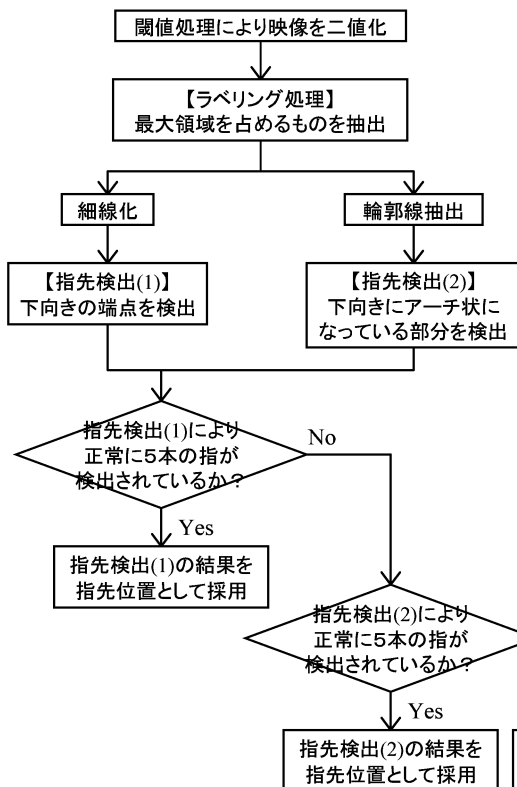


図 3.4 処理の流れ図 1

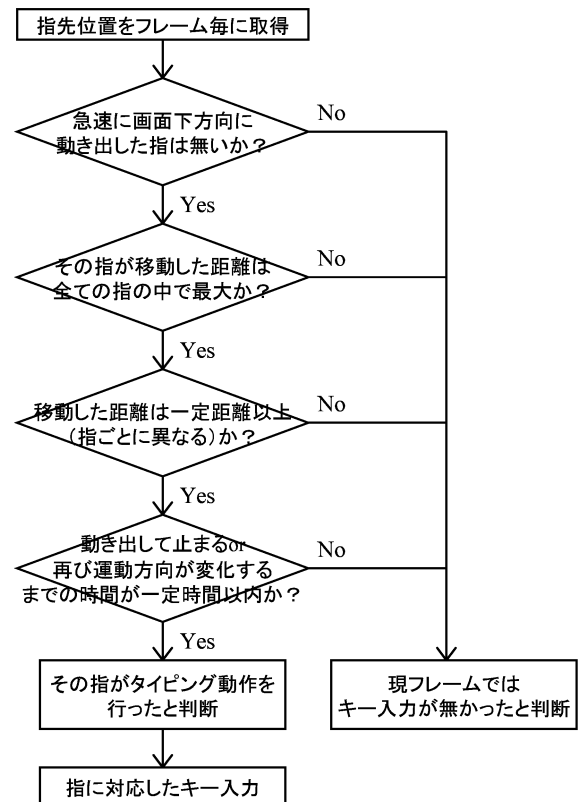


図 3.5 処理の流れ図 2

### 3.3.1 手領域抽出

手首の下に装着した小型カメラの位置から指全体をカメラの視野に捉えるために、カメラには魚眼レンズを装着する。また、カメラで撮影した映像から指先の動作を観察するためには、手の像を安定して取得する必要がある。そこで、カメラの下に赤外光を照射する光源を取り付け、カメラ内部には赤外透過フィルタを挿入する。赤外透過フィルタは可視光を遮断するため、カメラに近接している手が非常に明るく映し出され、カメラで撮影した映像を閾値処理のみで手指領域と

それ以外の領域に二値化することが可能となる。次に、二値化された画像をラベリングして領域分割を行い、最大領域を占めているものを手領域と判断して抽出する。

### 3.3.2 指先検出

抽出された手領域の二値化映像を基に指先検出を行う。

まず Hilditch の細線化法を用いて細線化を行う [28]。細線化された画像を基に、下向きの端点を探索し、検出された部分を画像の左から順番に親指から小指までの各指先として対応付ける。

上述の処理と同時に、二値化された画像の手領域部分の、最も画面下にある輪郭線を抽出する。この抽出された輪郭線に沿って、画面の左から右へ輪郭線追跡を行い、下向きのアーチ状になっている部分を探索していく。具体的には、追跡していく各々の注目点に対し、その注目点を中心として左右の一定距離内に存在する輪郭線上の点が注目点よりも画面の上に存在しているか、つまり極小値であるかどうかを判断する。その結果、注目点がある一定区間内において極小値であると判断された場合、指先点として検出し、画像の左から順番に親指から小指までの各指先として対応付ける。

二つの処理を同時に行って指先を検出している理由は、指先同士が少しでも重なって小型カメラから見えると、二値化して細線化処理を行う際に重なっている指先同士の部分が端点にならず、連結して輪になってしまうためである。この場合、細線化処理により正常に5つの指先が検出されなくなる。そこで、通常は細線化処理により検出された結果を用い、指同士が重なり5つの指先が検出できない場合は、輪郭線抽出処理による結果を用いることで、ほぼ常に指先を検出し続ける事が可能になる。もし輪郭線抽出処理でも正常に5つの指先が検出できない場合は、そのフレームでの指先位置検出を諦める。

以上の処理過程を図 3.6, 図 3.7 に示す。

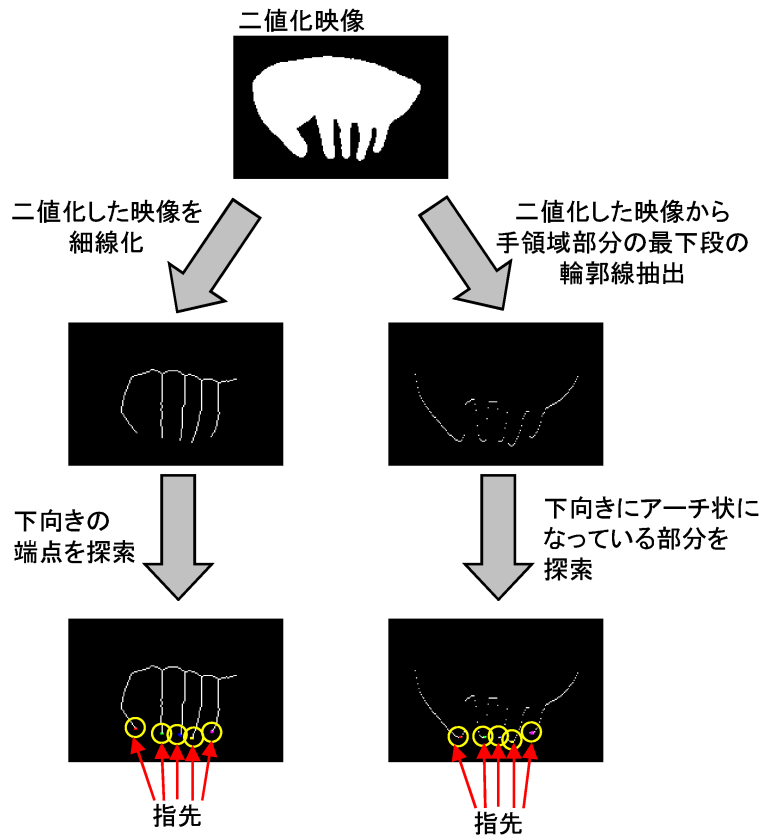


図 3.6 指先検出

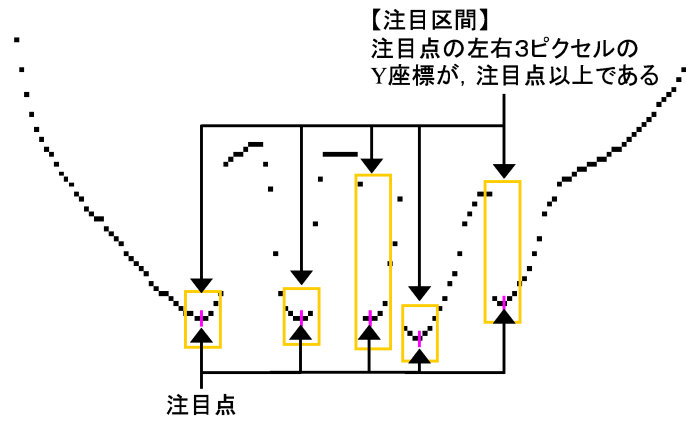


図 3.7 下向きのアーチ状部分探索

### 3.3.3 タイピング動作の検出

フレーム毎に検出される指先位置を基に、各指先が画面内でどのように動いているかを観察する。

タイピング動作とは、“（キーを押し込むために）指を一時的に素早く上から下に振り下ろす”という指の動作である。AirGrabberでは、ある指先の動作が以下の条件を満たした場合にタイピング動作がなされたと判断し、その指に割り当てられたキーの入力を受け付ける。

1. 指先が急激に画面下方向へ移動を開始した（以下、この瞬間の座標値を最上点と称する）後、しばらく同方向へ移動し、画面上方向へ移動方向を反転または静止した（以下、この瞬間の座標値を最下点と称する）
2. 最下点到達の時刻における他の四指の画面下方向への移動距離と比較して、注目している指の最上点から最下点までの移動距離が最大である
3. 最上点から最下点までの指の移動距離が一定距離以上である
4. 最上点出発の時刻と最下点到達の時刻との時間差が一定時間以内である

図3.8に、横軸をフレーム数（時間）、縦軸を画面Y軸方向の座標値とした、ある時間内の五指の動きを線グラフ化したものを示す。この図の中指の線グラフ部分に注目し、上記の条件について詳述する。なお、説明の簡略化のために、下図の場合のシステム動作レートを10fpsとする。

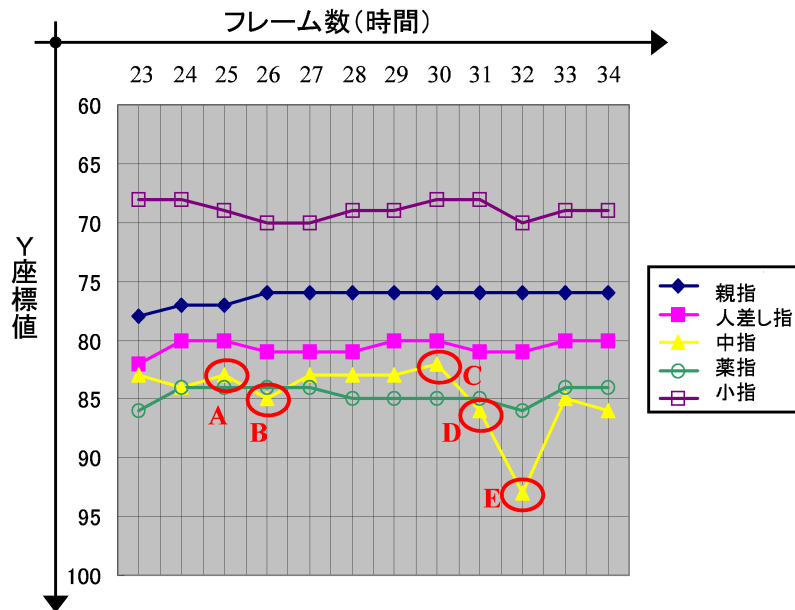


図 3.8 五指の座標の時間変化

## 1. の条件について

最上点についてであるが、静止（Y軸方向に移動していない）もしくは画面上方向へ向かって移動していた指先が、ある時刻から1フレーム以内に画面下方向へ向かって2ピクセル以上移動した場合を“急激に画面下方向へ移動を開始”と認識し、この時の移動開始位置を最上点と判断する。図3.8における中指のグラフのA点からB点までの区間とC点からD点までの区間が“急激に画面下方向へ移動を開始”したと認識された箇所にあたり、これらの区間における最上点はそれぞれA点とC点である。

最下点は、図3.8におけるB点とE点がこれにあたる。

以下、中指のグラフのA点からB点までの区間とC点からD点までの区間におけるそれぞれのタイピング動作判断を述べる。

## 2. の条件について

注目している指の最上点から最下点までの移動距離は、図3.8における中指のグラフのA点からB点までの区間が2ピクセル、C点からE点までの区間が11ピクセルである。

まず、A点からB点までの区間について他の指との比較を行うと、最下点到達の時刻（26フレーム目）においては人差し指と小指が画面下方向へ動いていたことが分かる。中指は25フレーム目にY座標値83から、最下点到達の時刻までに2ピクセル移動している。人差し指は25フレーム目にY座標値80から、中指の最下点到達の時刻までに1ピクセル移動している。小指は24フレーム目にY座標値68から、中指の最下点到達の時刻までに2ピクセル移動している。この場合、中指の移動距離と小指の移動距離が同じであるが、最下点到達時刻までの画面下方向への最大移動距離は2ピクセルであるため、この区間は2.の条件に合致するものと判断する。

次に、C点からE点までの区間について他の指の動作との比較を行うと、最下点到達の時刻（32フレーム目）においては薬指と小指が画面下方向へ動いていることが分かる。中指は30フレーム目にY座標値82から、最下点到達の時刻までに11ピクセル移動している。薬指は31フレーム目にY座標値85から、中指の最下点到達の時刻までに1ピクセル移動している。小指は31フレーム目にY座標値68から、中指の最下点到達の時刻までに2ピクセル移動している。この場合は中指の画面下方向への移動距離が他の指と比較して最大となるため、この区間は2.の条件に合致するものと判断する。

### 3. の条件について

タイピング動作であるか否かを判断するための最上点から最下点までの移動距離の閾値は、魚眼レンズによる画面の歪みや小型カメラから指先までの距離（約14cm）、各指先の画面に対する位置等を考慮し、親指と小指は5ピクセル、残りの指は4ピクセル以上と設定した。この距離は実世界において約2cm程に相当する。

図3.8における中指のグラフのA点からB点までの区間について見てみると、最上点から最下点までの移動距離は2ピクセルである。したがって、中指のタイピング動作と見なす閾値を超えていないため、この区間は3.の条件にそぐわないものと判断し、以降の判断も行わない。結果として、26フレーム目にはタイピング動作を起こした指が存在しなかったことになる。

次に中指のグラフの C 点から E 点までの区間について見てみると，最上点から最下点までの移動距離は 11 ピクセルである．したがって，中指のタイピング動作と見なす閾値を超えているため，この区間は 3. の条件に合致するものと判断する．

#### 4. の条件について

タイピング動作は指の一時的な素早い動きである．そこで AirGrabber では，最上点出発の時刻と最下点到達の時刻との時間差が 0.5 秒以内であればタイピング動作であると判断するようにした．

図 3.8 における中指のグラフの C 点から E 点までの区間について見てみると，最上点から最下点までの移動に 2 フレーム，つまり 0.2 秒かかっていることが分かる．したがって，この区間は 4. の条件に合致するものと判断する．

以上の結果から，図 3.8 における中指のグラフの C 点から E 点までの区間は 4 つの判断基準を満たしているため，32 フレーム目に中指によるタイピング動作が検出されることになる．

### 3.4. 実装機能

#### 3.4.1 基本的な操作方法

AirGrabber を右腕の手首に装着し，片手だけで操作を行う．実際にキーボードを操作するような感覚で，中空でタイピング動作を行うと，各指に対応したキーが入力される．タイピング可能なキー候補の選択は，手首の前後左右の傾き具合により行う．なお，ホームポジションを基準として，前に 8 度傾けると上の段を，後ろに 8 度傾けると下の段を，右に 15 度傾けると右の列を，左に 10 度傾けると左の列を選択しているものと判断するようにした．これらの具体的な角度の数値は，筆者が試作システム作成の際の経験に基づいて設定したものである．左右の

角度の閾値に差があるのは、人間の手首を外側（右手首からみた右側）にひねる動作は、内側（右手首からみた左側）にひねる動作に比べやすいという、人体の骨格的な理由からである。

また、手首を動かさずに手の平だけを上に跳ね上げて元に戻す動作により、キーボード入力の有効／無効の切り替えを行う。有効になっている時のみ、中空でのタイピング動作をキー入力として受け付け、無効になっている時は一切の指の動作をキー入力として受け付けない。なお、このキー入力の有効無効の切り替え操作によって、ホームポジションとなる腕の傾き具合をリセットすることが可能である。無効から有効に切り替えられた時の腕の傾き具合が、ホームポジションとしてその都度認識される。

### 3.4.2 画面への提示

図 3.9 に示すように、小型カメラによって撮影された手の映像の細線化映像、輪郭抽出した映像と、仮想のキーボードを可視化したものを確認のために画面上部に提示している。仮想のキーボードのキー配列は、通常のキーボードと同じ QWERTY 配列（アルファベット部分）である。

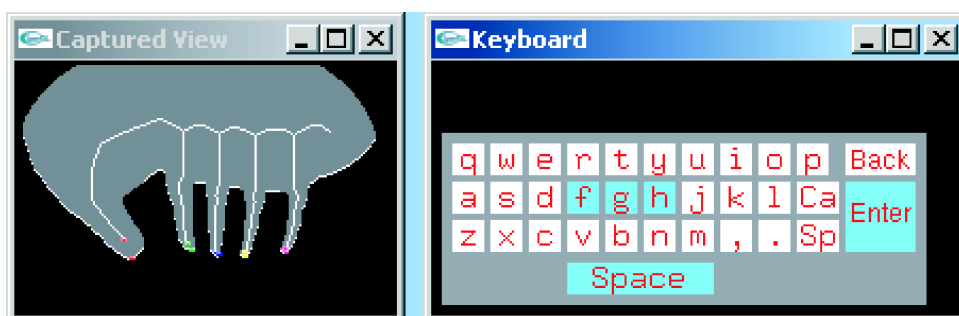


図 3.9 提示画面

図 3.10 に示すように、手首を前後左右に傾けることでキーボード上の領域を移動してキーの候補を選択する。基本的に人差し指～薬指の 3 本に割り当てられるキーが変化する。移動可能な領域はホームポジションおよびその周囲八近傍の、計 9 個存在する。親指と小指には、使用頻度が多い Enter や Space, BackSpace キー等の特殊キーが常に割り当てられている。画面に提示されるキーボード画面では、その時にタイプ可能なキーの候補が青く着色されて表示され、タイプされたキーは瞬間的に黄色く光るようになっている。

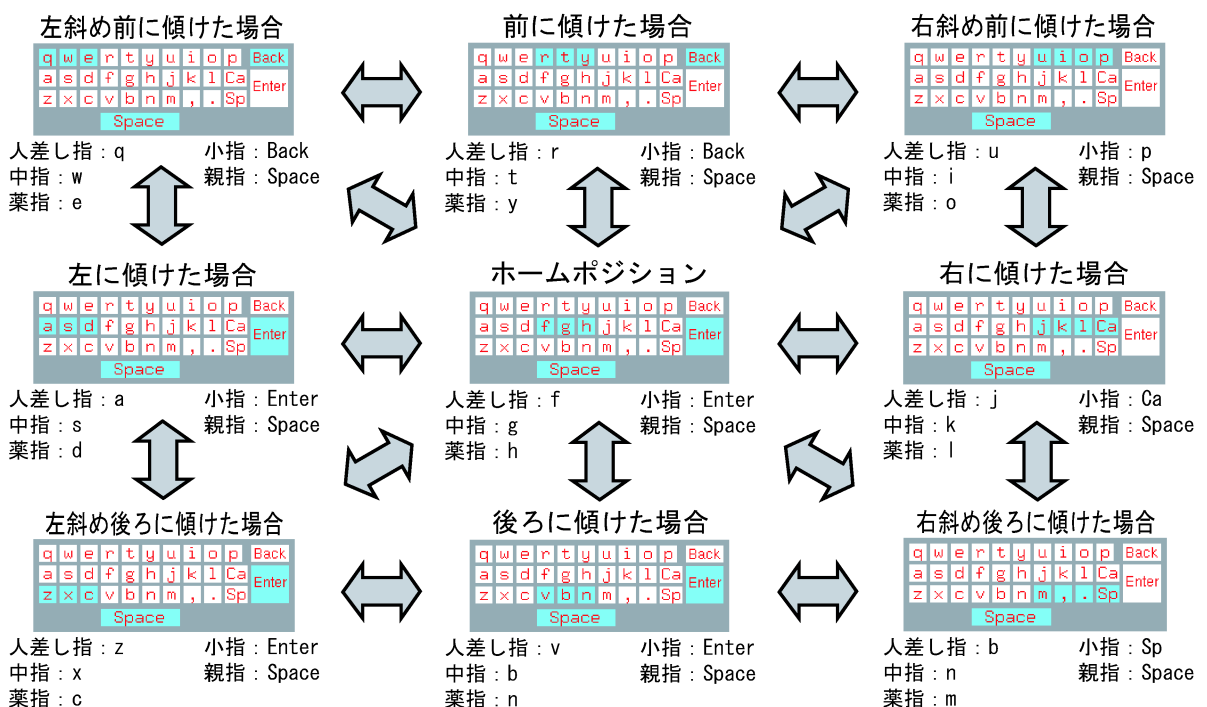


図 3.10 タイピング可能候補キー選択

【図 3.10 補足説明】

- キーボード上のどの領域を選択していても Space キーが親指に割り当てられている
- ホームポジション、左、左下、下、の領域を選択している時は、小指に Enter キーが割り当てられている
- 上、左上の領域を選択している時は、小指に Back (BackSpace) キーが割り当てられている

また、図 3.11 に示すように、Ca (CapsLock) キー及びSp (特殊文字) キーを押すことで、入力可能な文字の種類を変更可能である。

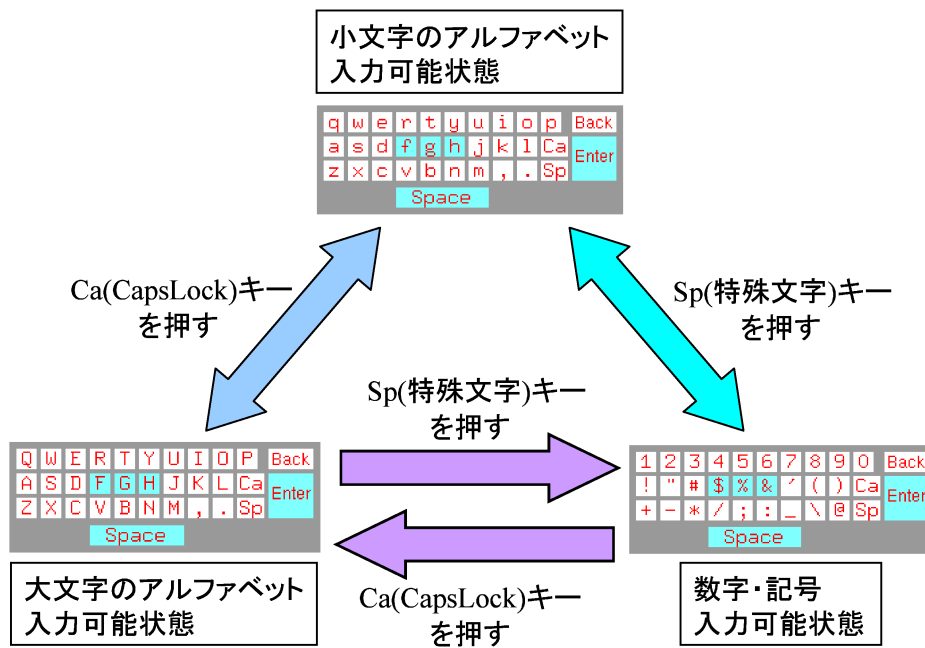


図 3.11 入力文字種類変更

## 第4章 評価実験

本章では、提案手法を用いて作成した AirGrabber の試作システムを複数の被験者に使用してもらい、キー入力操作の認識精度の評価、および実際に単語や文章を入力してもらう際のユーザビリティの評価実験について述べる。これらの実験による評価から、提案手法によりキー入力が可能であること、および、提案したシステムの有効性を示す。

### 4.1. 実験概要

本実験の被験者として、日常的にPCを操作している被験者10名（男性8名，女性2名，全員右利き）を採用した。被験者は全員，今回の実験で初めて AirGrabber を体験する。実験に際しては，タスクに取り掛かってもらう前に操作方法を説明し，操作に慣れてもらう練習時間を20分程設けた。

行ったタスクは以下の通りである。

1. タイピング可能なキーの領域を選択する操作をしてもらい，動作精度を評価する。

タスク終了後，被験者へのアンケートによって操作性の評価も行う。

2. 手首を固定したまま各指でタイピング動作をしてもらい，ユーザの指のタイピング動作とキー入力が一貫しているかを評価する。

タスク終了後，被験者へのアンケートによって操作性の評価も行う。

3. 実際に単語や文章を入力してもらい，入力にかかった時間や，誤入力数等に基づいて AirGrabber キー入力性能を評価する。

タスク終了後，被験者へのアンケートによって操作性の評価も行う。

上記のタスクについて4.3節以降で詳述する。

## 4.2. 試作システム

実験に用いた試作システムのハードウェア構成を図 4.1 に示す。使用した機材の詳細は以下の通りである。

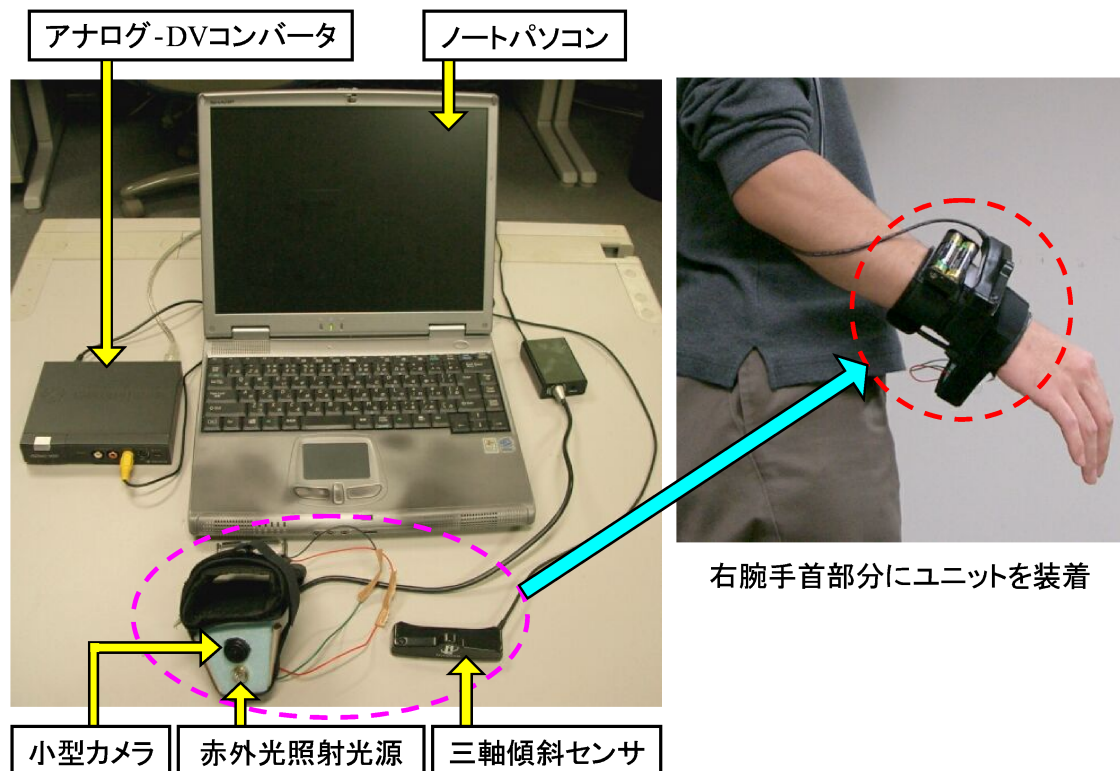


図 4.1 試作システム

- ノートパソコン
  - SHARP Mebius PC-FS1-C1
  - CPU : Celeron 1GHz
  - Memory : 256MB
  - OS : WindowsXP Home Edition
- アナログ-DV コンバータ
  - canopus ADVC-100

- 小型カメラ
  - サイ・アイ株式会社製小型カラーカメラ
  - 超広角魚眼レンズ（視野角 180 度）装着
  - EXview HAD CCD 内蔵
- 三軸傾斜センサ
  - InterSense INTERTRAX2
- 赤外光照射光源
  - ELPA GA-11h(C) スポット球

なお、キャプチャ画像サイズは 180 × 120 ピクセル、キャプチャレートは 30fps である。実験の際の描画レートおよびシステムの動作レートは 7～10fps であった。

試作システムを用いた実際の動作画面を図 4.2 に示す。試作システムを用いて、windows 環境内の任意のテキスト領域への文字入力が可能である。

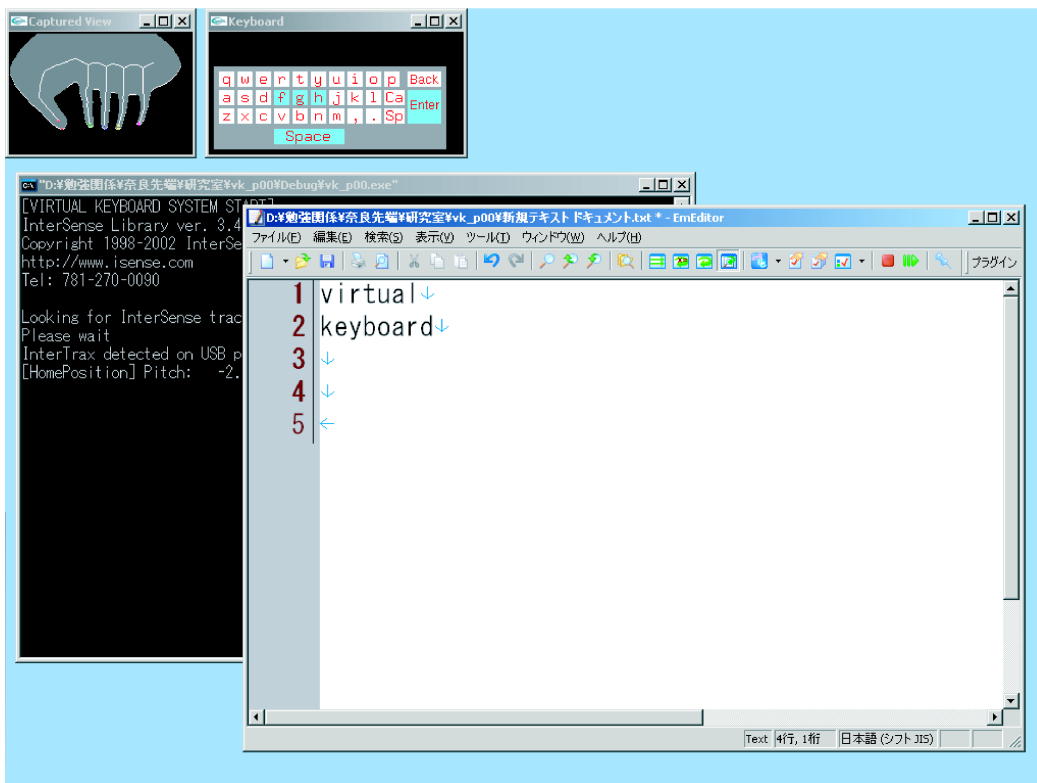


図 4.2 試作システム動作画面

## 4.3. タイピング可能なキー選択の動作精度評価

### 4.3.1 実験目的

手首に装着した傾斜センサからの情報に基づいて、タイピング可能なキーの領域選択操作がユーザの意思通りに行えているかを実験する。

### 4.3.2 実験方法

被験者には、図 4.3 に示す仮想のキーボード上の、中心のホームポジションを含む計九箇所の領域を、合図とともに手首を前後左右に傾けて指定した順番に沿って選択してもらう。合図を表示した時刻から指定した領域へ移動するのに要した時間、および、試行後の被験者へのアンケートによって評価を行う。

具体的なタスクの内容は以下の通りである。

- タスク 1

1. 初期位置をホームポジションとする
2. プログラム起動後、キー入力を ON にしてしばらく待機
3. コンソール画面に、次に移動する領域の指示が表示され、カウントダウンが始まる
4. カウントダウン後の“GO”の表示を合図に、指定された領域を選択する
5. 上記の 3.~5. までの動作を、3. で指定する選択領域を

右 → ホームポジション → 左 → ホームポジション →  
上 → ホームポジション → 下 → ホームポジション →  
右上 → ホームポジション → 右下 → ホームポジション →  
左上 → ホームポジション → 左下 → ホームポジション

の順番に変えて 16 回繰り返す

- タスク 2

1. 初期位置をホームポジションとする
2. プログラム起動後、キー入力を ON にしてしばらく待機

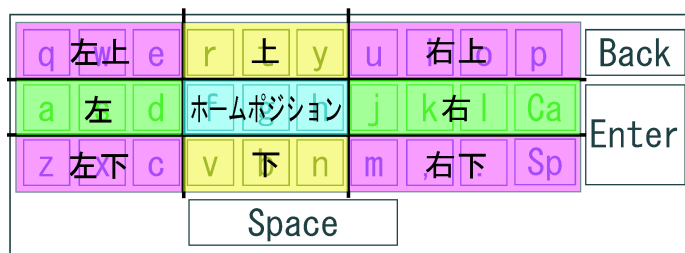


図 4.3 仮想キーボード上のタイピングエリア

3. コンソール画面に、次に移動する領域の指示が表示され、カウントダウンが始まる
4. カウントダウン後の“GO”の表示を合図に、指定された領域を選択する
5. 上記の3.~5.までの動作を、3.で指定する選択領域を  
上 → 右上 → 右 → 右下 → 下 → 左下 → 左 → 左上 → 上  
の順番に変えて9回繰り返す
6. 上の領域を二度目に選んだ後の合図で、ホームポジションに戻る

タスク終了後に行ったアンケートは以下の通りである。

- 意図した通りに領域選択が行えたか  
(-2 (出来なかった) ~ +2 (出来た) の, 5段階評価)
- 領域選択の際に左右に手首を傾ける角度は適切だと思ったか  
(-2 (思わない) ~ +2 (思う) の, 5段階評価)
- 領域選択の際に前後に手首を傾ける角度は適切だと思ったか  
(-2 (思わない) ~ +2 (思う) の, 5段階評価)
- 選択しづらい領域, および手首の動作はあったか  
(はい, いいえ, の二択)
- 上記の質問に“はい”と答えた場合, その理由を記述
- その他, 思ったこと

### 4.3.3 結果

被験者10名によるタスク1, タスク2の, 各方向への移動所要時間の平均値を, 表4.1, 表4.2と表4.3, および, 図4.4と図4.5のグラフに示す.

表 4.1 タスク1の移動平均所要時間

移動先の領域	左上	上	右上
ホームポジションからの移動平均所要時間 (秒)	1.32	1.51	1.21
ホームポジションへの移動平均所要時間 (秒)	1.26	0.68	1.08
移動先の領域	左	ホーム	右
ホームポジションからの移動平均所要時間 (秒)	0.62	—	0.91
ホームポジションへの移動平均所要時間 (秒)	0.70	—	0.65
移動先の領域	左下	下	右下
ホームポジションからの移動平均所要時間 (秒)	1.28	0.78	0.96
ホームポジションへの移動平均所要時間 (秒)	1.25	1.05	1.47

表 4.2 タスク1の移動平均所要時間の平均

移動方向	移動平均所要時間 (秒)
左右方向移動の平均	0.72
上下方向移動の平均	1.01
斜め方向移動の平均	1.23
移動平均所要時間の平均	1.05

表 4.3 タスク2の移動平均所要時間

移動元の領域 → 移動先の領域	左 → 左上	左上 → 上	ホーム → 上	上 → 右上
移動平均所要時間 (秒)	0.99	0.48	0.68	0.61
移動元の領域 → 移動先の領域	左下 → 左	上 → ホーム	右上 → 右	
移動平均所要時間 (秒)	1.45	0.85	1.02	
移動元の領域 → 移動先の領域	下 → 左下	右下 → 下	右 → 右下	
移動平均所要時間 (秒)	0.71	0.97	0.71	

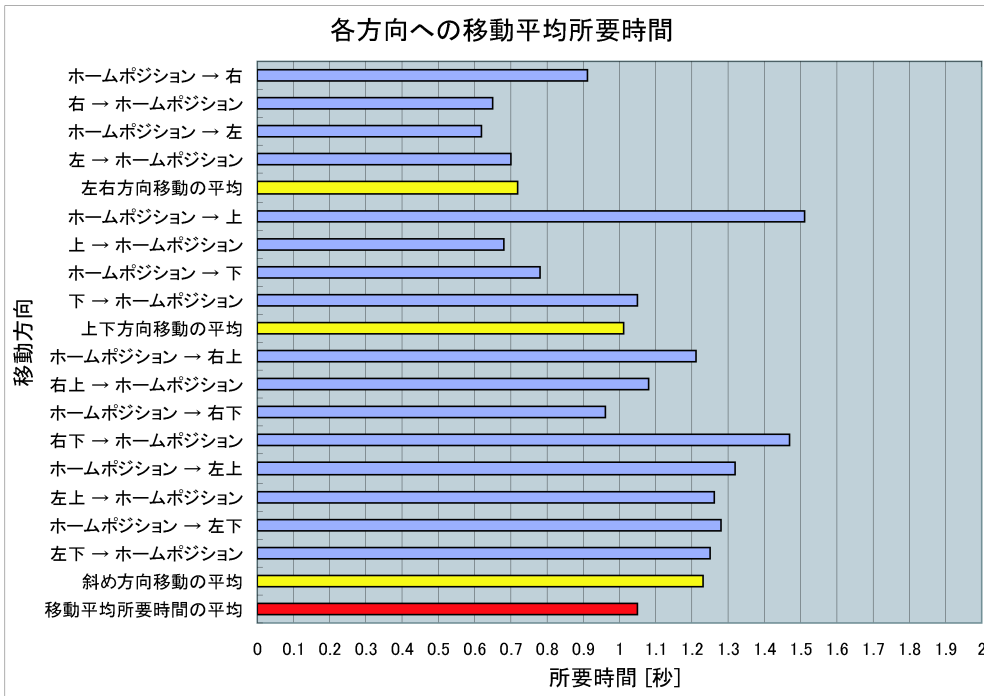


図 4.4 タスク 1 の所要時間の平均値

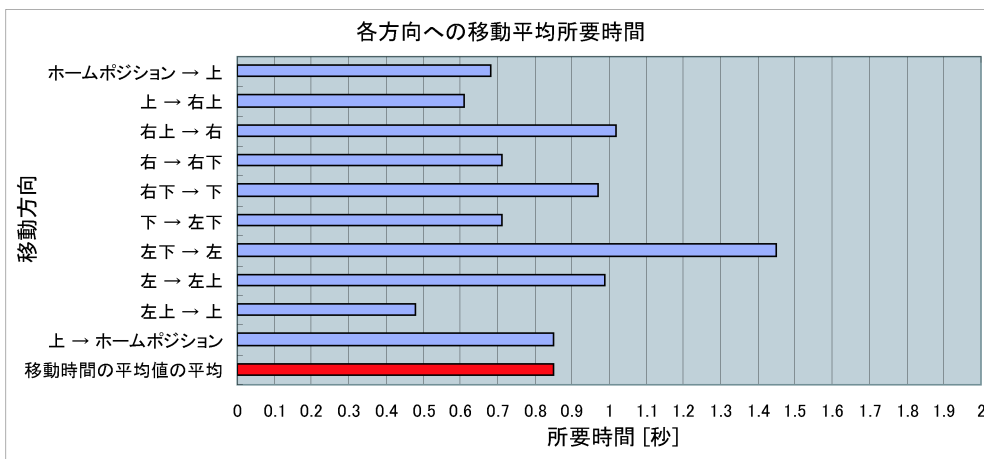


図 4.5 タスク 2 の所要時間の平均値

#### 4.3.4 アンケート結果

- 図 4.6 に 5 段階評価アンケートの結果を示す。

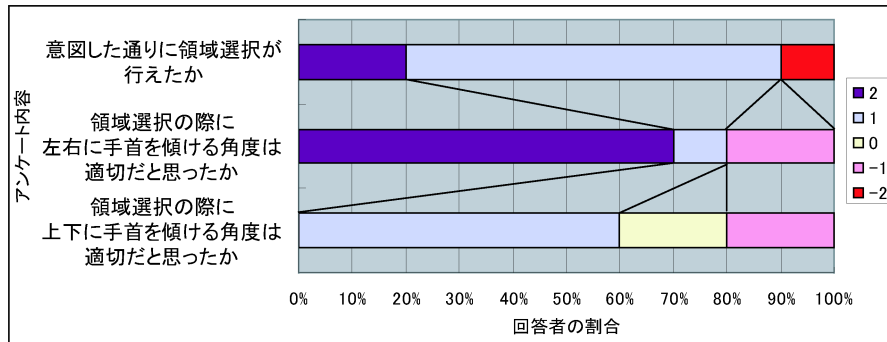


図 4.6 5 段階評価アンケート結果

- 選択しづらい領域，および手首の動作はあったか（はい，いいえ，の二択）
  - － はい 9名
  - － いいえ 1名
- 上記の質問に“はい”と答えた理由
  - － 右腕を左側に傾ける動作がやりづらい。
  - － ホームポジションの左側の領域を選択した状態で維持し続けることが難しい。
  - － 左斜め後ろの領域を選択するのが難しい。
  - － キーボードの上段と下段を選択する操作を間違えやすい。
  - － キーボードの上下の段を選択する際に手首を傾けなければならない角度が少し大きすぎるように感じる。
  - － 一旦ホームポジション以外の領域に移動すると，ホームポジションの時の手首の傾きを忘れてしまうことがある。
- その他，思ったこと
  - － 手全体を前後左右に移動させるのではなく，手首の傾きだけでキー領域の選択を行えるのは面白い。

- 慣れれば通常のキーボード上で手を移動させるのと大差なくキーを選択できそうである.

#### 4.3.5 考察

まずタスク 1 について考えると、表 4.1 より、ホームポジションから別の領域への移動、または別の領域からホームポジションへの移動は、平均 1.05 秒で行われていることが分かる。

図 4.4 からは、ホームポジションと右領域・左領域との間（左右方向移動）の移動所要時間の平均が 0.72 秒、ホームポジションと上領域・下領域との間（上下方向移動）の移動所要時間の平均が 1.01 秒であり、左右方向の移動と上下方向の移動とで差が生じていることが分かる。これはキーボードの上の行を選択する際に、手首を前に傾ける動作と後ろに傾ける動作とを間違えてしまう被験者が多かったことが原因である。腕の構造上、手首を前に傾ける動作は肘を支点として肘から先を下に下げる動作となり、手首を後ろに傾ける動作は肘を支点として肘から先を上上げる動作となるため、“上の行”を選択する際には“肘から先を上上げる（手首を後ろに傾ける）”動作が自然であるという意見が試行後のアンケートに多く寄せられた。

また、ホームポジションと右上領域・右下領域・左上領域・左下領域との間（斜め方向移動）の移動所要時間の平均が 1.23 秒であることから、手首を斜めに傾ける操作は前後左右のどれか一方だけに傾ける操作と比べ、被験者には少し難しいものであったことが分かる。

次にタスク 2 について見てみると、表 4.3 より、ホームポジション以外の外周部分の隣接する領域間の移動は、平均 0.85 秒で行われていることが分かる。

図 4.5 からは、左下領域から左領域へ移動する所要時間が、他の移動と比べて時間がかかっていることが分かる。試行後のアンケートの中にも、右手首を左側に傾ける動作や、ホームポジションの左側の領域を選択し続けることを困難に感じたという意見が寄せられており、この図からは手首を左側に傾けたまま操作しなければならぬ左下領域から左領域、左領域から左上領域の移動動作が、他の移動動作よりも比較的時間がかかっていることが分かる。手首を内側（右手首か

らみた左側)にひねる動作は、外側(右手首からみた右側)にひねる動作に比べやりにくいため、人体の骨格的な問題が原因であると考えられる。

各方向への移動平均所要時間の平均を見てみると、被験者がキーボード上の領域を移動しようと試みてから約1秒ほどで目的の領域を選択できていることが分かるため、傾斜センサを用いたキーボードの領域選択は容易に行えるものであったことが確認できた。

しかしアンケートの結果では、右腕を左に傾ける操作が難しいという意見や、キーボードの上下の段を選択する際に手首を傾けなければならない角度が大きすぎるという意見、上下の段を選択する際の動作は現在の仕様と逆の方が良いという意見が多く見られた。これらに関しては、領域選択のための前後左右の角度の閾値や、それぞれの領域を選択する際に傾けなければならない方向などを、ユーザの好みに合わせて自由に設定できる機能をシステムに追加することにより、解決できると考えられる。

## 4.4. タイピング動作認識の精度評価

### 4.4.1 実験目的

手首に装着した小型カメラの前で指を振り下ろすタイピング動作をすることで、実際にキー入力認識されているか、およびその認識精度について実験、評価する。

### 4.4.2 実験方法

試作システムのタイピング動作認識の精度を確認するために、実際の文字入力の際に行われる指の動きを想定して、連続する二指の組み合わせ(親指・親指, 親指・人差し指, 親指・中指, …, 小指・薬指, 小指・小指)計25通りの各々に対して、それぞれの一回目と二回目の入力を1セットとする計5セット(10回)の入力を、システムが正確に認識するまで行う。各組み合わせの入力に対し、システムが5セット(10回)の入力を認識するまでの、以下に示す内容の入力エラー

の有無およびその回数と，試行後の被験者へのアンケートにより評価する。

- タイピング動作がキー入力として認識されない  
(認識ミス)
- タイピング動作を起こした指とは別の指のタイピングが認識される  
(誤入力)
- ユーザの意図したタイピング動作とは別にキーが入力される  
(過入力)

被験者には，操作する上で一番やりやすいと思われる姿勢を自由にとってもらい，手首部分はなるべく動かさないようにしてキー選択操作は行わず，タイピング動作のみを行ってもらう。

具体的なタスクの内容は以下の通りである。

1. プログラム起動後，キー入力を ON にしてしばらく待機
2. コンソール画面に，試行を行う二指の組み合わせの指示が表示され，カウントダウンが始まる
3. カウントダウン後の“GO”の表示を合図に，一回目と二回目のタイピング動作をテンポ良く行う
4. もし指示した指の入力が認識されなければ，システムが認識するまでタイピング動作をやり直す
5. 一回目と二回目の入力が正確に認識された後，3秒待機
6. 2.～5.を，5回繰り返す
7. 1.～6.を，25通りの組み合わせに対して行う

タスク終了後に行ったアンケートは以下の通りである。

- 意図した通りに親指のタイピング動作はキー入力として認識されたか  
(-2 (出来なかった) ~ +2 (出来た) の，5段階評価)
- 意図した通りに人差し指のタイピング動作はキー入力として認識されたか  
(-2 (出来なかった) ~ +2 (出来た) の，5段階評価)

- 意図した通りに中指のタイピング動作はキー入力として認識されたか  
(−2 (出来なかった) ~ +2 (出来た) の, 5段階評価)
- 意図した通りに薬指のタイピング動作はキー入力として認識されたか  
(−2 (出来なかった) ~ +2 (出来た) の, 5段階評価)
- 意図した通りに小指のタイピング動作はキー入力として認識されたか  
(−2 (出来なかった) ~ +2 (出来た) の, 5段階評価)
- キー入力動作が難しい指はあったか  
(はい, いいえ, の二択)
- 上記の質問に“はい”と答えた場合, その理由を記述
- その他, 思ったこと

#### 4.4.3 結果

被験者 10 名による 25 通りの二指の組み合わせのタイピング動作認識タスクにおいて, タイピング動作がキー入力として認識されない (認識ミス) エラーが一回以上あった人数を表 4.4 および図 4.7 のグラフに, タイピング動作を起こした指とは別の指のタイピングが認識される (誤入力) エラーが一回以上あった人数を表 4.5 およびグラフ図 4.8 のグラフに, ユーザの意図したタイピング動作とは別に余分なキーが入力される (過入力) エラーが一回以上あった人数を表 4.6 および図 4.9 のグラフに示す.

#### 4.4.4 アンケート結果

- 図 4.10 に 5 段階評価アンケートの結果を示す.
- キー入力動作が難しい指はあったか (はい, いいえ, の二択)
  - はい 6 名
  - いいえ 4 名

表 4.4 認識ミスがあった人数

一回目 \ 二回目	親指	人差し指	中指	薬指	小指
親指	5	2	5	6	2
人差し指	7	2	3	2	3
中指	2	4	3	5	3
薬指	5	1	2	1	2
小指	8	2	2	3	1

表 4.5 誤入力があった人数

一回目 \ 二回目	親指	人差し指	中指	薬指	小指
親指	1	1	5	4	2
人差し指	3	0	2	2	2
中指	1	1	1	2	3
薬指	1	0	2	1	3
小指	3	2	3	2	2

表 4.6 過入力があった人数

一回目 \ 二回目	親指	人差し指	中指	薬指	小指
親指	2	2	2	2	2
人差し指	2	2	2	1	0
中指	0	1	1	2	0
薬指	1	1	1	1	1
小指	3	1	0	2	0

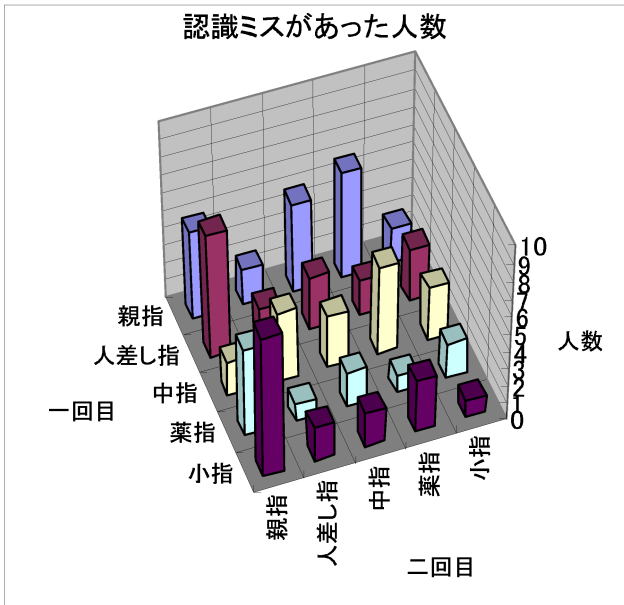


図 4.7 認識ミスがあった人数

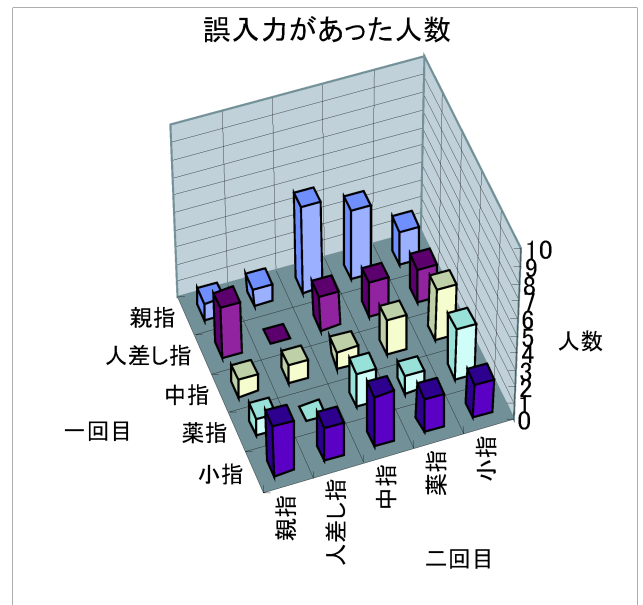


図 4.8 誤入力があった人数

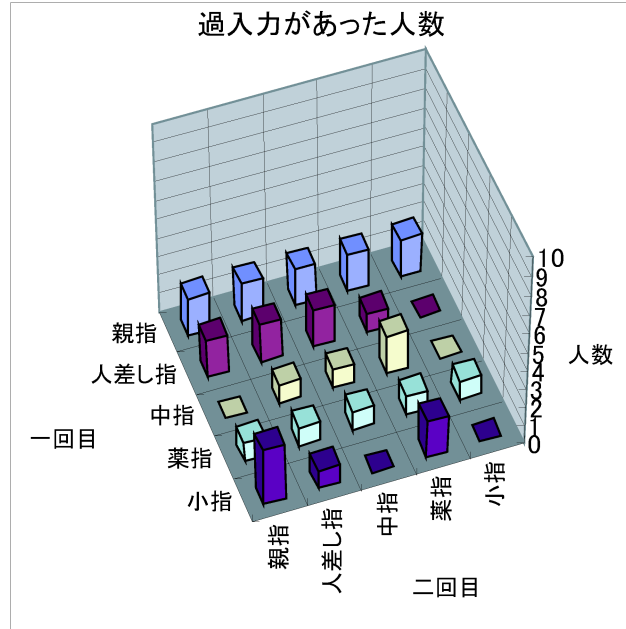


図 4.9 過入力があった人数

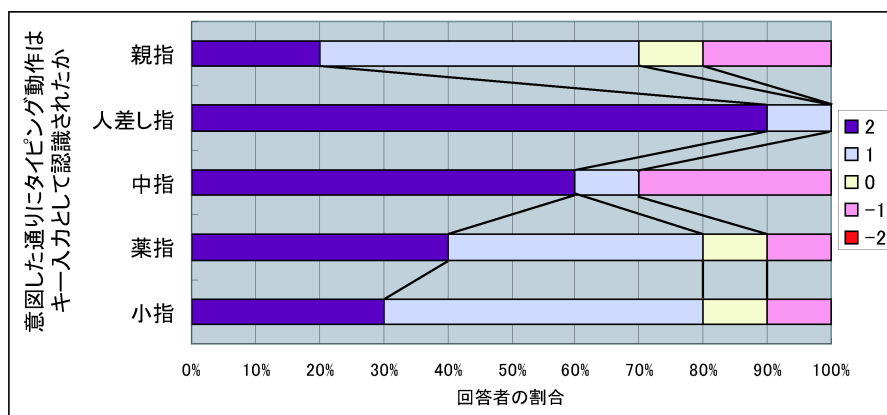


図 4.10 5段階評価アンケート結果

- 上記の質問に“はい”と答えた理由
  - － 親指が時々親指の付け根の肉のふくらみの奥に隠れてしまうことがあった。
  - － 親指は動かしやすいため、カメラの視野外まで振り下ろしてしまうことがあった。
  - － 中指を曲げると人差し指側に曲がってしまい、指が重なってカメラに映ってしまう。
  - － 中指を動かすと薬指が、薬指を動かすと中指がつられて一緒に動いてしまう。
  - － 小指を動かすと薬指がつられて一緒に動いてしまう。
  - － 小指を曲げると薬指側に曲がってしまい、指が重なってカメラに映ってしまう。
- その他、思ったこと
  - － 薬指を単独で動かすのは難しく感じたが、薬指と小指を連続させる動作はなぜかやりやすかった。
  - － タイピング動作がキー入力として認識されたときに、音によるリアクションが欲しい。

- 中指と薬指，薬指と小指の組み合わせが難しい.
- 指が少し疲れる.
- キーボードの表示画面がつねに画面上にあるので，確かめながらタイピングしやすい
- コツをつかむと簡単に入力できるようになった.

#### 4.4.5 考察

##### 認識ミスについて

表 4.4 やグラフ (図 4.7) から，一回目または二回目に親指をタイピングしている組み合わせや，一回目に中指をタイピングしている組み合わせの人数が多いことが分かる．認識ミスは，ユーザはタイピング動作をしているつもりでも，システムがタイピング動作がなされたと判断できていない場合に生じる．3.3.3 節で述べたタイピング動作検出の判定条件から考えると，認識ミスが生じる原因としては，

- 指を振り下ろす速さが遅い
- 指を振り下ろした高低差が閾値以下である

という点が挙げられる．

まず，中指は五本の指の中で一番長く，手首下に装着したカメラ位置から一番遠くに指先があるため，他の指と同じような感覚で振り下ろしても，映像中では移動距離が比較的短くなってしまうことが一因と思われる．また，アンケートの結果から，人によっては指を振り下ろした時に人差し指と重なってしまい，指先が検出できなくなるときがあることも原因であることが分かった．

次に，親指について考える．指を曲げる時は，自然と手のひらの中心部分に向かって折り畳まれる．ゆえに他の四本の指から離れた場所にある親指を振り下ろす際は，カメラから見た画面下方向ではなく，カメラから見た画面横方向，つまり親指の付け根に向かって親指が曲がってしまう人が多かったことが原因であった．このため，指を振り下ろした高低差が閾値以上にならず，タイピング動作と認識されなかった．

また、指を大きく振り下ろしすぎて小型カメラの視野外に指先が出てしまい、指先を認識できなくなったために認識ミスが生じることもあった。

上述した問題の一部は、システムに慣れれば容易に解決できることであり、実際、時間が経つにつれ認識ミスは少なくなっていた。しかし、カメラから見て指同士が重なり合ってしまう場合に指先位置が検出できなくなる問題に対しては改善が必要である。

### 誤入力について

図 4.5 やグラフ (図 4.8) から、一回目に小指をタイピングしている組み合わせや、二回目に中指・薬指・小指をタイピングしている組み合わせの場合に誤入力が生じやすいことが分かる。誤入力はタイピング動作をしようとした指とは異なる指がタイピング動作として認識されてしまうことにより生じるため、ある指を動かそうとした時に別の指が動いてしまっていることが原因である。中指と薬指と小指は、親指や人差し指に比べ、独立に動かしにくいことから、動かしやすい指とそうでない指との差が表れているものと考えられる。アンケートの意見からも、これら指のタイピング動作が難しいという意見が見られた。

### 過入力について

表 4.6 やグラフ (図 4.9) から、ほぼ全ての指の組み合わせでまんべんなく生じていることが分かる。過入力は、ある指がタイピング動作をしようとした時につられて動いてしまった別の指が、時間差でタイピング動作と認識されてしまうことにより生じる。この問題に対しては、ある指のタイピング動作をキー入力として受け付けた直後から一定時間、キー入力を受け付けないようにすることで改善されると考えられる。

### 実験 2 全体について

10 名の被験者が行った連続する二指の組み合わせ計 25 通りのタイピング試行に対して、一回目と二回目のタイピング動作を 1 セットとする、各々 5 セット (10

回) ずつのタイピング動作がシステムに認識されるまでの、エラー（認識ミス・誤入力・過入力）発生回数の合計の平均を、表 4.7 とグラフ（図 4.11）に示す。

表 4.7 タイピング動作が 10 回認識されるまでのエラー発生回数の合計の平均

一回目 \ 二回目	親指	人差し指	中指	薬指	小指
親指	1.2	0.6	2.1	3	1
人差し指	2	0.6	1.9	0.7	0.8
中指	0.5	1.1	0.6	2	1.4
薬指	1.7	0.3	1.1	0.4	1.2
小指	2.9	1.2	0.7	1	0.3

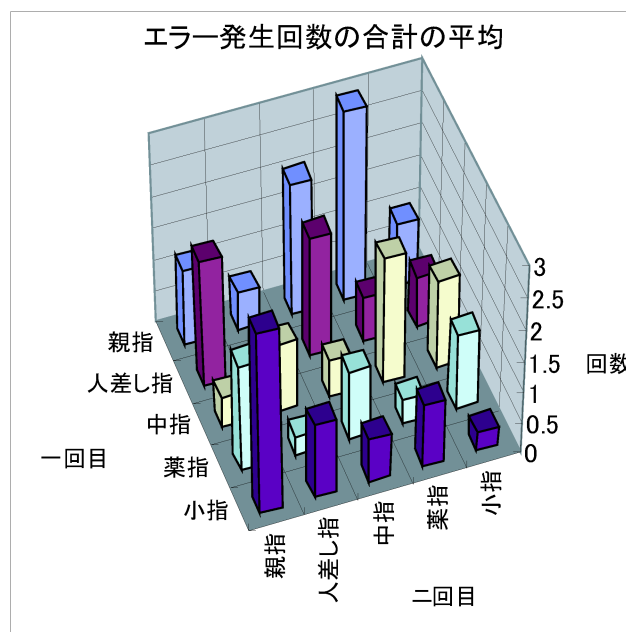


図 4.11 タイピング動作が 10 回認識されるまでのエラー発生回数の合計の平均

これらの結果から、試作システムにおけるキー入力の際の何らかのエラーの発生率は、最高で親指・薬指の組み合わせの約 23.1%（10 回認識させるまでに平均 3 回のエラー発生）、最低で小指・小指の組み合わせの約 2.9%（10 回認識させるまでに平均 0.3 回のエラー発生）であることが分かる。したがって、小型カメラを用いて各指のタイピング動作をキー入力として認識し文字入力を行うことは可能であることが分かった。

## 4.5. 文章入力による評価

### 4.5.1 実験目的

手首を傾けるキー選択操作と，中空での各指のタイピング動作によるキー入力操作を同時に行い，文章を入力してもらう。

本実験は AirGrabber を用いて被験者が実際に文章入力が出来ているかを確認するためだけのものではなく，仮想のキーボード上に存在するキーを万遍なく操作できているかを確認する意味もある。そのため，提示する例文としては，アルファベットおよびその他の特殊キーをほぼ全て使用するようなものを用意した。

### 4.5.2 実験方法

被験者には，あらかじめ用意した文章

a quick brown fox jumps over the lazy dog.

を覚えてもらい，文章の最初“a”から，最後の“.”までをテキストファイルに入力してもらう。その際，入力ミスにより間違った文字を入力した場合は，BackSpace キーを用いて間違った箇所を削除し，改めて正しい文章を入力しなおすものとし，文章入力開始から終了までに要した時間と，誤入力（ここでは4.3節で述べた“誤入力”および“過入力”の両方を含めた意味とする）の数，および，試行後の被験者へのアンケートによって試作システムを評価する。

なお，この文章はアルファベット26文字全てを必ず一度以上使用して作成された意味のある文章であり，スペースを含めて合計42文字で構成されている。そのため，完全に文章を入力するには仮想キーボード上に存在するキーのほぼ全てを使用する必要がある。

具体的なタスクの内容は以下の通りである。

1. 提示文 “a quick brown fox jumps over the lazy dog.” を覚えてもらう。
2. プログラム起動後，キー入力を ON にしてしばらく待機
3. コンソール画面に，カウントダウンが表示される
4. カウントダウン後の “GO” の表示を合図に，文章を入力し始める
5. 2.～4. を 3 回繰り返す，一番早く入力できたものを記録として残す

タスク終了後に行ったアンケートは以下の通りである。

- 意図した通りに文章は入力できたか  
(−2 (出来なかった) ~ +2 (出来た) の，5 段階評価)
- 特に入力しづらいキー，または操作があったか  
(はい，いいえ，の二択)
- 上記の質問に “はい” と答えた場合，その理由を記述
- その他，思ったこと。

### 4.5.3 結果

被験者 10 名による文章入力タスクにおける，

- 文章入力開始から終了までに要した時間 (所要時間)
- 総タイプ数
- 1 タイプにかかった時間 (総タイプ数 / 所要時間)
- 総タイプ数中における誤入力数
- 総タイプ数中における BackSpace キー使用回数
- 誤入力発生率 (誤入力数 / (総タイプ数 − BackSpace キー使用回数))
- 同じ文章を通常のキーボードを片手で操作して入力した場合の所要時間

を表 4.8 に，上記の所要時間と総タイプ数のみの分布図を図 4.12 のグラフに示す。

表 4.8 文字入力タスク結果

	被験者 a	被験者 b	被験者 c	被験者 d	被験者 e
所要時間 (秒)	100.06	117.62	142.12	127.42	319.7
総タイプ数 (回)	44	58	48	54	158
1 タイプにかかった時間 (秒)	2.27	2.03	2.96	2.36	2.02
誤入力数 (回)	1	8	3	6	58 ※
BackSpace キー使用回数 (回)	1	8	3	6	58 ※
誤入力発生率 (%)	2.3%	16%	6.7%	12.5%	58%
キーボードを片手で操作 (秒)	25.75	21.53	21.41	15.72	20.58

	被験者 f	被験者 g	被験者 h	被験者 i	被験者 j	平均値
所要時間 (秒)	143.97	125.56	131.13	120.59	121.47	144.96
総タイプ数 (回)	58	56	48	48	54	62.6
1 タイプにかかった時間 (秒)	2.48	2.24	2.73	2.51	2.25	2.32
誤入力数 (回)	8	7	3	3	6	10.3
BackSpace キー使用回数 (回)	8	7	3	3	6	10.3
誤入力発生率 (%)	16%	14.3%	6.7%	6.7%	12.5%	19.7%
キーボードを片手で操作 (秒)	19.59	20.08	24.86	21.04	25.63	21.62

※ 58 回中 3 回, BackSpace キーの押しすぎによる誤入力が含まれている

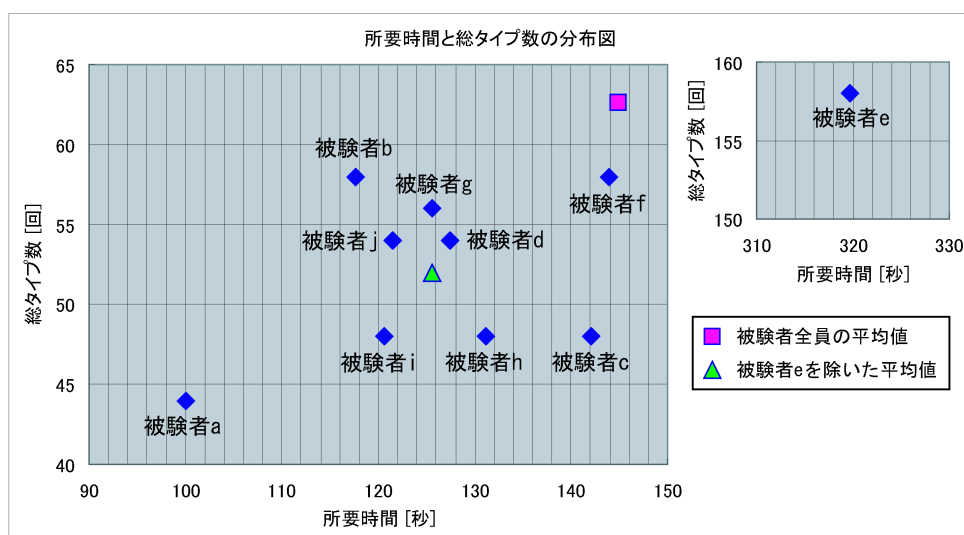


図 4.12 所要時間と総タイプ数の分布図

#### 4.5.4 アンケート結果

- 図 4.10 に 5 段階評価アンケートの結果を示す。

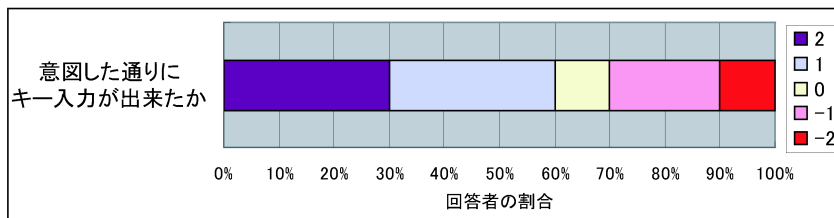


図 4.13 5 段階評価アンケート結果

- 特に入力しづらいキー，または操作があったか（はい，いいえ，の二択）
  - － はい 7名
  - － いいえ 3名
- 上記の質問に“はい”と答えた理由
  - － キーボードの左側にあるキーを選択し入力するのが難しい。
  - － ホームポジションになかなか戻れなかったり，勝手にホームポジションに戻ってしまう時がある。
  - － キーボードの右側を選択した時とそれ以外の領域を選択した時とで，小指に割り当てられるキーの内容が変わるためややこしい。
  - － 中指・薬指・小指でのキー入力が認識されづらい。
  - － BackSpace キーが通常のキーボードのようにキーボードの右側に無いため違和感がある。
  - － Enter キー，Space キー，BackSpace キーの配置が分かりにくい。
  - － BackSpace キーの入力が難しい。
- その他，思ったこと。
  - － 操作方法に慣れれば，片手でもそれなりに早く入力ができそう。
  - － キーボードの領域選択の際，キーが勝手に入力されることがある

- BackSpace キーは使用頻度が高いはずなので、動かしにくい小指ではなく、他の指でタイプできるようにするか、全く別の簡単な入力方法で代替するほうが良い
- システムが指先を認識できるように手首から先を一定の形に保ったままの状態を保つのがつらい。
- キーボードの領域選択の際、手首を傾ける動作をするとキーが誤入力されることがある。
- キーボードの上下の段の領域選択の際に、操作を間違えやすい。
- 勝手にキーが入力されてしまうことが多い。
- キーボードの上の段を選択するとき手首を後ろに傾ける（肘から先を上げる）と、それにつられて手首から先も上がってしまい、小型カメラに手が映りにくくなり指先が検出できなくなる。
- ディスプレイ、指、手首、ヒジ、の4箇所と同時に神経を集中しなければならぬのは難しい。
- 片手でQWERTY配列のキーボードを操作するのは少し疲れる。
- キー入力操作に対する反応が遅い。

#### 4.5.5 考察

##### 文章入力の精度

表 4.8 とグラフ (図 4.13) では、ほとんどの被験者は、提示した “a quick brown fox jumps over the lazy dog.” の計 42 文字から成る文章を、所要時間 100 秒～145 秒、総タイプ数 44 回～58 回で入力できていることが示されている。

各々のデータを見ていくと、被験者 e だけは 6 項目中 5 項目において、他の 9 名とは対照的な突出した結果が出てしまっていることが分かる。被験者 e が文章入力タスクを行った際のキー入力ログを解析した誤入力の詳細を表 4.9 に示す。この表からは、全ての指で他の被験者と比較しても高い割合で誤入力が生じており、特に中指・薬指・小指で際立っていることが分かる。これらの誤入力は 4.4 節の実験の考察で述べた原因により生じているものであるが、特に被験者 e の場合、

表 4.9 被験者 e の誤入力の詳細

	親指	人差し指	中指	薬指	小指
被験者 e の総誤入力数 (58 回) における各指ごとの誤入力発生回数および割合	5 回 8.6%	5 回 8.6%	18 回 31%	16 回 27.6%	14 回 24.1%

表 4.10 被験者 e を除いた平均値

所要時間 (秒)	125.55
総タイプ数 (回)	52
1 タイプにかかった時間 (秒)	2.41
誤入力数 (回)	5
BackSpace キー使用回数 (回)	5
誤入力発生率 (%)	11%
キーボードを片手で操作 (秒)	21.73

- タイピング動作を行ってもシステムが想定した動作になっていないため、タイピング動作と判断できない
- 指を振り下ろした時に指同士が接触または重なり合っカメラから見えてしまった時に、認識ミスや誤入力が生じる

というケースが顕著に現れていた。このことから、試作システムは現時点において、ユーザごとに異なる手形状、および指の動かし方のクセなどに対するロバスト性が十分ではないことや、カメラから見たときに指同士が接触または重なり合うことにより指先検出に失敗し、誤入力が発生してしまう問題に対する改善が必要であることが分かった。

次に、被験者 e を除く他の被験者に注目した平均値を表 4.10 に示す。この表からは被験者 e を除く被験者が、提示した 42 文字の文章を、平均的に 125.55 秒、総タイプ数 52 回で入力が可能であることが分かる。また表 4.8 と併せて見てみると、誤入力率に関しては、上手に使用できない人で六割ほどになるが、多くの人は二割以下、平均して一割前後 (11%) ほどであることが分かる。

以上の結果から、試作システムを用いて実際に文字入力が行えていること、および仮想キーボード上のキーのほぼ全てが使用可能であることが確認された。

## 文章入力の所要時間

表 4.8 からは、通常のキーボードを片手で操作するのに比べ所要時間は約 6 倍、1 タイプあたりにかかる時間は全体的に 2 秒を超えており、あまりキー入力速度が速いとは言えないことも分かる。試作システムではキー配列として通常のキーボードと同じ QWERTY 配列を用いているが、キーボードを片手で操作して同じ文章を入力した場合の所要時間と比較しても、かなり差が出てしまっている。したがってこの時間差は、通常のキーボードとの操作方法の違いから生じており、具体的には、

- (次に入力したいキーがを選ぶために)  
キーボード上の領域を移動する際にどのように手首を傾ければ良いか
- (目的のキーが存在する領域を選択した後に)  
どの指にどのキーが対応しているか

を考えなおす時間となって現れていると考えられる。これらに関しては、システムに慣れることで大幅に改善されることが考えられる。

試行後のアンケートの結果の入力速度に関するものとしては、キー入力操作に対する反応が遅いという意見が見られた。これに関しては 4.2 節で述べたように動作レートが 7~10fps であることが原因であり、キー入力に時間がかかってしまう一因となっている。しかしシステムを動作させる PC の環境による問題であるため、マシン性能を上げることで解決が可能である。

また、他の意見として、BackSpace キーを主とする特殊キーの配置や入力方法に対する内容も数多く見られた。今回の試作システムのように、ユーザが全員初心者であるという状況であれば、入力した文字を修正するためのキーは必要不可欠なものである。したがって、BackSpace キーが初心者にも分かりやすく、かつ操作しやすいものであるならば、ユーザはキー入力の際の誤入力に素早く対応できるため、結果的にキー入力速度が向上するものと考えられる。

## アンケート結果

本節で述べた実験のアンケートでは、タイピング動作の認識のみを確認した4.4節の実験時とは異なる意見が見られた。4.4節の実験では、カメラが指先を認識できるように、手を開いた状態で維持し続けることに対する意見は寄せられなかった。しかし、本節の実験で手首を傾けてキー選択操作を同時に行うようになると、手首を傾ける動作と手を開いた状態で維持しつづけることを同時に行うのは難しいという意見が見られるようになった。原因としては、手首を傾ける動作を行った際に、手首から先もつられて一緒に上下左右に微妙に動いてしまうことが挙げられる。また、キー選択操作を行った際に意図しないキー入力となされたという意見が見られた、これも同様の理由から、手首を傾ける操作につられて微妙に動いてしまった指の動きを、タイピング動作として間違えて認識してしまったことが原因である。これに関しては、キー選択操作をした直後から一定時間のキー入力を、意図しない入力と見なして受け付けないようにすることで対処できると考えられる。

また、片手でQWERTY配列のキーボードを操作することに関する意見も多く見られた。第1章で述べたようにQWERTY配列は人々に長く親しまれ続けたものではあるが、両手で操作するという前提があつてのことであるため、片手で操作することは少し特殊と言える。また日本語入力に関しては、特にローマ字入力で日本語を入力する場合、母音となるキーが多用されるため、QWERTY配列のキーボードは片手操作することを考慮すると最適な配列とは言い難い。実際、片手操作で日本語入力しやすいキー配列についての研究[29]も盛んに行われている。

AirGrabberは実際にキーボードを必要としないキーボードであるため、システム側でキー配列や配置キー数を変更することが容易であるという利点がある。本実験においては、仮想のキーボード上に配置したキーを使用して文章入力が可能であることを確認できたため、ユーザが片手で操作しやすいキー配列や、日本語入力に特化した配列等、自分の好みに合わせて変更することにより、このような問題に対して柔軟に対処することが可能である。

## 第5章 システムの考察

第4章における実験からは，AirGrabberの試作システムに関して以下の事柄が示された．

- 手首を前後左右に傾けるキー選択操作は，容易に実行できるものであった
- 中空での指のタイピング動作は，ほぼ被験者の意思通りにキー入力として認識された
- キー選択操作とキー入力操作を組み合わせた実際の文章入力は，ほとんどの被験者の誤入力発生率が二割以下であり，たまにキー入力の誤認識があったがほぼ正しく入力できた

また，第4章で述べた本実験のタスクを全て終了した後に行ったアンケートの内容については以下の通りである．

- 試作システムの良い点は何ですか．
  - － 両手でなく片手で文字入力が可能であること．
  - － 指先が拘束されず，かつ何にも触れずに使用できるため，手で物を触りたくない時でも使えること．
  - － キーボード無しで文字入力が可能なのはうれしい．
  - － 使用感が普通のキーボードとあまり変わらないので，慣れれば直感的で使いやすい．
  - － 機器を装着するだけで使えるので，どこでも使える環境が提供されやすいと思う．

- 試作システムの問題点，および改善して欲しい点は何ですか。
  - － 両手入力にも対応して欲しい。
  - － 手首が締め付けられる。
  - － カメラや他の装置をもっと小型化して欲しい。
  - － ホームポジションの位置を分かりやすくして欲しい。
  - － 片手で操作するキーボードなのに通常のキーボードと同じ QWERTY 配列なのは使いづらい。
  - － 入力操作に対するフィードバックの遅延が少し長く，一文字入力するのに手間がかかる。
  - － 指同士が触れ合っても常にキー入力操作が正しく認識されるようにして欲しい。
  
- 試作システムの有用性を感じますか。(はい，いいえ，の二択)
  - － はい 2名
  - － いいえ 8名

(上記の質問に“いいえ”と答えた場合)

試作システムの問題点が改善されたならば，それに有用性を感じますか。(はい，いいえ，の二択)

  - \* はい 8名
  - \* いいえ 0名

実験で示された事柄から，AirGrabber の基本的な操作方法はユーザが容易に理解できるものであり，実際に試作システムを用いたキー入力は可能であることが分かった。したがって，AirGrabber はウェアラブル環境における文字入力の機能を十分に提供できていることを確認できた。

また，アンケートの結果を見ると，AirGrabber の特長である片手入力や，手首のみに必要機器がまとまる点，操作方法が普通のキーボードと類似している点，などが良い点として評価されていることが分かる。同時に，評価実験を行った試作システムに関しては有用性を感じた被験者は少なかったものの，問題点が解決

されれば AirGrabber は非常に有用な文字入力インタフェースとして受け入れられ得ることが分かった。

しかし、現在のシステムでは以下に示すような問題があり、これらを解決していくことが今後の課題として挙げられる。

### 人それぞれに異なる手指の形状や、指の動かし方のクセなどによるロバスト性の欠如

人ごとに手の肉付きや指の微妙な湾曲具合、指を曲げる際のクセなどは非常に様々である。そのため、同じ指のタイピング動作であっても、小型カメラから撮影した指先の動きは各人ごとの差は実に様々であった。AirGrabber の試作システムは製作者の手の形状に最適化されるように作成されてきたため、今回の実験の結果から、手指の形状および動かし方のクセに対するロバスト性が不十分であることが分かった。

例えば親指のタイピング動作が認識されにくかった点について考えると、システムがタイピング動作と認識できる親指の動きは図 5.1 に示すように、画面下方向へ親指を振り下ろしたものであるが、親指をどうしても図 5.2 に示すように、手の内側、つまり画面横方向へ向かって曲げてしまうクセがある被験者が少なからず存在していたことが分かった。そのため、4.4 節の実験では親指のタイピング動作が認識されない被験者が多かった。

また、独立して動かし難い指について考えると、例えば薬指のタイピング動作は図 5.3 に示すように、小指がつられて一緒に動いてしまう被験者が多かった。このつられて動いた小指の移動量が薬指のタイピング動作よりも大きくなってしまふことで、システムが本来ユーザが意図した薬指ではなく、小指によるタイピング動作であると誤って判断してしまうことがあった。

上記のような指の動かし方によるタイピング動作認識精度のロバスト性を向上させるためには、使用前にキャリブレーションを行い、各指のタイピング動作のクセをシステムに認識させることが必要がある。これにより、現在のシステムでは判断できないタイピング動作も認識できるようになる。また、曖昧なタイピング動作を特定の指によるキー入力として認識させることも可能となり、独立で動

かし難い中指・薬指・小指によるキー入力動作も円滑に行えるようになると考えられる。

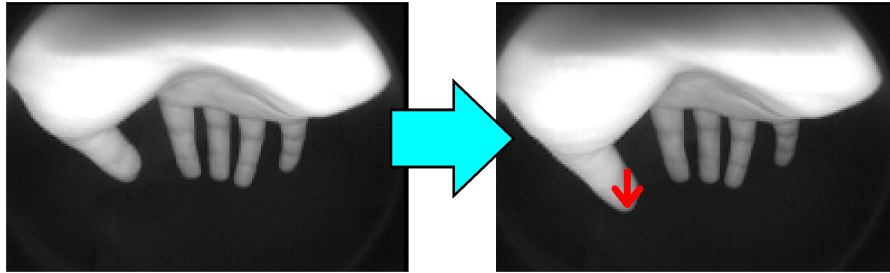


図 5.1 タイピング動作と判断できる親指の動き

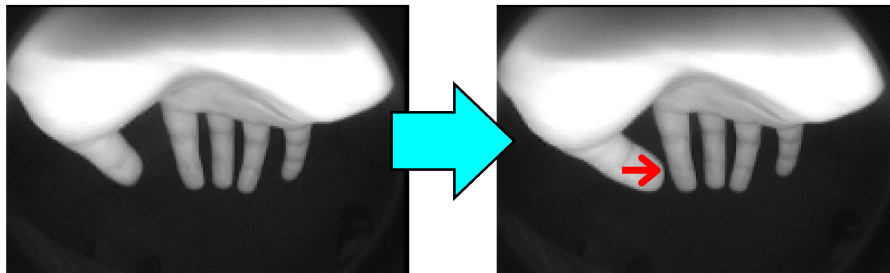


図 5.2 タイピング動作と判断できない親指の動き

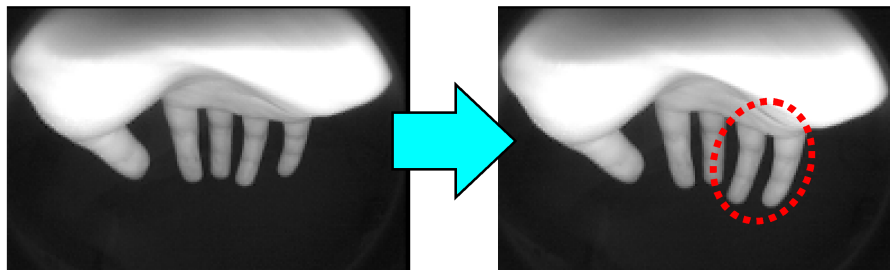


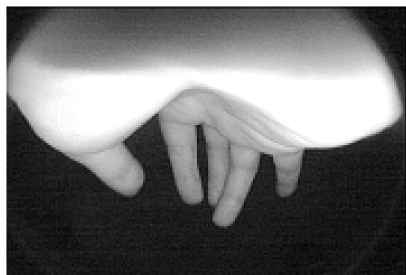
図 5.3 独立して動かし難い薬指の動き

(小指が薬指のタイピング動作につられて一緒に動いてしまっている)

指同士が触れ合ったり、カメラから見て重なって映ってしまう場合に、キー入力操作が正しく認識されない

試作システムでは指先を可能な限り検出し続けるために、細線化による指先検出処理だけではなく、二値化した映像の手指の輪郭線をトレースすることで指先を検出する手法も併用していた。

しかし、図 5.4 に示すような、薬指のタイピング動作をおこした時に振り下ろした指が隣の中指と重なってしまっている場合は、上記の手法でも指が正確に 5 本検出できていないことが分かる。



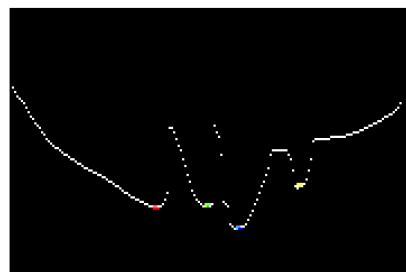
薬指を振り下ろした時に中指と重なって映ってしまった場合



左の映像を二値化



二値化した映像に細線化処理をしたものから指先を探索



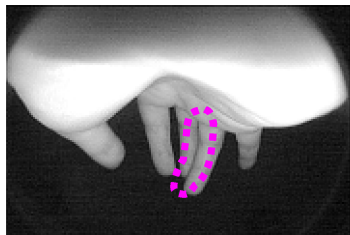
二値化した映像の手領域の最も画面下にある輪郭線から指先を探索

図 5.4 指が重なって映った場合

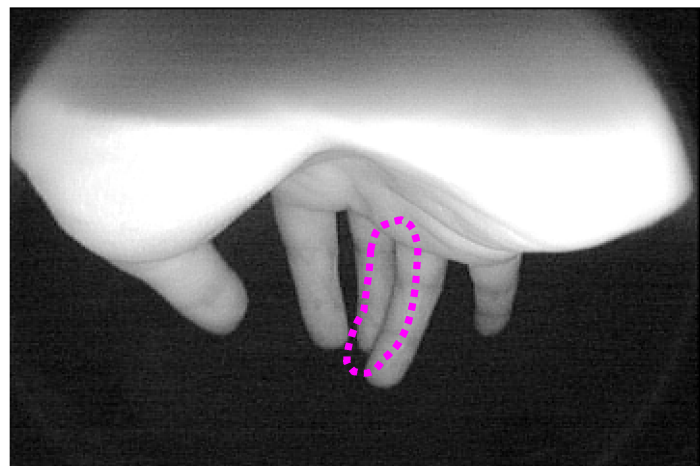
小型カメラで撮影した映像を見ると、指同士が接触していたり重なっていたとしても、指と指の間には細くとも人間の目で判断できるほどの太さの輪郭線が存在している。しかし、画像処理により二値化をした時点で、人間の目で判断できる指の輪郭線は消えてしまい、線として認識することが出来なかった。現在のシ

システムでは画像を二値化する際に固定閾値を用いているが、指と指の間の細い輪郭線を手領域として残さないためには閾値を上げる必要がある。しかし、閾値を上げると暗く映りがちな指先部分を手領域として残せなくなってしまう。

したがってこの問題に関しては、撮影した映像を二値化する際に画像をいくつかの小領域に分割し、各小領域ごとに濃度ヒストグラムを調べ、そこにエッジが含まれていると判断された場合に、その小領域の性質に最適な閾値を設定する動的閾値処理を行うことで解決できると考えられる。また、現在のシステムではキャプチャ画像サイズが180×120ピクセルと小さく、画像処理の前段階の画像をデータとして取り込む際に画像サイズを縮小することにより、細い線が目立ちにくくなることも原因の一つと考えられるため、高解像度の映像を基に画像処理を行うことも有効であると考えられる。



キャプチャ画像サイズ  
180×120ピクセル



キャプチャ画像サイズ360×240ピクセルの場合

図 5.5 指と指の間の輪郭線

## 赤外光を使用しているため、屋外で使用できない

現在、手領域の抽出は、手首の下の小型カメラのすぐ近くに装着した光源から照射された赤外光に照らされた領域を、閾値処理を行って抽出することで実現している。したがって、小型カメラの視野内に赤外光を反射したり、太陽光のように赤外光を発する何かがあった場合は、正しく手領域を抽出することが難しくなる。そのため、試作システムの状態では屋外の使用には不向きであると言える。しかし、ウェアラブルコンピュータの利用方法を考えると、屋外での使用は容易に想定されるため、太陽光に影響を受けない、より確実な手領域抽出方法を構築する必要がある。このためには、赤外光だけでなく、手の肌色情報などの複数の画像情報を複合的に用いる必要がある。

## 第6章 結論

本論文では、中空で手と指をあたかもキーボードを操作しているかのように動作させることで、実際のキーボードを必要とせずにキー入力が可能で、ウェアラブルコンピュータへの適応を考慮に入れた文字入力インタフェース“AirGrabber”を提案した。

AirGrabberは、入力デバイスとして小型カメラと傾斜センサを使用し、これらを手首に装着することで、既存のキーボードの特長であるタイピング動作によるキー入力が可能である。これにより、携帯性を高めるために小型化された特殊なキーボードにおける、既存のキーボードとは異なる操作方法は必要なくなる。また、本研究と同じく主に手に機器を装着して中空でのタイピング動作によるキー入力を可能としたインタフェースでは避けられない身体の拘束度合いを削減することに成功した。

本研究での実験においては、手首を前後左右に傾ける動作をキー選択操作に対応付けが行えることと、タイピング動作に類似した感覚で指を上から下に振り下げる動作をキー入力操作として認識できることを確認したことから、試作システムを用いたキー操作を行う上で必要となる操作が、ユーザにとって容易に操作しうるものであることを示した。同時に、文字入力を行う上でも大きな問題が無く、AirGrabberの実際の使用は十分に可能であることを示した。

ウェアラブルコンピュータは現在、試作から一般での使用へ向けての過渡期にさしかかっているとと言えるだろう。ウェアラブルコンピュータは様々な分野において多種多様な対応が可能であり、医療分野や遠隔地での操作、ビジネスでの使用などに活用する研究が盛んに行われている。過去に弾道計算や暗号解析といった限られた用途で使用されていたコンピュータが、ノートパソコンやPDAなどに形を換え我々の生活に広く浸透していったように、ウェアラブルコンピュータ

もこれからの社会において、我々にとって便利で快適かつ必要不可欠な存在として認識され、利用されていくだろう。そのような未来としてもはや想像の産物ではなく現実味をおびてきているユビキタスコンピューティング社会を実現するには、ウェアラブルコンピュータを情報パートナーとして活用するために、時間と場所を問わず気軽に使える文字入力インタフェースが必要不可欠であり、将来に向けてそれは切望される存在となるはずである。AirGrabber は必要となる機器を手首部分に装着するだけで文字入力が行えるため、来るべき未来を実現する一助となることが期待される。

# 謝辞

像情報処理学講座において本研究に取り組む機会を与えて下さり、御指導、御鞭撻を賜りました情報科学研究科 千原國宏教授に衷心より御礼申し上げます。

並びに、副指導教官として御助言を頂きました情報科学研究科 木戸出正繼教授に深甚なる謝意を表します。

本研究の全過程を通じて熱心な御指導、御助言を賜りました情報科学研究科 眞鍋佳嗣助教授に篤く御礼申し上げます。

本研究に関して様々な観点からの御意見、御教示を頂いた情報科学研究科 安室喜弘助手、井村誠孝助手、ならびに 村上満佳子教務職員 に深謝の意を表します。

本研究に関して数多くの御助言を頂きました情報科学研究科 増田泰研究員、佐々木博史研究員、試作システムの評価実験の際に被験者としても御協力下さいました末永貴俊研究員、プログラム作成において幾度と無く御協力を頂き、同時に試作システムの評価実験の際に被験者としても御協力下さいました像情報処理学講座博士後期課程 南広一氏に深く感謝致します。

像情報処理学講座において常日頃から暖かい心配りをして頂き、試作システムの評価実験の際には被験者として御協力下さいました 川本桂子秘書に心から感謝申し上げます。

そして、試作システムを評価実験する際に被験者として協力して頂いた研究室の方々に感謝致します。

試作システムの性能を上げるために実験台になってくれた中手君、松井君、ありがとう。

最後に、常日頃から研究や日常生活等様々な面でお世話になりました千原研究室の皆様に、ここに改めて感謝する次第です。

## 参考文献

- [1] スコット・マッカートニー著, 日暮雅通訳: ENIAC 世界最初のコンピュータ開発秘話, パーソナルメディア, 2001.
- [2] 増井俊之: インターフェースの街角 (15) 「ウェアラブル・コンピュータのテキスト入力法」, UNIX MAGAZINE, Vol.2, pp141-148, 1999.
- [3] M. Kolsch, M. Turk: Keyboards without Keyboards: A Survey of Virtual Keyboards; Department of Computer Science University of California, Santa Barbara, Technical Reports for 2002.
- [4] 大塚 巖, 小野 晋一, 石垣 一司, 松本 啓太, 上田 義弘: 片手キーボードの入力性能—QWERTY キーボードとの比較—, 第7回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.5-8, 1991.
- [5] L3 Systems: WristPC Keyboard,  
<http://www.l3sys.com/wristpc/wristpc.html>
- [6] Edgar Matias, I. Scott MacKenzie and William Buxton: Half-qwerty: Typing with one hand using your two-handed skills, Companion of the CHI '96 Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.69-70, 1994
- [7] Matias Corporation: halfkeyboard, <http://www.halfkeyboard.com/>
- [8] FrogPad: FrogPad, <http://www.frogpad.com/>
- [9] Handykey Corporation: Twiddler2, <http://www.handykey.com/>

- [10] Doug A. Bowman, Christopher J. Rhoton, and Marcio S. Pinho: Text Input Techniques for Immersive Virtual Environments: an Empirical Comparison, Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, pp.2154-2158, 2002.
- [11] 杉本 正勝: 片手操作キーカード (SHK) による日本語入力, 情報処理学会モバイルコンピューティング研究会研究報告, Vol.97, No.54, pp.1-6, 1997.
- [12] 株式会社富士通研究所: 「日本語入力用カスタネット型片手キーカード」の技術開発に成功, <http://pr.fujitsu.com/jp/news/1997/May/28-3.html>
- [13] Canesta: Canesta Keyboard, <http://www.canesta.com/>
- [14] VKB: Vierual Keyboard, <http://www.vkb.co.il/>
- [15] Virtual Devices, Inc.: VKey, <http://www.virtualdevices.net/>
- [16] Vaughan R. Pratt: Thumbcode: A Device-Independent Digital Sign Language, <http://boole.stanford.edu/thumbcode/>
- [17] Key-Glove, <http://www.eyetap.org/wearable/keyglove.html>
- [18] Samsung Corporation: Scurry, <http://www.samsung.com/>
- [19] Kittytech: KITTY, <http://www.kittytech.com/>
- [20] Essential Reality: P5 glove, <http://www.essentialreality.com/>
- [21] オリンパス株式会社: 「何時でも」で作業が可能ー ジェスチャでマウス、キーボードに変わる入力を実現ー ウェアラブル操作インタフェース技術の開発, <http://www.olympus.co.jp/jp/news/1999b/nr991201woitj.cfm>
- [22] Senseboard Technologies: Senseboard, <http://www.senseboard.com/>
- [23] 福本 雅朗, 平岩 明, 曾根原 登: ウェアラブルコンピュータ用キーボード FingeRing, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J79-A, No.2, pp.460-470, 1996.

- [24] A. Vardy, J. Robinson, L. Cheng: The WristCam as Input Device, Third International Symposium on Wearable Computers (ISWC '99), pp.199-202, 1999.
- [25] B. Howard and S. Howard: Lightglove: Wrist-worn virtual typing and pointing, 5th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC'01), pp.172-173, 2001.
- [26] 藤本 昌宏, 井村 誠孝, 安室 喜弘, 眞鍋 佳嗣, 千原 國宏: 小型カメラを用いたバーチャルキーボードの提案; 第47回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, Vol.47, pp.601-602, 2003.
- [27] 藤本 昌宏, 井村 誠孝, 安室 喜弘, 眞鍋 佳嗣, 千原 國宏: 腕部装着型カメラを用いた非接触タイピング可能なバーチャルキーボード; ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol.5 No.4, pp.43-46, 2003.
- [28] 井上誠喜, 八木伸行, 他: C言語で学ぶ実践画像処理, オーム社, 1999.
- [29] 北村 拓郎, 森 清人: 新文字入力方式, 情報処理学会モバイルコンピューティング研究会研究報告, Vol.99, No.13, pp.39-41, 1999.