

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

# 立体キーボードを用いたVR向け文字入力手法

柳原 直貴

修士（工学）

（コンピュータサイエンス専攻）

指導教員 志築 文太郎

2020年3月

## 概要

Web 検索アプリケーションやシネマアプリケーションなどの VR アプリケーション上にて、文字入力をする場面は多い。VR 上にて文字入力を行う際、ユーザは Web 検索アプリケーション（またはシネマアプリケーション）上の検索ボックスに片手にて把持が可能な VR 専用のコントローラ（VR コントローラ）から放たれるレイをターゲットに向ける操作（レイキャスト）を行い VR コントローラのボタンを押すことにより、仮想平面キーボードを表示させることができる。しかし、仮想平面キーボードを用いる VR アプリ上の汎用的な文字入力は、キーの選択にレイキャストを用いるため、1 文字入力するのに要する時間が長い点、および面積の狭いキーに対してレイキャストで選択することは向いていない点から非効率である。

これを解決するため、立体キーボードであるキューブキーボード、および 2 次元のジェスチャ入力を 3 次元に拡張した 3 次元ジェスチャ入力を提案した。キューブキーボードの入力性能を調査した結果、WPM は使用回数が増えるほど高くなること、MSD エラー率が低いこと、および SUS スコアは GB 手法にて 66.3 であることがわかった。

キューブキーボードの課題であった、ジェスチャ入力の精度が低いこと、キーが把握しにくいこと、および疲労度が高いことを解決するため、次にカーブキーボードを提案した。平面キーボードとカーブキーボードの入力性能を比較調査した結果、キーボード間の WPM に有意な差はなかったが、キーボード間の TER に有意な差がありカーブキーボードは平面キーボードよりも TER が低い結果となった。よって、カーブキーボードは従来の平面キーボードよりも入力精度が高いことがわかった。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	VR上の文字入力	1
1.1.1	VR上にて文字入力を要する場面	3
1.1.2	VR上の文字入力の課題	3
1.2	本研究の目的およびアプローチ	4
1.2.1	3次元に拡張されたジェスチャ入力	4
1.2.2	立体キーボード	4
1.3	貢献	5
1.4	本論文の構成	5
<b>第2章</b>	<b>関連研究</b>	<b>6</b>
2.1	文字入力手法	6
2.1.1	VR環境における文字入力手法	6
2.1.2	ジェスチャ入力を用いた文字入力に関する研究	7
2.2	3次元ポインティングに関する調査	8
2.2.1	様々な環境下における3次元ポインティング性能の影響を調査した研究	8
2.2.2	その他の手法を用いた3次元ポインティングに関する研究	9
<b>第3章</b>	<b>キューブキーボード</b>	<b>11</b>
3.1	背景	11
3.2	キーボードの設計	11
3.3	文字入力手法	12
	カーソルの移動速度に基づくキーの選択手法	14
	カーソルの移動軌跡に基づく単語予測手法	14
<b>第4章</b>	<b>実験1：キューブキーボードの性能評価実験</b>	<b>18</b>
4.1	実験設計	18
4.1.1	実験装置	18
4.1.2	実験参加者	18
4.1.3	入力対象のフレーズ	18
4.1.4	実験手順	19
4.1.5	タスク	20

4.1.6	評価対象 . . . . .	20
4.2	実験結果および解析 . . . . .	21
4.3	議論 . . . . .	21
<b>第5章</b>	<b>カーブキーボード</b>	<b>23</b>
5.1	キーボードの外観 . . . . .	23
5.2	キーを球面に配置することによる入力性能への影響 . . . . .	23
5.2.1	立体キーボードにおける予測精度の向上 . . . . .	23
5.2.2	疲労度の低減 . . . . .	25
5.3	ジェスチャ入力の改良 . . . . .	25
5.4	文字入力方法 . . . . .	26
5.5	予測候補の選択方法 . . . . .	26
<b>第6章</b>	<b>実験2：カーブキーボードの性能評価実験</b>	<b>28</b>
6.1	実験設計 . . . . .	28
6.1.1	実験装置 . . . . .	28
6.1.2	実験参加者 . . . . .	30
6.1.3	入力対象のフレーズ . . . . .	30
6.1.4	キーボードの形状 . . . . .	30
6.1.5	実験手順 . . . . .	31
6.1.6	タスク . . . . .	31
6.1.7	評価対象 . . . . .	33
6.2	実験結果および解析 . . . . .	33
6.3	議論 . . . . .	36
6.3.1	カーブキーボードの入力性能 . . . . .	36
6.3.2	ジェスチャ入力の課題 . . . . .	36
6.3.3	単語予測の失敗が頻出した箇所 . . . . .	36
6.3.4	キーを配置する球面の位置の検討 . . . . .	37
6.3.5	キーボードのパラメータに関する課題 . . . . .	37
<b>第7章</b>	<b>議論</b>	<b>38</b>
7.1	キー配置の検討 . . . . .	38
7.2	触覚フィードバックの有無による入力性能の変化 . . . . .	38
7.3	他の言語に対応した立体キーボードの検討 . . . . .	39
7.4	3次元ジェスチャ入力の改良 . . . . .	39
<b>第8章</b>	<b>まとめ</b>	<b>40</b>
	謝辞	41

参考文献	42
付録 A 実験の際に用いた各種書類	50
A.1 実験計画書	51
A.2 実験同意書	54
A.3 ビデオ画像の公開についての承諾書・承諾変更書	57
A.4 実験後アンケート（キューブキーボード）	58
A.5 実験前アンケート（カーブキーボード）	61
A.6 実験後アンケート（カーブキーボード）	62

# 目次

1.1	VR アプリの一例. a: 仮想ディスプレイを用いた Web 検索アプリケーション. b: 映画館にいる感覚で動画を閲覧できるシネマアプリケーション. . . . .	2
1.2	対象とした VR システム. . . . .	2
1.3	汎用的な VR 上の文字入力方法. ‘K’ を入力する例を示している. . . . .	3
3.1	キューブキーボードの外観. . . . .	12
3.2	文字入力のフローチャート. . . . .	13
3.3	予測候補キーの表示位置. 一番左のキーのみ SB 手法により得られた文字列を 表示. . . . .	16
4.1	実験の様子. . . . .	19
4.2	実験にて使用した VIVE コントローラ. 左: コントローラの正面図. 右: コン トローラの側面図. . . . .	20
4.3	セッションごとの各手法の WPM. . . . .	21
4.4	セッションごとの各手法の MSD エラー率. . . . .	22
5.1	カーブキーボードの外観. . . . .	24
5.2	平面キーボード上およびカーブキーボード上にて “tip” と “top” を入力した軌 跡の例. . . . .	24
5.3	Shape Matching の例. 軌跡 A と軌跡 B の特徴点を比較し, その差が小さいほ ど類似した軌跡と判別される. . . . .	25
5.4	Oculus Touch Controller の入力の割り当て. . . . .	26
5.5	軌跡を元に予測された候補の表示方法. 最大 3 つまで表示され, 第一候補の キー (青いキー “text”) はジェスチャ入力後に自動入力される. . . . .	27
6.1	カーブキーボードの性能評価実験. a: 平面キーボード+レイキャスト入力 (PR). b: カーブキーボード+レイキャスト入力 (CR). c: 平面キーボード+ジェスチャ 入力 (PG). d: カーブキーボード+ジェスチャ入力 (CG). . . . .	29
6.2	実験の様子. . . . .	30

6.3	キーボードの設計. a: 平面キーボードを一部拡大した図. キー1辺のサイズは5 cm であり, キー間は1 cm 空けて配置されている. b: カーブキーボードを上部から見下ろした図. キー1辺のサイズは平面キーボードと同じ5 cm である. 配置する球面の半径は50 cm とし, 100度の角度の範囲内に配置されるように設計されている. . . . .	31
6.4	4手法の入力性能比較実験のフローチャート . . . . .	32
6.5	WPM の結果. . . . .	33
6.6	エラー率の結果. a: MSD エラー率の結果. b: TER の結果. . . . .	34
6.7	SUS の結果. . . . .	34
6.8	事後アンケートの結果. 左: 「4手法のうちどの手法を使いたいと思ったか」という問いに対する結果. 右: 「レイキャスト入力にてどちらのキーボードを使用したいか」および「ジェスチャ入力にてどちらのキーボードを使用したいか」という問いに対する結果. . . . .	35
7.1	軌跡の形状の違い. . . . .	39

## 表目次

3.1	キューブキーボードのキーの配置. . . . .	12
3.2	カーソルの移動軌跡の曲がる位置を基に $S_{input}$ を分割した例. . . . .	15
3.3	辞書の単語とマッチした単語および検索時間. . . . .	15
4.1	Vertanen ら [VK11] のフレーズセットの文字列の一例. . . . .	19



# 第1章 はじめに

仮想現実（VR）は、コンピュータ上で生成された仮想空間の映像を HMD に投影させることにより、ユーザに仮想空間を現実空間として知覚させる技術である。VR を用いることにより、空中に仮想的な物体（仮想物体）や仮想のディスプレイを配置することおよび別の部屋に瞬間的に移動することなど、現実空間では不可能なことが可能になる。VR を活用したアプリケーション（VR アプリ）として、仮想ディスプレイを用いた Web 検索アプリケーションや映画館にいる感覚で動画を閲覧できるシネマアプリケーションなどが挙げられる（図 1.1）。また、人体に影響を及ぼす職業を補助する訓練用の VR アプリも存在する [MYA<sup>+</sup>19]。医療に関する従来の訓練は、実作業に近くなるようにするため、現実空間の手術室内にて人型の練習器具を用いた模擬訓練であった。しかし、腹腔鏡手術のように人間の身体に小さい穴を空けるだけで行われる手術のような高度な手術が登場し、実作業に近い模擬訓練が困難な場合もありうる。さらに、実作業を行う手術室を占有するため、手術を頻繁に行う病院では訓練をする機会が減ってしまう。

実作業との違いを最小限にするために、これら人体に影響を及ぼす作業の訓練には、より実作業に近い環境を任意の場所にて構築するシステムが必要である。この訓練に VR アプリを活用すれば、仮想空間上にて現実空間に似るように作成した手術場や建設現場にて作業ができるため、実作業場を占有することなくユーザは従来の訓練よりも有益な体験を得られる。また、VR 空間をネットワークを介して他のユーザに共有することにより、ユーザは他の人とどこにいても共同作業が行える VR アプリもある。その一例となる VR 会議は、実際に企業にて用いられている会議アプリの一つである。VR 会議は、ユーザが人型のアバターとして表示され、アバターの位置からマイクの音声になるようになっていたため、現実の会議に近いアプリとなっている。これらのように、VR は研究分野の技術であるだけでなく、実用化され始めてきた技術と言える。

## 1.1 VR 上の文字入力

本研究は、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）と片手にて把持が可能な VR 用のコントローラ（VR コントローラ）を組み合わせた VR システムを対象とする（図 1.2）。VR 上にて汎用的に用いられている入力手法として、空中に浮かぶ平面の仮想キーボード（仮想平面キーボード）と VR コントローラを用いた手法がある（図 1.3）。ユーザは、VR コントローラから放たれるレイ<sup>1</sup>を仮想キーボードの入力したいキーに当て VR コントローラのボタンを押すこ

<sup>1</sup>VR 上にて表示される仮想的な一直線の光線。

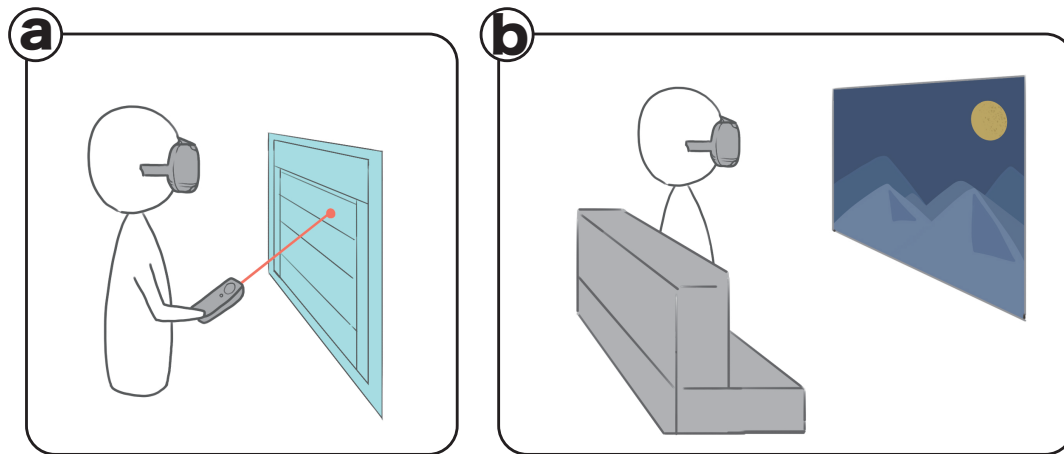


図 1.1: VR アプリの一例. a: 仮想ディスプレイを用いた Web 検索アプリケーション. b: 映画館にいる感覚で動画を閲覧できるシネマアプリケーション.

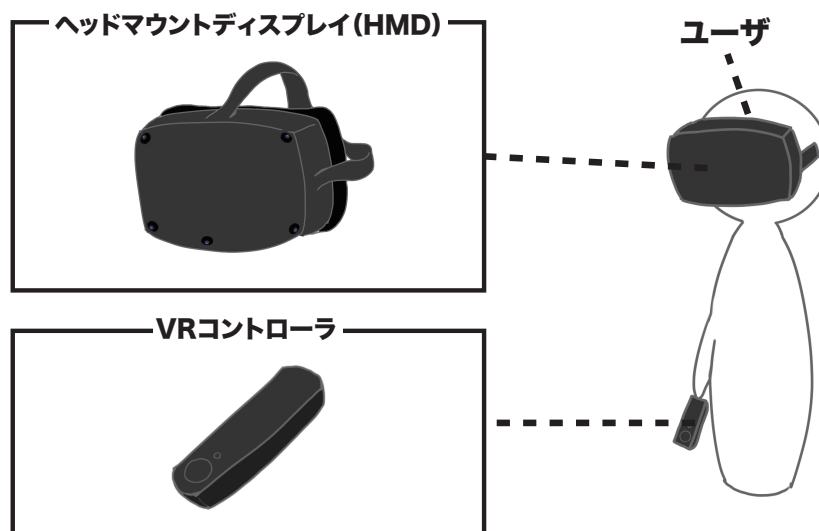


図 1.2: 対象とした VR システム.

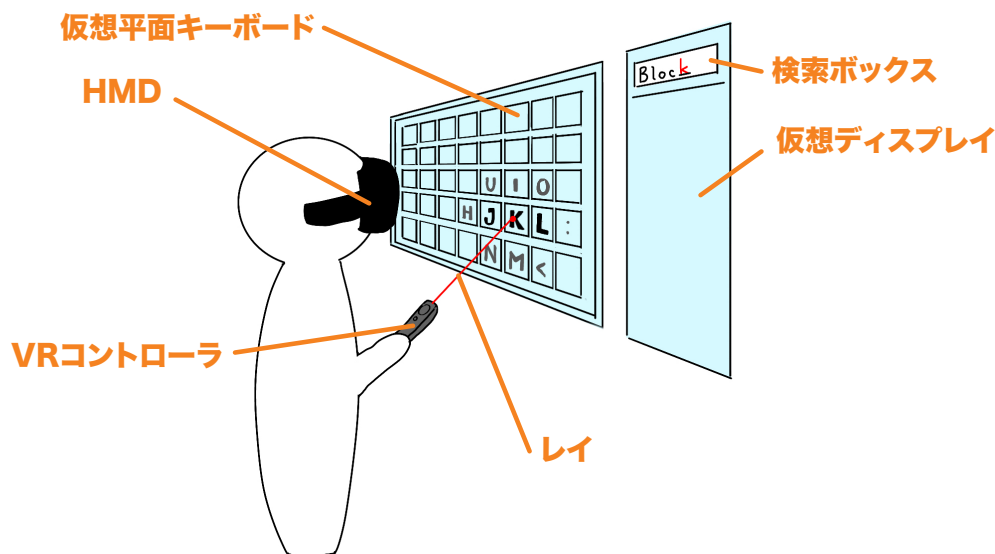


図 1.3: 汎用的な VR 上の文字入力方法. 'K' を入力する例を示している.

とにより、キーの文字を入力できる（以降、VR コントローラから放たれるレイをターゲットに当てる操作をレイキャストと呼ぶ）。なお、キーボードは QWERTY レイアウトであり、修飾キーはスマートフォンのソフトキーボードと同じ配置であることが多い。

### 1.1.1 VR 上にて文字入力を要する場面

VR アプリ上にて、文字入力をする場面は多い。例えば、システムのログイン時やインターネットの接続時に、ユーザは ID およびパスワードの入力を要求される。前述した VR アプリでは、ユーザは Web 検索アプリケーション（またはシネマアプリケーション）上の検索ボックスにレイキャストし VR コントローラのボタンを押すことにより、仮想平面キーボードを表示させることができる。ユーザは、仮想平面キーボードを用いて文字入力を行うことにより任意の文字列を検索できる。また、VR 会議では、ユーザは音声にて会話が可能であるが、メッセージを送信する際に仮想平面キーボードを用いて文字入力を行う。このように、VR 上にて文字入力は必要不可欠であることがわかる。

### 1.1.2 VR 上の文字入力の課題

しかし、VR アプリ上の汎用的な文字入力には入力効率が悪い点がいくつかある。まず、キーの選択にレイキャストを用いるため、1 文字入力するのに要する時間が長い点である。レイキャストは、レイに垂直な面が広いターゲットほど選択時間が短くなることがわかっている [GB04]。このことから、面積の狭いキーに対してレイキャストで選択するという操作は向いていないことが考えられる。また、レイキャストによる選択時間を短くするためにキーの

面積を広げると、1つコンテンツがHMDに表示される面積の比率（視野占有率）が広がってしまい、Web検索アプリケーションを表示させた仮想ディスプレイなどのコンテンツの上にキーボードが重なるため、コンテンツを見ながらの文字入力が困難になる。

## 1.2 本研究の目的およびアプローチ

本研究の目的は、VR上の文字入力の入力効率を向上させることである。この目的を果たすためのアプローチとして、本研究では、3次元に拡張されたジェスチャ入力および立体キーボードを挙げる。本節にて、それぞれの詳細を述べる。

### 1.2.1 3次元に拡張されたジェスチャ入力

タッチディスプレイにおける文字入力を高速化する手法の一つとしてジェスチャ入力がある [ZKG<sup>+</sup>09, KZ04, GOZ16]。ジェスチャ入力とは、ユーザが単語の綴り順に指をキーに当てて行く2次元のジェスチャにより文字入力を行う入力手法のことである。この入力手法は、単語単位で文字入力ができるため、文字単位の文字入力よりも入力効率が良い。スマートフォン上のQWERTYキーボードはキーが小さいため入力しにくく誤入力しやすいという特徴がある。これを解決するために、単語の綴り順にキーボード上のキーを指でなぞり単語単位に文字入力可能なジェスチャ入力（例、Android上のグライド入力<sup>2</sup>、iOS上のQuickPath<sup>3</sup>）が研究されてきた [KZ04, ZK03]。

このジェスチャ入力をVR上にて活用できると考えた。現実の物体と異なり、VR上では仮想物体同士を貫通させることが可能である。この特徴を活用して、本論文では立体キーボードと併せて、単語の綴り順にVRコントローラをキーに通過させる操作により単語を入力する3次元に拡張したジェスチャ入力（3次元ジェスチャ入力）を考案した。

### 1.2.2 立体キーボード

1.1.2節にて述べた課題を解決するため、キーボードの形状にも着目した。物理キーボードは、キー1つ1つがボタンで構成された2次元にキーを配置したキーボードである。また、スマートフォンは2次元の画面であるため2次元のソフトキーボードを用いている。VRアプリ上の汎用的な文字入力に用いられる仮想平面キーボードも同様に2次元のQWERTYキーボードである。しかし、3次元空間で形成される仮想空間上に、キーを選択しやすい3次元の位置にキーを配置すれば、入力効率を改善できると考えた。

本論文にて、立体のキーを3次元上に配置した仮想のキーボード（立体キーボード）を考案した。立体キーボードの形状の一つとして、はじめに、視野占有率が高い課題を解決し入力

<sup>2</sup>Gboard グライド入力：<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.google.android.inputmethod.latin&hl=ja>（最終閲覧日：2020年1月6日）

<sup>3</sup>QuickPath：<https://www.apple.com/jp/newsroom/2019/06/apple-previews-ios-13/>（最終閲覧日：2020年1月6日）

効率を向上させることを目的とした、キューブキーボードを考案した。キューブキーボードは、中央を除く幅、高さ、奥に $3 \times 3 \times 3$ に配置された合計26個のキーにより構成された立方体状のキーボードである。キーを幅および高さ方向だけでなく奥方向に配置することにより、仮想平面キーボードよりも視野占有率を抑えることができると考えられた。しかし、キューブキーボードの性能評価実験を通して、キューブキーボードの課題はキーが把握しにくいことおよび疲労度が高いことであるとわかった。

次に、キーを把握しやすくかつユーザの疲労度を低減させることを目的とした、カーブキーボードを考案した。カーブキーボードは、VRコントローラを中心とした球面にキーが配置されたQWERTYキーボードである。仮想平面キーボードと比較すると、カーブキーボードは視野占有率を抑えられている。球面に配置する利点として、ジェスチャ入力の入力効率を向上させることおよび疲労度を抑えることが考えられる。カーブキーボードの性能評価実験を通して、平面キーボードおよびカーブキーボード間（キーボード間）のMSDエラー率 [MS02] およびSUS [Bro96] に有意な差があることがわかった。キーボード間にて入力速度は有意な差がなかった。カーブキーボードのキーボードの形状を構成するパラメータ（キーを配置する曲率、キーのサイズ、キー間の距離、ユーザ間の距離、および角度）は経験則に基づき設計されていたため、今後は、入力効率が向上させるためにパラメータを調節する必要がある。

### 1.3 貢献

本論文の貢献は以下の4点である。

- 3次元ジェスチャ入力の開発
- キューブキーボードの開発および入力性能の調査
- カーブキーボードの開発および入力性能の調査

### 1.4 本論文の構成

第1章においては本論文の背景、研究対象および目的を述べる。第2章にて、本研究に関連する研究および本研究の位置づけを述べる。第3章において、立体キーボードの内の1つである、キューブキーボードに関して詳述する。続く第4章において、キューブキーボードの性能評価実験に関して詳述する。その後、第5章において、キューブキーボードとは異なる立体キーボードの内の1つである、カーブキーボードについて述べる。続く第6章において、カーブキーボードの性能評価実験に関して詳述する。第7章にて、本研究に関連する議論を示し、第8章にて本研究のまとめを述べる。

## 第2章 関連研究

本章では、2.1 節にて、これまでに研究されてきた VR 上の文字入力手法に関する研究、ジェスチャ入力に関する研究について述べる。立体キーボードは3次元上のキーを選択する操作を行うため、3次元ポインティングの性能に大きく影響される。そのため、続く2.2 節にて関連する3次元ポインティングの研究について述べていく。

### 2.1 文字入力手法

#### 2.1.1 VR 環境における文字入力手法

VR 空間にて VR コントローラを使用した文字入力手法が提案されてきた。一般的に用いられている仮想平面キーボード向けの文字入力手法 [SFZK18, CP17] が提案されている。特に、Speicher ら [SFZK18] は、仮想平面キーボードに対して6つの文字入力手法の入力性能を比較調査した。6つの手法はそれぞれ、HMD の前方方向へのレイキャストによりキーを選択する手法 (HP)、VR コントローラからのレイキャストによりキーを選択する手法 (CP)、VR コントローラの下端をタッチペンに見立てその先端により仮想のキーを直接タップする手法 (TP)、LeapMotion<sup>1</sup>によりトラッキングされた仮想ハンドにより仮想のキーを直接タッチする手法 (FH)、VR コントローラのボタンを用いて仮想平面キーボード上のカーソルを移動させキーを選択する手法 (DC および CC) である。調査の結果、CP の入力性能が最適であると述べられ、入力速度は平均 15.44 WPM<sup>2</sup> であると報告されている。Son ら [SAKL19] は、タッチパネル付きのコントローラを用いた手法を示している。この手法の入力速度は 19.19 WPM と報告されている。Boletsis ら [BK19] は、VR コントローラをドラムスティックに見立て、ドラム型のキーを叩くようにキーを入力することにより文字入力する手法を提案した。この手法の入力速度は 24.61 WPM と報告されている。

VR コントローラを使用した手法の他にも、Leap Motion を用いてトラッキングされた仮想ハンドを用いた手法も多く提案されてきた。細野ら [細野 14] は、子音と母音が示された円形のキーボードを両手にて操作してひらがなを入力する文字入力手法を提案した。大西ら [大西 16] は、簡略化された文字を指で空中に描くことにより文字入力する手法を提案した。喜多ら [喜多 19] や福仲ら [福仲 19] はスマートフォンのフリック入力を VR 空間に適用させた、空中に浮かぶ平面のフリック入力キーボードを仮想ハンドにより直接キーに触れてフリック

---

<sup>1</sup>[urlhttps://www.ultraleap.com/tracking/](https://www.ultraleap.com/tracking/)

<sup>2</sup>Words per minutes (WPM) : 1 分間に入力できる単語数を示す単語入力速度の指標。

クする手法を提案した。また、川口ら [川口 19] は、指がキーに触れる際に掌にも触れるようするため、仮想ハンド上にフリックキーボードを配置し、入力中に触覚フィードバックが得られる文字入力手法を提案した。

また、これら以外の入力デバイスを用いた手法も提案されてきている。Rajanna ら [RH18] は、視線を認識できる HMD である FOVE<sup>3</sup>を用いた視線に基づく文字入力手法を開発した。ユーザは前方に表示されるキーボードの中のキーを見続けた（以降、凝視した）状態においてコントローラのボタンを押すことにより凝視されたキーを入力できる。この手法の入力速度は 10.15 WPM と報告されている。Kim と Kim [KK16] は、HMD をかぶりながらスマートフォンを利用した文字入力手法を提案した。Pham と Stuerzlinger [PS19] は、物理キーボードを肩にぶらさげた状態にて文字入力を行う手法を提案した。この手法は、物理キーボードと仮想キーボードの位置が一致しているためユーザは実際に仮想のキーを押しているような触覚フィードバックが得られるようになっている。この手法の入力性能は、44.1 WPM であった。

これらはキーを一つずつ選択する文字単位の入力であり物理キーボードに近い触覚フィードバックがないため入力速度が低い。我々の手法は、これらの文字単位の入力とは異なり、3次元に拡張したジェスチャ入力を用いた単語単位の入力である。また、キーボードの位置をユーザはコントローラを使って自由に決められるため、入力したい位置に移動させることができる。

### 2.1.2 ジェスチャ入力を用いた文字入力に関する研究

タッチディスプレイにおける文字入力を高速化する手法の一つとしてジェスチャ入力が研究開発されている [ZKG<sup>+</sup>09, KZ04, GOZ16]。Zhai らが提案した SHARK<sup>2</sup> [KZ04, ZK03] は、ATOMIK キーボードにジェスチャキーボードを適用した研究である。SHARK<sup>2</sup> は、ジェスチャの入力位置や形状および言語要素を基に文字予測することにより、高速かつ高精度な文字入力手法を実現している。Rick [Ric10] は、様々なキー配列のキーボードの入力性能を比較することによって、ジェスチャキーボードにおいて最適なキー配列を調査している。また、Gordon らが提案した WatchWriter [GOZ16] は、スマートウォッチにジェスチャキーボードを適用したシステムである。Gupta らが提案した RotoSwype [GJY<sup>+</sup>19] は、3軸加速度センサおよびボタンが1つ内蔵された指輪型デバイスを用いて VR 空間にてジェスチャ入力を行う手法である。この手法は、指輪型デバイスをつけた手を上に上げると、HMD に投影されたキーボード上のカーソルが上方方向に移動する。指輪型デバイスのボタンを押すとカーソルの位置にて入力開始される。入力中に入力したい単語の綴り順にカーソルをキーに通過させる。カーソルを動かし終わったら、もう一度ボタンを押すことにより入力が終了し軌跡を基に単語を予測する。この手法は、手を下ろした状態でも入力可能なため、疲労度が低い。よって、長時間入力するのに適した手法となっている。Markussen ら [MJH14] は、指をつまむジェスチャを用いて VR 上にてジェスチャ入力を行う手法である Vulture を提案した。ユーザが空中に浮かぶ仮想平面キーボードに向けて手を出すとその先がポインタとなり、つまむジェスチャがジェスチャ

---

<sup>3</sup><https://www.getfove.com/>

入力の開始動作となる。つまむジェスチャを終えるとジェスチャ入力が終了し、ジェスチャ入力中に移動したポインタの移動軌跡を基に単語を予測する。Vulture を従来のタッチによりジェスチャ入力を比較した結果、タッチの方が入力速度が高いことがわかったが、Vulture は 28.1 WPM と高速にて入力できることを示した。Chen ら [CWG<sup>+</sup>19] は、VR 上にてレイキャストを用いたジェスチャ入力手法を提案した。この手法の入力性能は、16.4 WPM、エラー率 15.6% であることが報告された。

以上の手法は 2 次元のジェスチャを用いた入力手法である。一方、提案手法は、キーを縦と横の他に奥にも配置した上で 3 次元のジェスチャを用いることにより入力効率の向上を図る。

## 2.2 3次元ポインティングに関する調査

過去の研究にて、3次元ポインティングの性能を調査した研究が行われてきた。本節では、様々な環境下における3次元ポインティング性能の影響を調査した研究およびその他の手法を用いた3次元ポインティングに関する研究について述べる。

### 2.2.1 様々な環境下における3次元ポインティング性能の影響を調査した研究

Boritz と Booth [BB97] は、4つの視覚環境（1つの画面を用いた場合、両眼視差だけ離れた2つの画面を用いた場合、ヘッドトラッキングを追加して1つの画面を用いた場合、およびヘッドトラッキングを追加して両眼視差だけ離れた2つの画面を用いた場合）下において3次元ポインティングにどのような影響を及ぼすか調査した。調査の結果によると、2つの画面を用いた場合の方が1つの画面を用いた場合に比べて3次元ポインティング性能が向上することが報告されている。Teather と Stuerzlinger [TS13] は、レイキャストとマウス操作の2手法を用いて単眼ディスプレイおよび両眼ディスプレイを使用した際のポインティング性能を比較した。その結果、単眼ディスプレイの方が性能が高いことを報告した。Qian ら [QT17] は、FOVE を用いて視線の先にあるターゲットを選択する手法（視線手法）、頭部方向にあるターゲットを選択する手法（頭部手法）、およびその両方を使用した（視線頭部手法）の3手法の3次元ポインティング性能を比較調査した。その結果、エラー率および選択時間において頭部手法がもっとも性能が高く、視線手法がもっとも性能が低いことがわかった。Sun ら [SSR18] は、マウス操作、ボタン操作、および仮想ハンドの指の操作を用いた際の3次元ポインティング性能に違いがあるか調査した。調査の結果、マウス操作がもっとも性能が高いことが報告されている。Grossman と Balakrishnan [GB04] は、選択対象の物体（以降、ターゲット）の大きさとユーザから見たターゲットの位置が3次元ポインティングに影響を及ぼすか調査した。調査の結果、ポインタからターゲットへの方向の幅が広いほど3次元ポインティング性能が向上する結果を示した。Stuerzlinger ら [ST14] は、ターゲットの形状が3次元ポインティングに影響を及ぼすか調査した。Pfeiffer と Stuerzlinger [PS15] は、ISO 9241-9 標準の実験下において、電気筋肉刺激（EMS）が3次元ポインティングに影響を及ぼすか調査した。Barrera ら [BMS18, BMS19] や Janzen ら [JRB16] は、手の届く範囲に位置する物理ター



ゲットおよび仮想ターゲットに対する3次元ポインティング性能を調査した。特に, Barrera と Stuerzlinger [BMS19] が実施した調査の結果, 仮想ターゲットはユーザ手前方向に配置された場合, ターゲットの選択に時間がかかる結果となったが, 物理ターゲットはそれとは対照的な結果になったことを報告していた。また, 2次元のポインティング性能を測る指標の一つであるフィッツの法則 [Fit54] を3次元に拡張したCTDモデルのフィッツの法則を提案した。Batmaz ら [BS19] は, Rotational jitter と呼ばれるHMDの画面に遅延が生じた時の現実との差が3次元ポインティング性能に影響を及ぼしたと報告した。Tu ら [THY+19] は, コントローラによるレイキャストを用いて3次元空間上にて形状の異なるターゲットを交差するタスク(クロッシング)の性能を調査し, 3次元空間上においてもクロッシングはフィッツの法則に基づくと報告した。

本研究のカーブキーボードはVRコントローラを中心とした球面にキーが配置されたQWERTYキーボードである。よって, カーブキーボードは, ユーザからみて凹状にキーが配置されているため, [BMS19]にて報告された, 仮想ターゲットがユーザ手前方向に配置された場合ターゲットの選択に時間がかかることを考慮した配置であると言える。また, [GB04]にて報告された, ポインタからターゲットへの方向の幅が広いほど3次元ポインティング性能が向上することも, カーブキーボードでは満たしている。これらの理由からも, カーブキーボードは入力性能が向上すると考えられる。

### 2.2.2 その他の手法を用いた3次元ポインティングに関する研究

Poupyrev らが提案したGo-Go interaction [PBWI96] は, 直線的に伸びる仮想ハンドを用いて近くのオブジェクトだけでなく遠くのオブジェクトも選択が可能な手法である。他にも, レイキャストはレイの一直線上にターゲットが複数重なると選択できない課題がある。Bloup ら [BPC19] はこれを解決したRayCursorを提案した。RayCursorは, レイ上に沿って動くポインタをコントローラにて操ることができ, そのポインタに当たったオブジェクトを選択する手法である。この手法を用いることにより, ユーザはポインタの位置をオブジェクトの位置に動かすことで重なったオブジェクトの選択が可能になる。

また, ターゲットを平面以外に配置した際の3次元ポインティング性能も多く調査されてきた。Roudaut ら [RPB11] は, 曲面タッチディスプレイ上のポインティング性能について調査した。一点を凹凸状に曲げられたアクリル板をタッチディスプレイとして, ユーザはその周辺のターゲットを選択する性能実験を行った。実験の結果, 大きく凸状に曲げられたタッチディスプレイのときももっとも正確にポインティングできることを示した。Voelker ら [VSWB12] は, 垂直ディスプレイと水平ディスプレイを一つに繋げたタッチディスプレイ上のポインティング性能を調査した。2つのディスプレイ間が隙間のない(エッジ)条件, 隙間のある(ギャップ)条件, および曲面ディスプレイで繋げられた(カーブ)条件の3条件においてポインティング実験を行った。その結果, エッジ条件にて垂直ディスプレイのポインティング性能がもっとも高く, カーブ条件にて水平ディスプレイのポインティング性能がもっとも高いことがわかった。Bergstrom ら [BLHB18] は, ユーザの前腕を指でタッチするポインティング性能について調査した。ユーザが前腕をタッチすると, タッチ点に対応するディスプレイ上のポインタ

が表示される。ユーザはディスプレイ上のターゲットの位置に対応した前腕をタッチするタスクを行った。

以上のように、平面以外の3次元ポインティング性能も注目されてきていることがわかる。カーブキーボードについても、球面にターゲット（つまり仮想のキー）を配置しているため、入力性能にどのように影響するか調査すべき研究であることがわかる。

## 第3章 キューブキーボード

### 3.1 背景

仮想平面キーボードは、横幅が広い平面状であり、またその表示位置は固定されている。これに伴い、視野占有率が大きくなるため、他のコンテンツを見ながら文字入力を行うことを妨げる。また、キー一つ一つをレイキャストするため入力効率が悪い。

これらの問題を解決するため、キューブキーボード（図 3.1）および VR コントローラの 3 次元的な移動を用いた 3 次元ジェスチャ入力を提案した。キューブキーボードは、中央を除く幅、高さ、奥に  $3 \times 3 \times 3$  に配置された合計 26 個のキーにより構成された立方体状のキーボードである。キューブキーボードは、コントローラの位置に同期して動き、コントローラのトリガが押下されている間その場で静止する。キューブキーボードが静止している間、カーソルはコントローラの位置に同期して動く。ユーザは 3 次元ジェスチャ入力により、単語単位での文字入力ができる。このように、キューブキーボードでは縦と横の他に奥にもキーが配置されるため、キーボードの視野占有率を抑えられ、また、ユーザは自由な位置で文字入力ができる。

なお、3 次元ジェスチャ入力によりカーソルが単語の綴りに含まれないキーに接触するため、我々は 2 つの単語入力手法を試みている。一つは、カーソルの移動速度を基にキーを選択する手法、もう一つはカーソルの移動軌跡に基づいて単語予測を行う手法である。

本章においては 2 つの単語入力手法、について述べる。

### 3.2 キーボードの設計

本手法において使用するキューブキーボードを図 3.1 に示す。キューブキーボードは、中央を除く幅、高さ、奥に  $3 \times 3 \times 3$  に配置された合計 26 個のキーにより構成された立方体状のキーボードである。キューブキーボードの各キーは表 1 に従って配置されている。なお、キューブキーボードは、コントローラの位置に同期して動く。ただし、コントローラのトリガが押下されている間、同期が解除されその場で静止する。一方、この間、キューブキーボードの中心に配置されたカーソルがコントローラの位置に同期して動く。

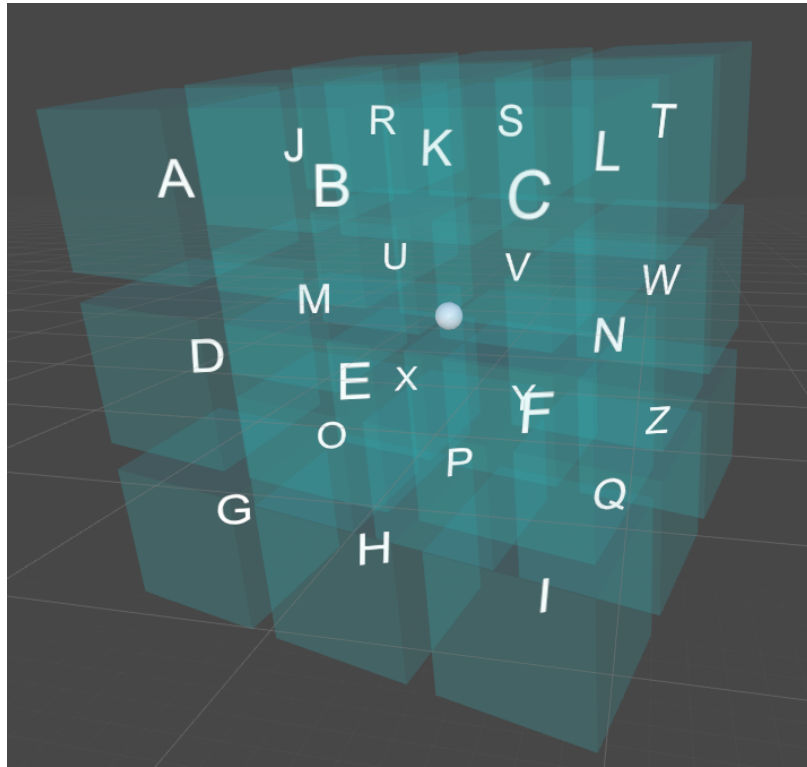


図 3.1: キューブキーボードの外観.

### 3.3 文字入力手法

文字入力の手順を示すフローチャートを図 3.2 に示す。ユーザは、片手把持可能なコントローラを用いて文字入力を行う。まず、ユーザはコントローラを使用して文字入力したい位置にキューブキーボードを移動させる。コントローラのトリガを押下するとキューブキーボードはコントローラとの同期が解除され、カーソルのみがコントローラに同期して動くようになる。この間に、ユーザは 3 次元ジェスチャ入力により、単語の入力を行う。最後に、ユーザはトリガを離して 1 単語の文字入力を終える。この後、ユーザは再びトリガを押下することにより、次の文字入力へと遷移させることができる。このとき、以前に入力した単語と次

表 3.1: キューブキーボードのキーの配置.

$x$	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1
$y = 1$	A	B	C	J	K	L	R	S	T
$y = 0$	D	E	F	M		N	U	V	W
$y = -1$	G	H	I	O	P	Q	X	Y	Z
$z$		-1			0			1	

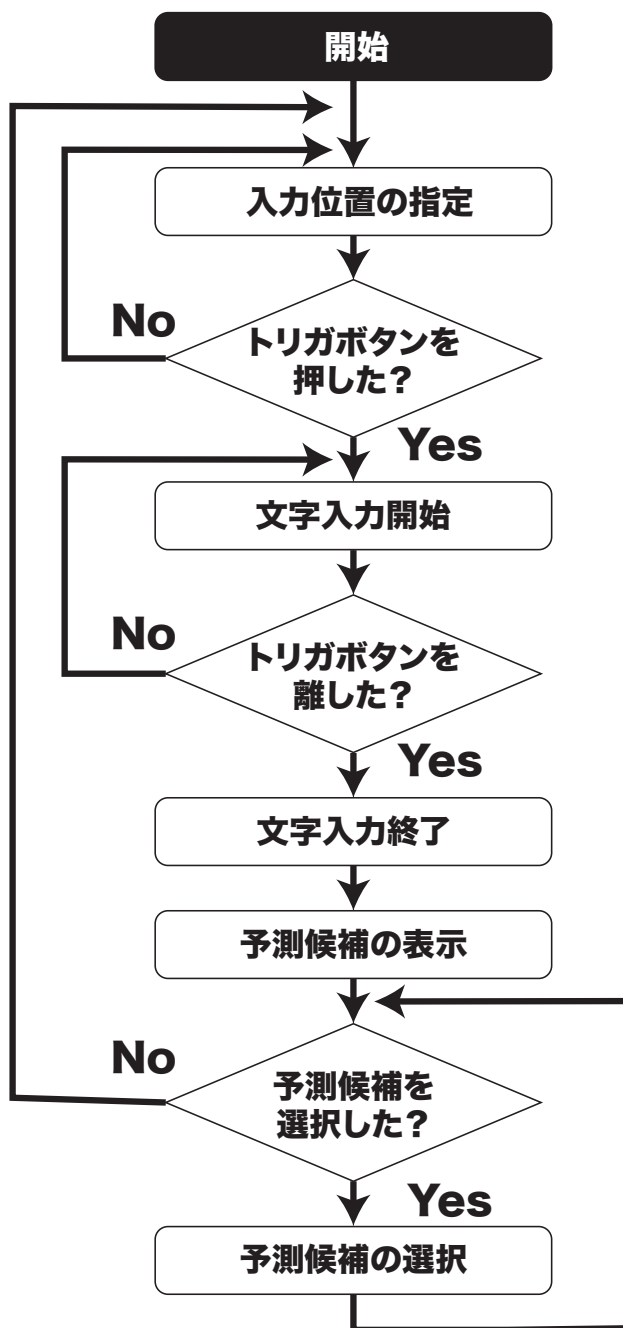


図 3.2: 文字入力のフローチャート.

に入力する単語の間の空白文字は自動的に入力される。

なお、3次元ジェスチャ入力が行われる際、カーソルが入力したい単語の綴りに含まれないキーに触れることがある。したがって3次元ジェスチャ入力を用いて単語単位の文字入力を行うためには、入力したい単語の綴りに含まれないキーに触れても正しい単語を入力できるような機能が必要である。我々は、カーソルの移動速度に基づいてキーを選択する手法およびカーソルの移動軌跡に基づいて単語を予測する手法を試みた。

#### カーソルの移動速度に基づくキーの選択手法

カーソルの移動速度に基づくキーを選択する手法（speed-based手法。以降、SB手法）は、カーソルの移動速度が大きいときに接触したキーを無視し、小さい時に接触したキーを単語の綴りに含まれるキーとする。カーソルの移動速度の大小は、式(3.1)を用いて判別される。式中の、 $P_n$ はカーソルがキーに接触した際のコントローラの位置、 $P_{n-1}$ はカーソルがキーに接触する1フレーム前のコントローラの位置、 $D_{th}$ は移動距離の閾値である（ $D_{th}$ は5mmと設定した）。式(3.1)において $f(P_{n-1}, P_n) = 1$ の時、触れたキーは単語の綴りとして選択されたキーであると判定され、 $f(P_{n-1}, P_n) = 0$ の時、単語の綴りとして選択されなかったキーであると判定される。

$$f(P_{n-1}, P_n) = \begin{cases} 1 & (|P_{n-1} - P_n| < D_{th}) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \quad (3.1)$$

$|a - b|$ : a-b間のユークリッド距離

#### カーソルの移動軌跡に基づく単語予測手法

カーソルの移動軌跡の曲がる位置を検出し単語予測する手法（gesture-based手法。以降、GB手法）は、次の手順により単語予測を行う。

1. カーソルが通過したキー列を取得
2. カーソルの移動軌跡が曲がる位置にてキー列を分割
3. 分割した各文字列の中から少なくとも一つ以上の文字を含む正規表現を作成
4. 正規表現にマッチした単語を予測単語リストに登録

カーソルの移動軌跡が曲がる位置を基に触れたキー列  $S_{input}$  を分割した例を表3.3に示す。例として、3次元ジェスチャ入力を用いて「available」を入力した際、 $S_{input}$ は「akvkabefiflbabble」となり、この例は $S_{input}$ 中の文字の順にカーソルがキーに触れたことを示している。ここで、 $S_{input}$ をカーソルの移動軌跡が曲がる位置にて分割すると「akv, ka, befi, fl, ba, bbl, e」と分割できる。このとき、表3.3の $S_{input}$ を分割した結果から、下線部に示すように分割した各文字列の中に「available」の綴りが1つ以上含まれていることが確認できる。この特徴を利用して、分割した各文字列の中から少なくとも1文字以上の文字を含むような正規表現を作成する。

表 3.2: カーソルの移動軌跡の曲がる位置を基に  $S_{input}$  を分割した例.

単語	触れたキー列 ( $S_{input}$ )	$S_{input}$ の分割結果
available	akvkabefiflbabble	<u>ak</u> v, ka, bef <u>i</u> , fl, ba, <u>bb</u> l, e
japanese	jadmpdabnekske	<u>ja</u> d, mp, da, <u>bn</u> , e, ks, <u>ke</u>
water	watklekr	<u>wa</u> , tk, le, <u>kr</u>

表 3.3: 辞書の単語とマッチした単語および検索時間.

$S_{input}$	マッチした単語	検索時間 (秒)
akvkabefiflbabble	available	0.0060
jadmpdabnekske	japanese	0.0113
watklekr	water	0.0070

分割した各文字列に用いる正規表現 「available」の例において  $S_{input}$  を分割した文字列の一番最初である「akv」から作成した、キー列中の少なくとも1文字以上の文字を含む正規表現を以下に示す.

$$(a|k|v|ak|kv|av|akv)$$

$$(a_1|a_2) : a_1 \text{ か } a_2 \text{ を含む}$$

以上の正規表現を分割した各文字列全てについて同様に作成し、1単語分の正規表現を生成する. その後、英単語辞書の全ての単語に対して1単語分の正規表現がマッチするか検索する. GB手法においては、GoogleのTrillion Word CorpusのNグラム頻出度解析により得られた上位10000単語を収録した辞書[Kau]を用いる. 表3.3の  $S_{input}$  に対して検索をかけた結果を表3.3に示す. 表3.3の結果においてマッチした単語はそれぞれ1単語であった. マッチした単語は表3.3の入力したい単語と一致している. 探索時間についても、1/60秒以下であるため、提案手法はリアルタイムに予測単語リストを更新できる.

**カーソルの移動軌跡が曲がる位置の検出方法** カーソルの移動軌跡が曲がる位置を検出する方法として、X, Y, およびZ軸の各移動ベクトルを分析し、各移動ベクトルの正負が反転した位置をジェスチャの曲がる位置として検出する方法を導入する.  $n$  番目に触れたキーの位置および  $n-1$  番目に触れたキーの位置との差のベクトル  $V_n$  を式(3.2)により定義する.

$$V_n = \begin{cases} (0, 0, 0) & (n = 0) \\ P_n - P_{n-1} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.2)$$

ここで、判定ベクトル  $V_{judge}$  を用いて  $V_{judge}$  および  $V_n$  の各要素の正負が全て同じの場合、位置  $n$  においてカーソルの移動軌跡は曲がっていないと判断し、いずれか1組の正負が異なる場合、移動軌跡は曲がっていると判断する.  $V_{judge}$  の初期値は  $V_0 = (0, 0, 0)$  とし、この判定手法においては、0は正負の両方に含まれると定義する.

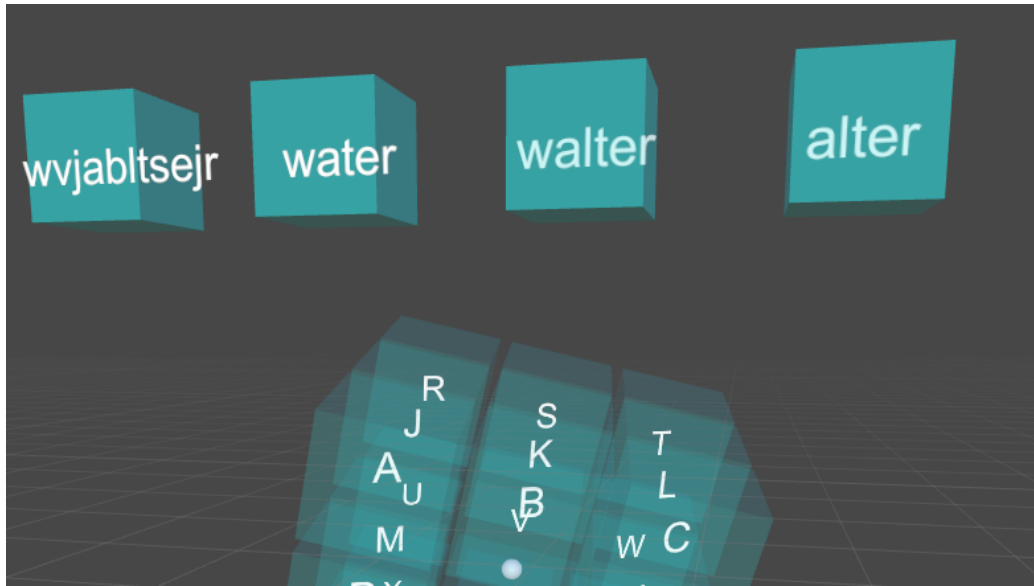


図 3.3: 予測候補キーの表示位置. 一番左のキーのみ SB 手法により得られた文字列を表示.

曲がる位置の検出例として、「available」の  $S_{input}$  に着目する. まず, 最初の文字の「a」の位置は表 3.2 から  $P_a = (-1, 1, -1)$  であり, この位置を初期位置  $P_0$  とする. 次の文字の「k」の位置は  $P_k = (0, 1, 0)$  であり, この位置を  $P_1$  とする. この時, 移動ベクトル  $V_1$  は  $V_1 = P_1 - P_0 = (1, 0, 1)$  となる. ここで,  $V_{judge}$  および  $V_1$  の各要素の正負は同じであるため, a-k 間の移動軌跡は曲がっていないと判断される. また, 判定ベクトル  $V_{judge}$  は  $V_1 + V_{judge} = (1, 0, 1)$  と更新される. 次に,  $P_2 = P_v = (0, 0, 1)$  とすると, 移動ベクトル  $V_2$  は  $V_2 = P_2 - P_1 = (0, -1, 1)$  となる. ここで,  $V_{judge}$  および  $V_2$  の各要素の正負は同じであるため, k-v 間の移動軌跡も曲がっていないと判断される. また, 判定ベクトル  $V_{judge}$  を  $V_2 + V_{judge} = (1, -1, 2)$  と更新する. 次の文字の「k」の位置を  $P_3 = P_k = (0, 1, 0)$  と置くと,  $V_3 = P_3 - P_2 = (0, 1, -1)$  となる. ここで,  $V_{judge}$  および  $V_3$  の各要素の正負を確認すると y 座標および z 座標において正負が異なるため, v-k 間の移動軌跡は曲がっていると判断され, 「akv」と「kabefifbabbble」は分割される. この処理をキー列全てに行うことにより,  $S_{input}$  は「akv, ka, befi, fl, ba, bbl, e」と分割される.

**予測単語の選択方法** 予測単語リストに登録された単語は, 図 3.3 に示すようにキューブキーボードの上部に単語キーとして現れる. 予測単語リストは最大 30 単語に登録できる. 文字入力を行い  $S_{input}$  が変化するたび, 予測単語リストは更新されるので単語キーも変わる. 3次元ジェスチャ入力による文字入力を終えた後, ユーザはカーソルを単語キーに接触させることによりその単語が入力される. 一方, この接触が行われない場合, 予測単語リストの先頭要素(すなわち正規表現にマッチする単語のうち最頻出の単語)が自動的に入力される. よって, 変換された単語が入力したい単語と一致していた場合, 単語キーを選択する操作を省略でき



る。なお、予測単語リストに何も登録されていない場合は、SB手法により得られた文字列を出力する。この機能により、ユーザは辞書に存在しない単語もSB手法により入力できる。

## 第4章 実験1：キューブキーボードの性能評価 実験

3章にて述べたSB手法およびGB手法の入力性能を比較するために、評価実験を実施した。本章にて、2手法の性能比較実験に関する実験結果および議論を述べる。

### 4.1 実験設計

実験1の実験装置、実験参加者、入力対象のフレーズ、実験手順、タスク、および評価対象について述べる。

#### 4.1.1 実験装置

実験は、VR環境向けに作成した提案手法のプロトタイプシステムを用いて行った。プロトタイプシステムでは、文字入力をしていない間にコントローラのグリップボタンを押すと単語単位での文字削除が可能である。

実験の様子を図4.1に示す。実験には、HMD（HTC VIVE<sup>1</sup>、解像度：両眼2160×1200ピクセル、視野角：110度、自由度：6DoF）およびVRコントローラ（VIVEコントローラ、図4.2）を用いた。

#### 4.1.2 実験参加者

研究室内の大学生および大学院生を含む4人（22–24歳、平均年齢22.5歳、全員男性、P1–P4）を実験参加者として実験を行なった。参加者全員が右利きでありVRの経験がなかった。

#### 4.1.3 入力対象のフレーズ

入力対象とする文章はVertanenら[VK11]のフレーズセットから、20–28文字からなる英文（全30文章）を対象とした。実際に使用した例文を表4.1に示す。



図 4.1: 実験の様子.

表 4.1: Vertanen ら [VK11] のフレーズセットの文字列の一例.

課題文	文字数
i would like to attend if so	28
i can return earlier	20
i will bring john brindle	26
it reads like she is in	23
they have capacity now	23

#### 4.1.4 実験手順

まず、参加者の頭部に HMD を装着し、右手に VR コントローラを渡した。参加者に実験システムの操作方法および入力手法を説明し、その後、10 分間の練習時間を設けた。練習後、参加者は HMD を外し、1 分以上の休憩をとるよう指示した。参加者には、コントローラのグリップボタン（図 4.2 右）を押すと単語単位で削除できること、メニューボタン（図 4.2 左）を押すと測定が開始し再度押すと測定が終了することを説明した。またタスクを行う前に、参加者には、前方（VR 環境の z 軸正の方向）に表示された課題文をなるべく記憶してから入力すること、正確にかつ素早く入力すること、3 回程度入力した単語が入力できなかった場合次の単語の入力を始めることを指示した。その後、参加者は各手法によりタスクを行うことを指示した。

タスク終了後には、ユーザビリティの評価のため System Usability Scale (SUS) [Bro96, Bro13]

<sup>1</sup><https://www.vive.com/>（採取閲覧日：2020 年 1 月 6 日）



図 4.2: 実験にて使用した VIVE コントローラ。左: コントローラの正面図。右: コントローラの側面図。

を用いたアンケート、「どちらの手法がより楽にタスクを行えましたか」という問および各手法に対する自由記述欄を含むアンケートを行った。実験時間は平均で 120 分であった。

#### 4.1.5 タスク

参加者の前方に表示される課題文と同じ文章の入力を行うことを 1 タスクとした。タスク開始時には、参加者にコントローラのメニューボタンを押してもらい、終了後にはもう一度メニューボタンを押してもらった。測定終了後、課題文は自動的に次の課題文へと切り替わる。5 文章の入力を 1 セッションとした。1 セッション終了ごとに、参加者には HMD を外してもらい、1 分以上の休憩をとってもらった。3 セッション終了後に、もう片方の手法に対して同様のタスクを行った。2 種類の手法の測定終了後、1 時間以上の時間を空け、今度は測定する手法の順番を逆にして、同様の実験手順の測定を行った。つまり、1 回目に SB 手法-GB 手法の順に測定を行った場合、2 回目は GB 手法-SB 手法の順に測定を行った。よって、合計で 240 回 (= 5 タスク × 3 セッション × 2 手法 × 2 回 × 4 参加者) 測定を行った。

#### 4.1.6 評価対象

評価対象は、単語入力速度 (WPM)、提示された文章と入力された文章から算出されるエラー率 (Minimum string distance エラー率, 以降, MSD エラー率) [MS02, SM01, SM03], SUS の得点 [Bro96] である。SUS の得点は、高ければ高いほどユーザビリティの高い手法であることを示す。MSD エラー率は、提示された文章を  $P$ 、入力された文章を  $T$  として式 (4.1) により算出される。

$$MSD \text{ エラー率} = \frac{MSD(P, T)}{\max(|P|, |T|)} \times 100\% \quad (4.1)$$

ただし、 $|P|$  および  $|T|$  はその文章  $P$  および  $T$  の文字数を意味する。

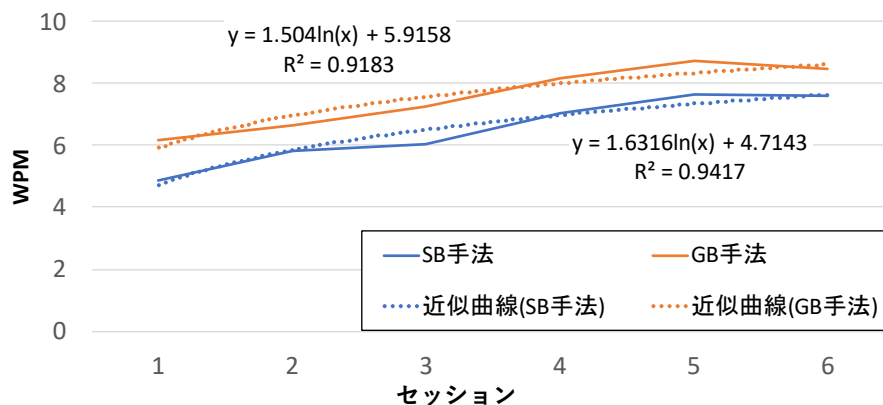


図 4.3: セッションごとの各手法の WPM.

## 4.2 実験結果および解析

セッションごとの各手法の入力速度を図 4.3 に示す。また、合わせて手法ごとの対数近似曲線を示す。両手法とも右上がりのグラフを描き、全てのセッションにおいて GB 手法の入力速度が高くなった。取得した入力速度のデータに正規性がなかったため、ウィルコクソンの符号順位検定を行った。その結果、手法間の入力速度には有意な差が存在する事がわかった ( $p = 6.573 \times 10^{-6} < .05$ )。また、図 4.3 の対数近似曲線が右上がりの曲線を描いていることから、両手法の入力速度はセッション数を重ねるごとに高くなると考えられる。

セッションごとの各手法の MSD エラー率の結果を図 4.4 に示す。全てのセッションにおいて GB 手法の方が MSD エラー率が低かった。取得した MSD エラー率に正規性がなかったため、ウィルコクソンの符号順位検定を行った。その結果、手法間の MSD エラー率において有意な差が存在する事がわかった ( $p = 2.888 \times 10^{-8} < .05$ )。この結果から、GB 手法の方が入力精度は高いことがわかった。

SUS の得点は、SB 手法にて平均 50.0 ( $SD = 5.45$ )、GB 手法にて平均 66.3 ( $SD = 3.70$ ) となった。取得した SUS の得点には、正規性および等分散性があったため Student の t 検定を行った。その結果、手法間の SUS の得点には有意な差が存在することがわかった ( $p = .01 < .05$ )。

また、事後アンケートの「どちらの手法がより楽にタスクを行えましたか」という問に対して、参加者全員が GB 手法と回答した。

## 4.3 議論

今回の実験にて得られた SUS の得点においては、GB 手法 (66.3) は SB 手法 (50.0) に比べて有意に高かった。しかし、これらの得点は、どちらも SUS の平均得点である 68[Bro13] を下回っている。すべての参加者は実験後に、腕を上げたまま操作し続ける必要があったため腕がつかれたと述べていた。また、多くの参加者はキー配置が覚えにくかったと述べてい

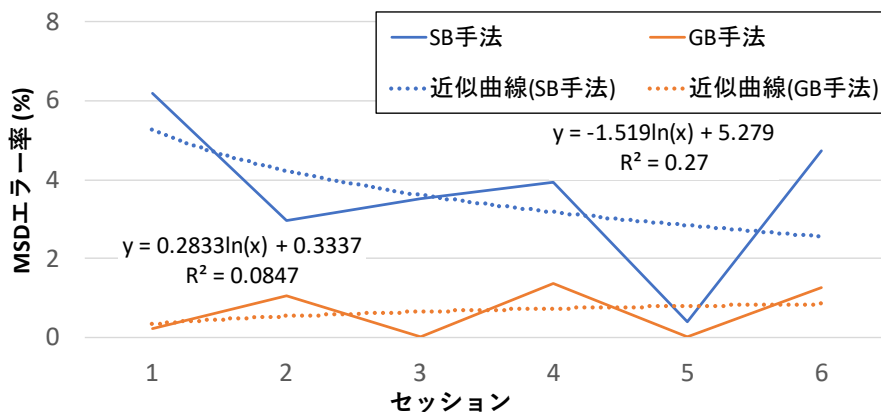


図 4.4: セッションごとの各手法の MSD エラー率.

た. 両手法は, これらの原因により SUS の得点が低くなったと考えられる. さらに, GB 手法は, SB 手法に比べて遅い 3 次元ジェスチャ入力による入力が可能であった. そのためキーの位置を確認しながら文字を入力するときや, 腕が疲労したときの入力が容易である. これが要因となって GB 手法の SUS の得点は SB 手法に比べて有意に高くなったと考えられる. 実際に P2 は GB 手法に対して, キー配置を覚えていないときにゆっくり選択できたため扱いやすかったとアンケートの自由記述欄に記述している.

提案手法は, 同じ単語を入力する際, キューブキーボードの向きにより 3 次元ジェスチャ入力の向きが変化する. P4 は, 同じ単語を入力するとき, コントローラの向きに依存して 3 次元ジェスチャ入力が異なる角度になり入力しにくいとアンケートの自由記述欄に記述している. 特に, キューブキーボード自体が傾いた状態において 3 次元ジェスチャ入力を行うと誤入力が多くなることがわかった.

提案手法は, 文字単位の削除機能を追加することによって入力性能が向上する可能性がある. 今回の実験においては, 参加者は単語単位の削除しかできなかった. そのため, 単語中の 1 文字の修正を行うためにその単語を入力し直す必要があった. 特に, SB 手法においては, 1 文字でも選択を誤ると意図した単語の入力ができない. P1 や P4 は, 文字単位で削除する機能が欲しいとアンケートの自由記述欄に記述している.

また, 課題文の表示位置が測定結果に影響した可能性がある. GB 手法において用いられる予測単語キーはキューブキーボードの上に表示されるため, 予測単語キーの文字と課題文が重なってしまうことがある. これにより, 予測単語キーの文字が見づらくなってしまい GB 手法の入力性能が悪くなったと考えられる.

## 第5章 カーブキーボード

キューブキーボードの入力性能実験の議論にて，以下の課題があげられた．

- キーが把握しにくい
- 疲労度が高い

また，3次元ジェスチャ入力の一つである GB 手法は予測精度が低いという課題があった．そこで，議論にて述べられたキーを立方体上でなく球面上に配置することに着目し，これらの課題を解決する新しい立体キーボード（カーブキーボード）を考案した．本章にて，カーブキーボードについて詳述する．

### 5.1 キーボードの外観

カーブキーボードを図 5.1 に示す．カーブキーボードは，VR コントローラを中心とした球面にキーが配置された QWERTY キーボードである．カーブキーボードは，キューブキーボード同様コントローラの位置に同期して動き，コントローラのトリガが押下されている間のみ同期が解除されその場で静止する．

### 5.2 キーを球面に配置することによる入力性能への影響

キーを球面に配置することにより，以下の項目が改善されると考えられる．

#### 5.2.1 立体キーボードにおける予測精度の向上

予測精度が向上する理由について，平面にキーが配置されたキーボード（以降，平面キーボード）とカーブキーボードを比較しながら説明する．平面キーボード上およびカーブキーボード上にてジェスチャ入力をした時の軌跡の例を図 5.2 に示す．この図は，各キーボード上にて“tip”と“top”の入力を行った例である．平面キーボードの場合，2つの軌跡が同じ形状であるため，“tip”および“top”を別々に予測することができない．平面キーボードはキーが一直線上であるためこのように類似度が高い軌跡の組み合わせが多くなってしまう．それに対しカーブキーボードの場合，2つの軌跡が違う形状となり，予測結果は“tip”と“top”を別々に予測することができる．カーブキーボードは幅および高さ方向以外に奥方向へもキー



図 5.1: カーブキーボードの外観.

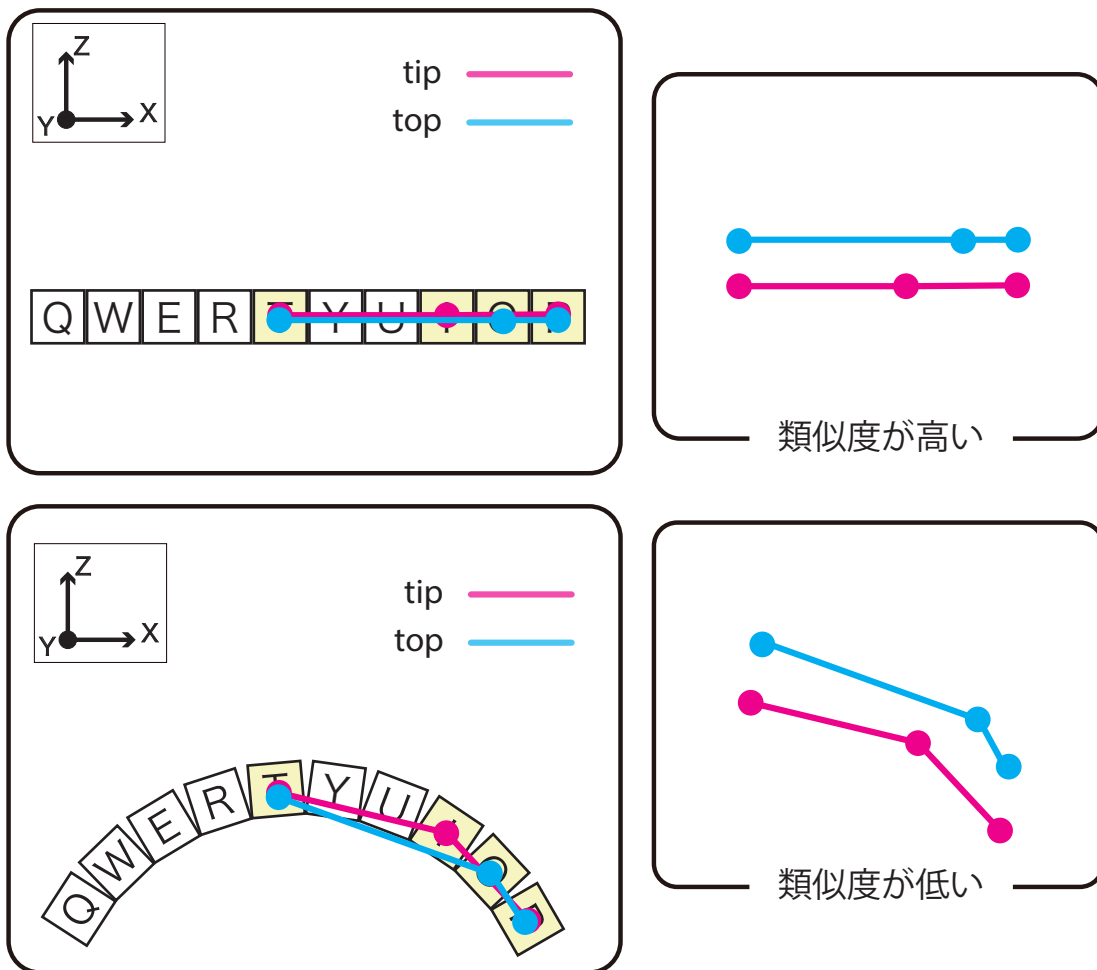


図 5.2: 平面キーボード上およびカーブキーボード上にて“tip”と“top”を入力した軌跡の例.



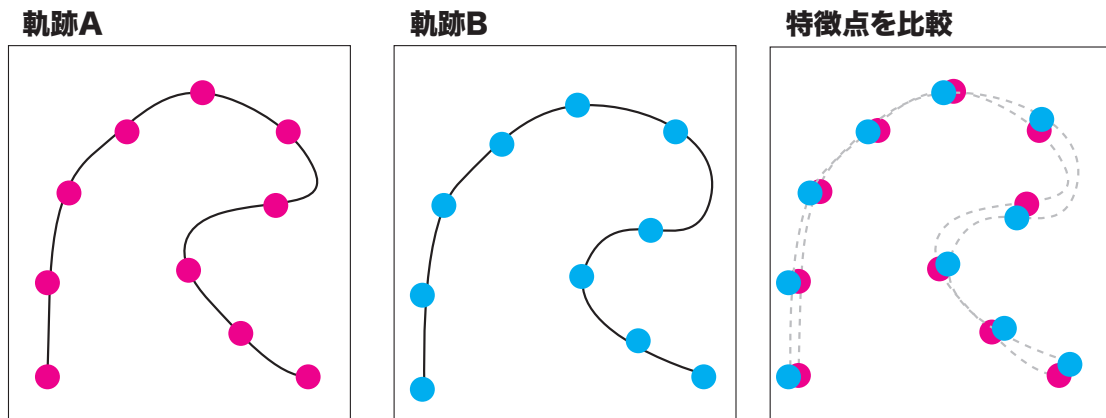


図 5.3: Shape Matching の例。軌跡 A と軌跡 B の特徴点を比較し、その差が小さいほど類似した軌跡と判別される。

を配置させ、かつ球面に配置させているため、2つ任意のキー間に他のキーが重なることがない。そのため、平面キーボードよりもカーブキーボードは単語の類似度が高くなりやすく予測結果の候補数を減らせる。この工夫により、カーブキーボードはジェスチャ入力の効率を向上させる効果があると考えられる。

### 5.2.2 疲労度の低減

2つ目は、疲労度を抑えられることである。人間の腕は、まっすぐ伸ばした状態にて腕を振ると肩を中心に曲線的に動く。カーブキーボードはこの曲線的に動く動作に合ったキーボードである。平面キーボードの場合、端のキー（QキーやPキー）がユーザから遠く、中央のキー（TキーやYキー）が近くに配置されるため、キーに触れるためには腕を前後左右に動かしながら回転させなければならず、腕を手前に出した状態が長時間続くため疲れやすくなる（ゴリラアーム効果 [BJB09, HRGMI14]）。それに対しカーブキーボードの場合、全てのキーが球面かつユーザの腕から等距離に配置されているため、キーに触れるためには腕の回転のみで可能となるため、よって、カーブキーボードは人間工学的に疲労度を低減させる効果があると考えられる。

## 5.3 ジェスチャ入力の改良

キューブキーボードにて採用したGB手法は、学習する単語数が多いほど計算量が膨大になりリアルタイムに単語予測することができない問題があった。この問題を解決するため、SHARK<sup>2</sup> [KZ04] の予測アルゴリズムの一つである Shape Matching を参考にジェスチャ入力を改良した。Shape Matching の例を図 5.3 に示す。Shape Matching は、二つの軌跡の特徴点を

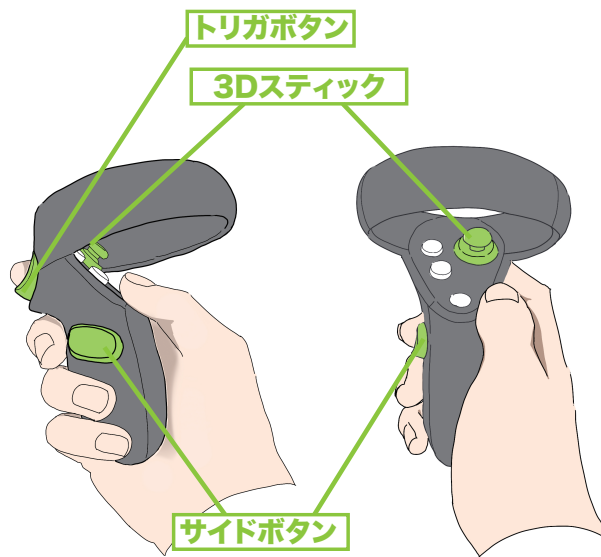


図 5.4: Oculus Touch Controller の入力の割り当て.

比較し、その差が小さいほど類似した軌跡であると判別する予測アルゴリズムである。我々は、この手法を3次元に拡張することによりカーブキーボード上にてジェスチャ入力ができるよう改良した。

## 5.4 文字入力方法

文字入力は、キューブキーボードの入力方法と同様に3次元ジェスチャ入力を用いて行う(フローチャートは図 3.2 と同様)。

## 5.5 予測候補の選択方法

予測候補の選択方法について、図 5.5 および VR コントローラの入力の割り当てを示す図 5.4 を参照しながら説明する。ジェスチャ入力後、予測候補が最大3つ表示され、予測候補が選択可能な状態となる。この状態の間、コントローラの3Dスティックを同色の領域へ傾けることによりユーザは予測候補の単語を選択できる。予測単語は最大3つまで表示され、第一候補のキー(図 5.5 右の青いキー“text”に該当)はジェスチャ入力後に自動入力される。よって、第一候補のキーが意図した単語である場合、予測候補を選択することなく次の単語の入力へ移動できる。

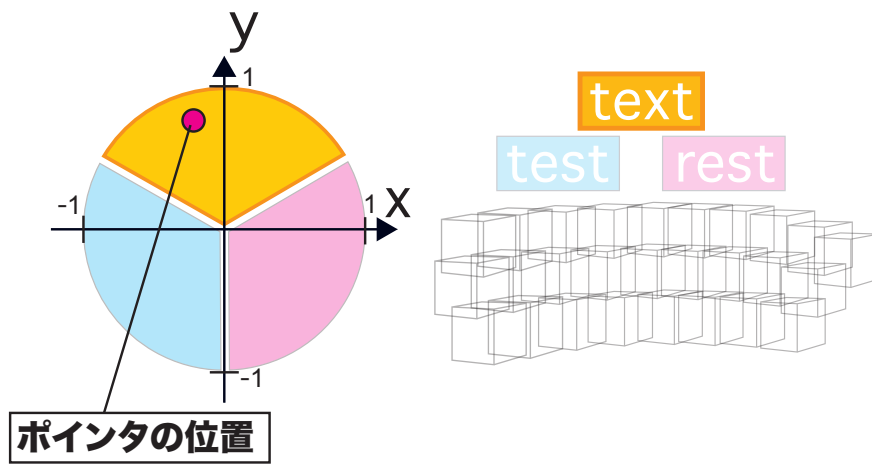


図 5.5: 軌跡を元に予測された候補の表示方法. 最大3つまで表示され, 第一候補のキー (青いキー“text”)はジェスチャ入力後に自動入力される.

## 第6章 実験2：カーブキーボードの性能評価 実験

5章にて述べたカーブキーボードの入力性能を調査するため、平面キーボードとカーブキーボードの性能比較実験を行った。また、入力方法として、従来のレイキャストを用いた入力（レイキャスト入力）および3次元ジェスチャ入力（ジェスチャ入力）の2手法を用いた。よって、以下の4手法の性能比較実験を行った。

- 平面キーボード+レイキャスト入力（PR，図6.1a）
- 平面キーボード+ジェスチャ入力（PG，図6.1b）
- カーブキーボード+レイキャスト入力（CR，図6.1c）
- カーブキーボード+ジェスチャ入力（CG，図6.1d）

以降，PRとPGを総称して平面キーボード系，CRとCGを総称してカーブキーボード系，PRとCRを総称してレイキャスト入力系，およびPGとCGを総称してジェスチャ入力系と呼称する。本章にて，4手法の性能比較実験に関する実験結果および議論を述べる。

### 6.1 実験設計

実験2の実験装置，実験参加者，入力対象のフレーズ，キーボードの形状，実験手順，タスク，および評価対象について述べる。

#### 6.1.1 実験装置

実験の様子を図6.2に示す。実験には，VRデバイスとして（Oculus Quest，解像度：両眼2880×1600ピクセル，視野角：100度，自由度：6DoF）を，VRコントローラとしてOculus Touch Controllerを1つ用いた。レイキャスト入力の場合，ユーザはトリガボタンを押すとその時レイが当たっているキーの文字をテキストボックス内に入力でき，サイドボタンを押すとテキストボックス内の末尾1文字が削除できた。ジェスチャ入力の場合，ユーザはトリガボタンを押している間，ジェスチャ入力できる。この時，軌跡から予測された1単語が入力されるが，3Dスティックを動かすことにより予測候補を選択することも可能である。また，ユーザはサイドボタンを押すとテキストボックス内の末尾1単語を削除できた。

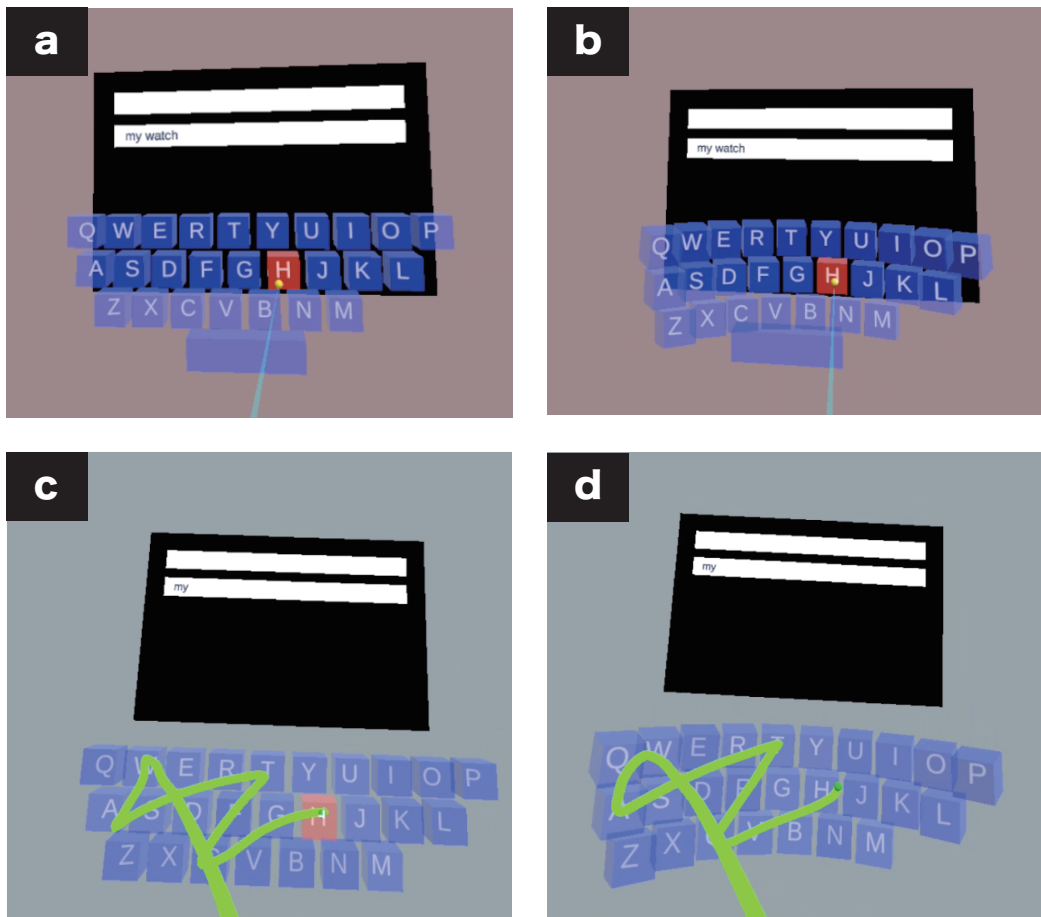


図 6.1: カーブキーボードの性能評価実験. a: 平面キーボード+レイキャスト入力 (PR). b: カーブキーボード+レイキャスト入力 (CR). c: 平面キーボード+ジェスチャ入力 (PG). d: カーブキーボード+ジェスチャ入力 (CG).

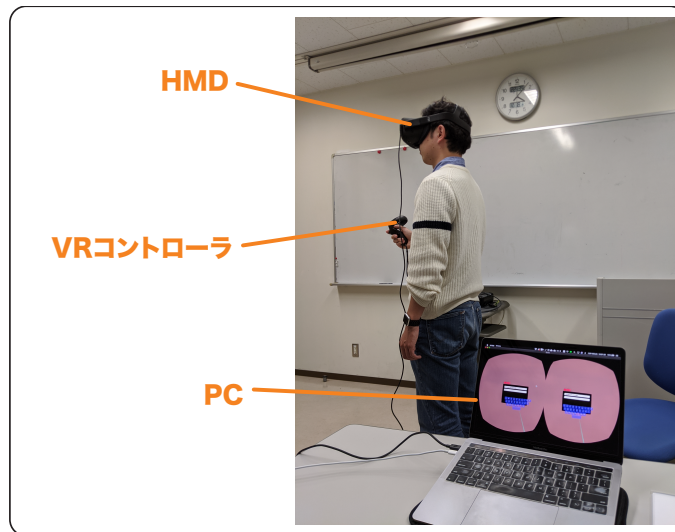


図 6.2: 実験の様子.

### 6.1.2 実験参加者

研究室内の大学生および大学院生を含む 8 人 (22–24 歳, 平均年齢 23.3 歳, 全員男性, P1–P8) を実験参加者として実験を行なった. 参加者全員が右利きであり, キーボードを頻繁に使用していた. また, 参加者の 5 名が眼鏡を使用して実験を行った. 参加者のうち, 1, 2 回程度 VR の使用したことのある人が 7 名, VR を頻繁に使用したことのある人が 1 名であった.

### 6.1.3 入力対象のフレーズ

入力対象とする文章は, 実験 1 と同様に Vertanen ら [VK11] のフレーズセットから, 20–28 文字からなる英文 (全 30 文章) を対象とした.

### 6.1.4 キーボードの形状

平面キーボードおよびカーブキーボードの形状について図 6.3 を参照しながら述べる. 両方のキーボードのキーサイズは一辺 5 cm に統一した. 平面キーボードのキー間は 1 cm 空けて配置するようにした. カーブキーボードの設計として, 球面の半径は 70 cm, 角度は 100 度とした.

レイキャスト入力の際, ユーザは VR コントローラの位置に同期して移動するポインタを動かすことができる. キーにレイを当てた際, ユーザにはキーの色が赤色に変化する視覚フィードバックが与えられた. また, スペースを入力できるようにするため, 他のキー 5 個分の体積を持つスペースキーをキーボード下部に配置した. ジェスチャ入力の際, ユーザが VR コントローラの位置に同期して動くポインタをキーに当てることにより, ユーザにはキーの色

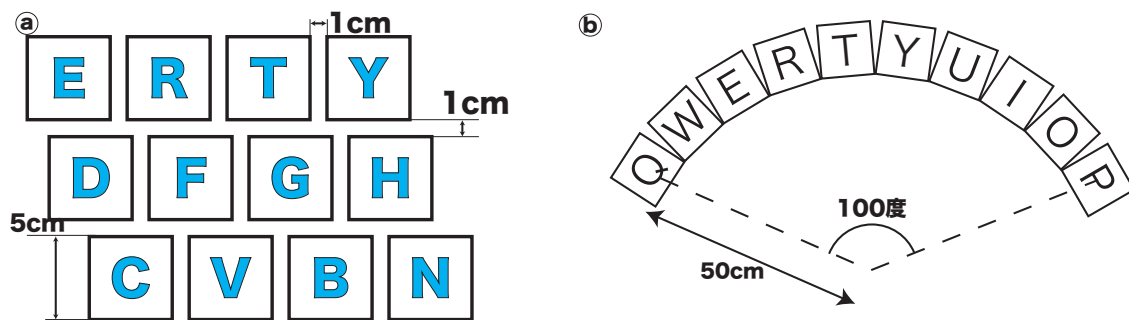


図 6.3: キーボードの設計. a: 平面キーボードを一部拡大した図. キー 1 辺のサイズは 5 cm であり, キー間は 1 cm 空けて配置されている. b: カーブキーボードを上部から見下ろした図. キー 1 辺のサイズは平面キーボードと同じ 5 cm である. 配置する球面の半径は 50 cm とし, 100 度の角度の範囲内に配置されるように設計されている.

が赤色に変化する視覚フィードバックが与えられた. スペースの入力は, 次の単語を入力する際に自動で入力されるようにした. ジェスチャの予測に用いた予測単語の辞書は, Google の Trillion Word Corpus の N グラム頻出度解析により得られた上位 10000 単語を収録した辞書 [Kau] である.

### 6.1.5 実験手順

実験手順のフローチャートを図 6.4 に示す. まず, 参加者には事前アンケートの記入をしてもらった. 事前アンケート記入後に参加者の頭部に HMD を装着し, 利き手に VR コントローラを渡した. 最初に 4 手法のうち 1 つの手法を用いて実験を行ってもらった. 実施する手法の順序は, カウンタバランスをとるため, 参加者ごとに入力手法間 (レイキャスト入力系およびジェスチャ入力系の順序) およびキーボードの形状間 (平面キーボード系およびカーブキーボード系) を変えるようにした. 1 手法の実験終了後, 最大 5 分間の休憩後, 参加者には次の手法へ移ってもらった. 全手法の測定後, 最後に事後アンケートに記入してもらい実験は終了した. 実験時間は平均で 45 分であった.

### 6.1.6 タスク

参加者の前方に表示される課題文と同じ文章の入力を行うことを 1 タスクとした. はじめに, 参加者には 5 文を入力する練習タスクを行ってもらった. その後, 10 文の入力を本番タスクにて実施した. 本番タスク開始時には, 参加者にコントローラのメニューボタンを押してもらうことにより測定が開始され, 文章が完成すると測定は終了された. ただし, 本番タスクの前には, 参加者は提示された文を正しく入力できない際には, 現在の文章の入力を中断し次の文章へ移動できること, およびなるべく速く正確に入力することを伝えた. 測定終了後, 課題文は自動的に次の課題文へと切り替わった. 本番タスク終了後, 参加者には HMD を外

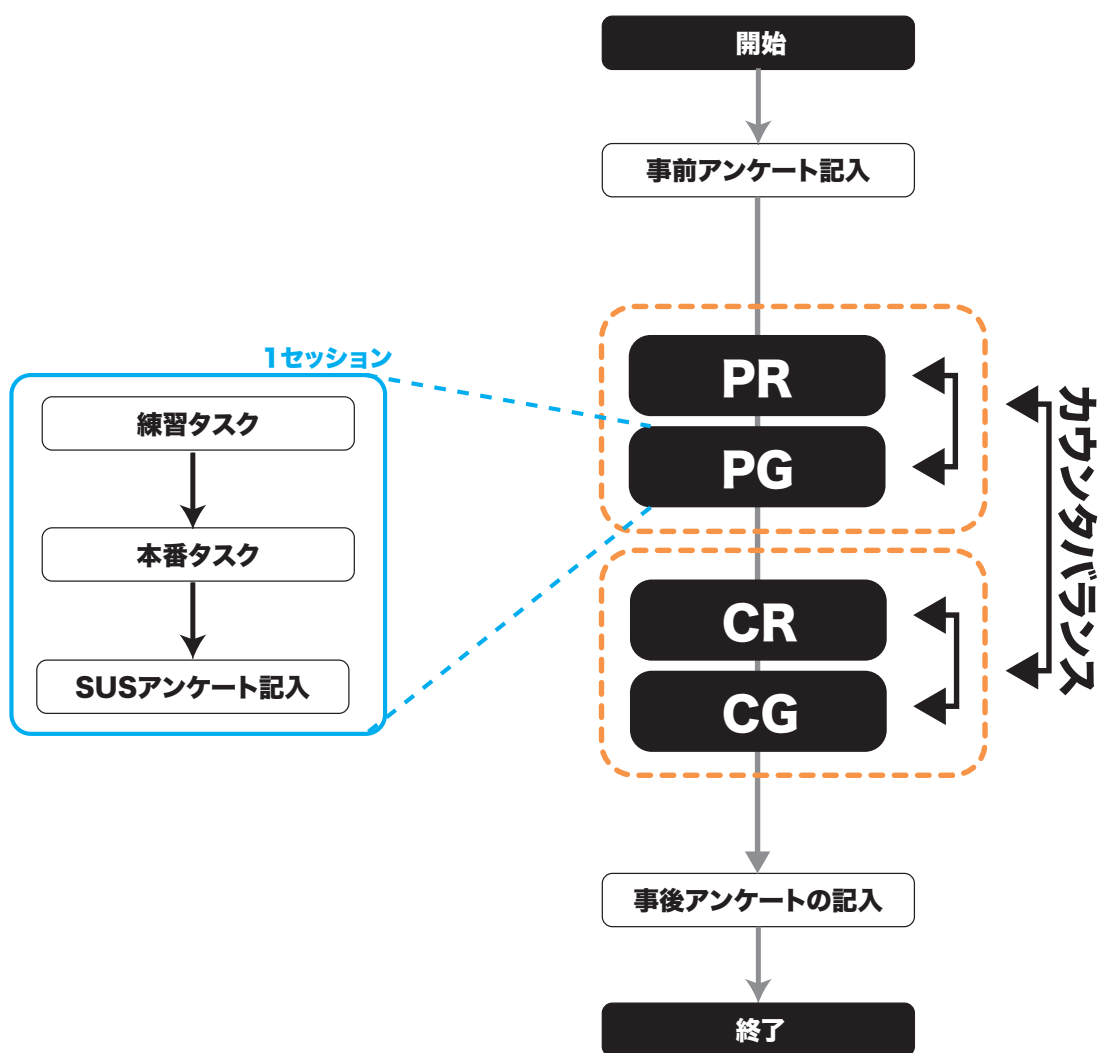


図 6.4: 4 手法の入力性能比較実験のフローチャート



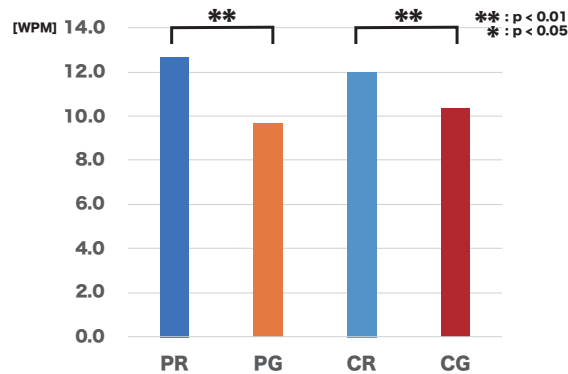


図 6.5: WPM の結果.

してもらい、SUS のアンケートに記入してもらった。この練習タスク、本番タスク、SUS アンケート記入までを 1 セッションとし、参加者には合計 4 セッション行ってもらった。1 セッション終了ごとに、参加者には最大 5 分間の休憩をとってもらった。休憩後、参加者には次の手法へ移ってもらった。よって、測定は、10 タスク × 2 手法 × 2 種類のキーボード × 8 参加者 (計 320) 回行った。

### 6.1.7 評価対象

評価対象は、単語入力速度 (WPM)、提示された文章と入力された文章から算出される MSD エラー率 [SM01, SM03]、誤った入力を修正した回数なども含めて算出されるトータルエラー率 (TER) [MS02]、および SUS の得点 [Bro96] である。SUS の得点は、高ければ高いほどユーザビリティの高い手法であることを示す。MSD エラー率は、式 (4.1) により算出され、TER は、式 (6.1) により算出される。ただし、C は正しく入力した文字数、IF は誤って入力されたが修正した文字数、INF は誤って入力され修正されなかった文字数を指す。

$$TER = \frac{INF + IF}{C + INF + IF} \times 100\% \quad (6.1)$$

## 6.2 実験結果および解析

各手法の WPM の結果を図 6.5 に示す。WPM は、PR では平均 12.7 WPM (SD=6.53)、PG では平均 9.7 WPM (SD=5.51)、CR では平均 11.2 WPM (SD=6.48)、CG では平均 10.4 WPM (SD=5.74) であった。手法、キーボード、および参加者を独立変数として 3 元配置分散分析を行った結果、手法間および参加者間において有意な差があることがわかった ( $p=2.76 \times 10^{-5}$ ,  $p=2.2 \times 10^{-16}$ )。ウィルコクソンの符号順位検定を行った結果、PR-PG 間、および CR-CG 間に有意な差があることがわかった ( $p=8.27 \times 10^{-6}$ ,  $p=0.017$ )。

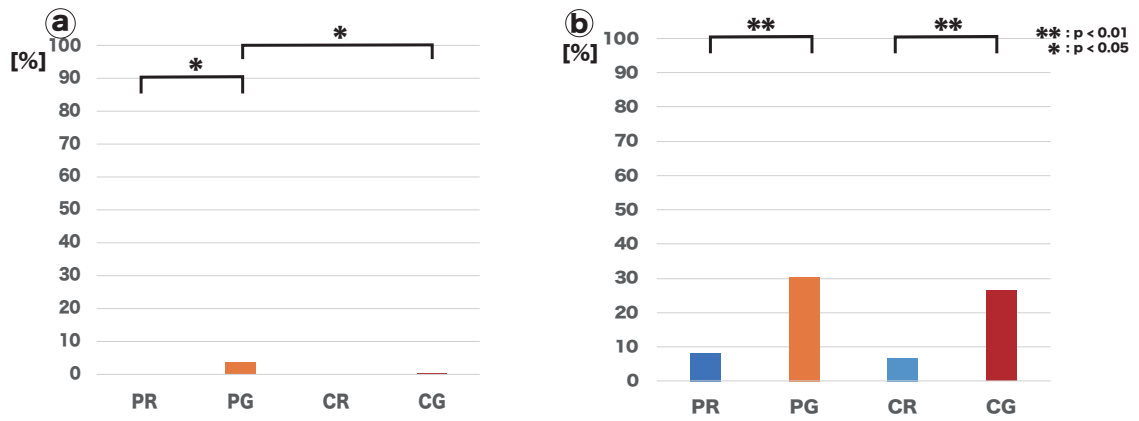


図 6.6: エラー率の結果. a: MSD エラー率の結果. b: TER の結果.

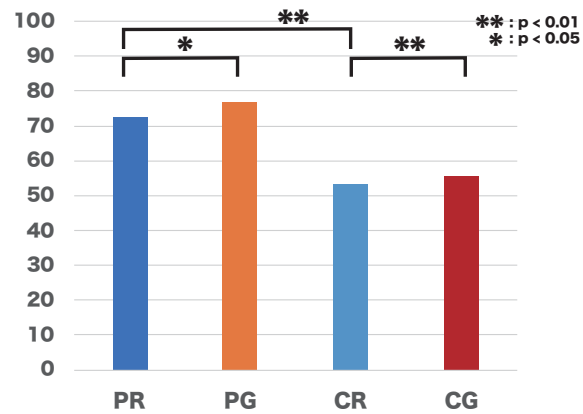


図 6.7: SUS の結果.

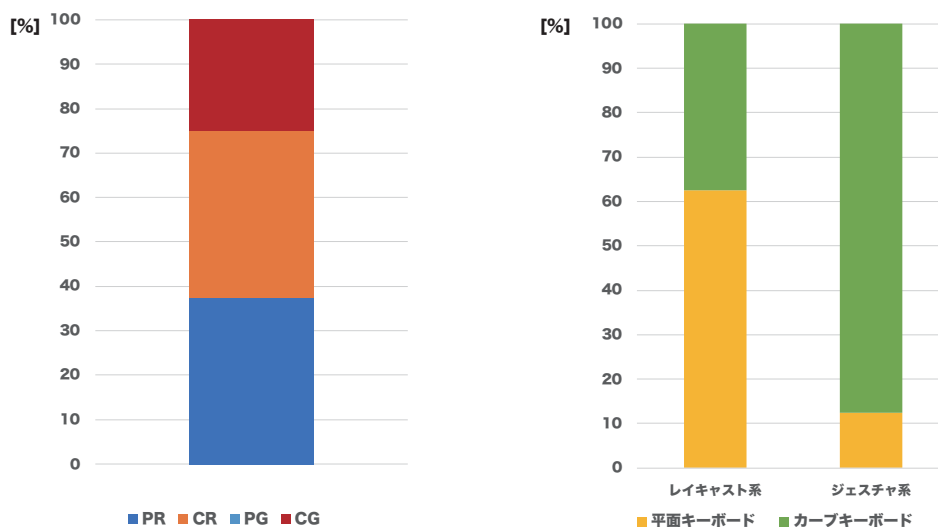


図 6.8: 事後アンケートの結果. 左: 「4 手法のうちどの手法を使いたいと思ったか」という問いに対する結果. 右: 「レイキャスト入力にてどちらのキーボードを使用したいか」および「ジェスチャ入力にてどちらのキーボードを使用したいか」という問いに対する結果.

各手法の MSD エラー率の結果を図 6.6a に示す. MSD エラー率は, PR では平均 0% (SD=0), PG では平均 3.65% (SD=2.32), CR では平均 0% (SD=0), CG では平均 0.10% (SD=0.11) であった. 手法, キーボード, および参加者を独立変数として 3 元配置分散分析を行った結果, 手法間およびキーボード間において有意な差があることがわかった ( $p=0.019$ ,  $p=0.027$ ). ウィルコクソンの符号順位検定を行った結果, PR-PG 間, および PG-CG 間に有意な差があることがわかった ( $p=0.022$ ,  $p=0.024$ ).

各手法の TER の結果を図 6.6b に示す. TER は, PR では平均 8.31% (SD=9.05), PG では平均 30.4% (SD=12.6), CR では平均 6.98% (SD=7.41), CG では平均 26.54% (SD=11.5) であった. 手法, キーボード, および参加者を独立変数として 3 元配置分散分析を行った結果, 手法間およびキーボード間において有意な差があることがわかった ( $p=2 \times 10^{-16}$ ,  $p=0.029$ ). ウィルコクソンの符号順位検定を行った結果, PR-PG 間, および CR-CG 間に有意な差があることがわかった ( $p=7.8 \times 10^{-13}$ ,  $p=3.7 \times 10^{-13}$ ).

各手法の SUS の結果を図 6.7 に示す. SUS アンケートの結果, PR が 72.5 (SD=1.21), PG が 76.75 (SD=0.94), CR が 53.25 (SD=1.20), CR が 55.25 (SD=1.24) であった. 手法, キーボード, および参加者を独立変数として 3 元配置分散分析を行った結果, キーボード間において有意な差があることがわかった ( $p=3.56 \times 10^{-13}$ ). ウィルコクソンの符号順位検定を行った結果, PR-PG 間, PR-CR 間, および CR-CG 間に有意な差があることがわかった ( $p=0.454$ ,  $p=1.14 \times 10^{-6}$ ,  $p=4.56 \times 10^{-9}$ ).

事後アンケートの結果を図 6.8 に示す. 事後アンケートにおいて, 「4 手法のうちどの手法

を使いたいと思ったか」という問いに対して、PR が 37.5%、CR が 37.5%、PG が 0%、CG が 25.0% となり (図 6.8 左)、「レイキャスト入力にてどちらのキーボードを使用したいか」という問いに対して、平面キーボードが 62.5%、カーブキーボードが 37.5% となり (図 6.8 右)、「ジェスチャ入力にてどちらのキーボードを使用したいか」という問いに対して、平面キーボードが 12.5%、カーブキーボードが 87.5% という結果となった (図 6.8 右)。

## 6.3 議論

比較実験の結果から明らかになったことを述べる。

### 6.3.1 カーブキーボードの入力性能

平面キーボード系およびカーブキーボード系のいずれも WPM に差はほとんどなかった。しかし、3 元配置分散分析の結果から、キーボード間にも有意差が認められ、カーブキーボード系の方が TER が低いことがわかった。これは、5.2 節にて述べた改良が結果に表れていると考えられる。よって、カーブキーボードは従来の平面キーボードよりも精度が高いことがわかった。

### 6.3.2 ジェスチャ入力の課題

ジェスチャ入力系のほうが MSD エラー率が高い結果となった理由として、予測アルゴリズムの予測精度の限界があげられる。本システムのジェスチャ入力は Shape Matching のみを利用したものであるため、“fell” と “feel” のような連続に同じ文字が出現する単語の組みを分けて認識することができない。また、文字数の少ない単語を入力する場合に正しく入力できないことが頻発していた。実験 2 では、特徴点が固定数であったため、予測に用いられる特徴点との差が小さくなってしまったことが課題としてあげられる。よって、軌跡の長さによって特徴点数を増減させるような工夫をすることにより、入力の課題は改善できると考えられる。また、今後は予測アルゴリズムに自然言語処理を導入し、次に来る単語の範囲をある程度狭めるような処理を組み込むことが望ましいと考えられる。

### 6.3.3 単語予測の失敗が頻出した箇所

比較実験中、文字数の少ない単語の単語予測に失敗することが多かった。これは、文字数が少なく軌跡の曲がる回数が減ったために軌跡の形状の変化が少なくなり他の単語との類似度が高くなってしまったことにあると考えられる。よって、Shape Matching の他の予測アルゴリズムを導入して改善する必要がある。例えば、SHARK<sup>2</sup> [KZ04] にて採用された Position Matching は、最初に触れたキーの位置および最後に触れたキーの位置を予測に組み込む手法を用いている。これを本システムに組み込むことにより、予測する単語の範囲をより狭めることができる。

### 6.3.4 キーを配置する球面の位置の検討

実験時のカーブキーボードにおいてキーを配置する球面の中心はコントローラの位置であった。ユーザは腕を伸ばした状態のとき、キーはちょうど届くような配置になっているため、疲労度が高くなったと考えられる。この解決策として、球面の中心を変えることを検討する。球面の中心をユーザの手首の位置または肘の位置にして球面の直径を自然な状態にて届く長さに設定すれば、腕を伸ばさず手首または腕を回転させるだけで入力できるようになる。よって、腕の動きが減らせるためゴリラアーム効果による疲労度を低減させることができると考えられる。

### 6.3.5 キーボードのパラメータに関する課題

現在のキーボードのパラメータは、筆者の経験則に基づいて設計されている。そのため、ユーザごとに適したパラメータを与えられるようなキャリブレーション機能が追加されれば、カーブキーボードのユーザビリティを向上させることができる。具体的なパラメータとしては、キーボードの形状（キーを配置する曲率、キーのサイズ、キー間の距離、ユーザ間の距離、および角度）などが考えられる。

## 第7章 議論

本章では、キューブキーボードおよびカーブキーボードの両方の実験を行った結果明らかとなったことを述べる。

### 7.1 キー配置の検討

本研究では、キューブキーボードおよびカーブキーボードを提案したが、両キーボードの入力性能の比較はまだ調査できていない。また、他の位置にキーを配置することにより立体キーボードの入力性能を向上させることや疲労度を抑えることが可能になりうる。例えばカーブキーボードのキーを配置する球面の中心を肩の位置でなく肘や手首の位置にすれば、肘や手首を中心に動かすだけで操作できるため、ゴリラアーム効果による疲労度を抑えられると考えられる。また、実験1および実験2にて、ユーザは提案した2つの立体キーボードを腕の前に出しながら操作していたため、ゴリラアーム効果 [BJB09] による腕の疲労度が高くなっていた。関連研究には、疲労度を低減させるために、腕を下ろした状態にて操作を可能にした入力手法が存在する [GJY<sup>+</sup>19]。そのため、立体キーボードにおいても腕を下ろした状態にて入力した際の入力精度を調査する必要がある。また、腕を下ろした状態にて、手元を視認せずに文字を入力できれば、視線を下に向けずに手前のコンテンツ（例、仮想ディスプレイ）を見ながら操作できるためユーザビリティも向上すると考えられる。また、疲労度を定量的に評価するため Consumed Endurance [HRGMI14] を用いることを検討する。

### 7.2 触覚フィードバックの有無による入力性能の変化

カーブキーボードの実験では、VRの文字入力に対して触覚フィードバックを無しの条件で調査した。しかし、スマートフォン上のソフトキーボードの場合、触覚フィードバックを付与した方が性能が高まったと報告された研究 [WHLS17] や、触覚フィードバックを加えることにより入力性能が向上し物理キーボードの文字入力性能に近くなると報告された研究 [HBJ08] がある。これらの研究と同様に、立体キーボードにおいても触覚フィードバックの有無により入力性能に影響を及ぼす可能性がある。よって、触覚フィードバック（例、VRコントローラの振動および電気刺激）を付与した場合と付与しない場合の立体キーボードの入力性能の比較調査を行う必要がある。

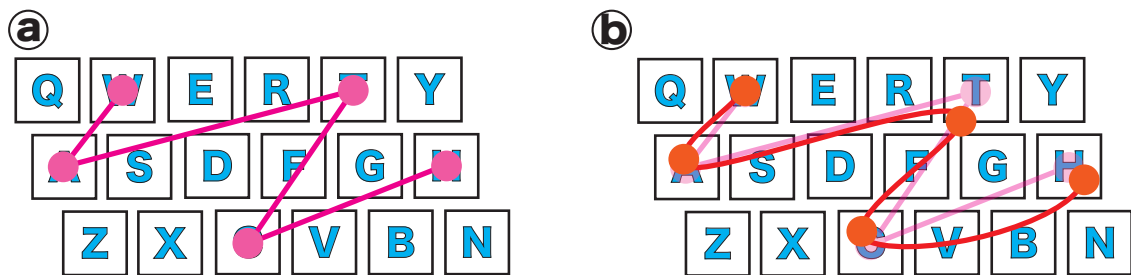


図 7.1: 軌跡の形状の違い.

### 7.3 他の言語に対応した立体キーボードの検討

提案した2つの立体キーボードのキーは英字26文字のみである。よって、ユーザは英文やローマ字の入力が可能である。しかし、ひらがな入力や他の言語の入力をするためには英字以外のキーが必要になる。他の言語に対応させたシステムの一例として、スマートフォンに搭載されているソフトキーボードは、言語切り替えキーを押すことにより他の言語に対応したキーボードに切り替えることができる。また、言語によりキーレイアウトも同時に切り替えられるようになっている。立体キーボードにおいても、ソフトキーボードと同様に言語切り替えキーを設けることにより、他の言語に対応した異なるレイアウトのキーボードに切り替えることが可能である。今後は、他の言語を入力できるようにするため、英字以外（ひらがな、カタカナ、およびハングルなど）を検討する。また、他の言語を入力する際も3次元ジェスチャ入力が効率的か検討する。

### 7.4 3次元ジェスチャ入力の改良

カーブキーボード上にて実装した3次元ジェスチャ入力は、軌跡の形状のみを予測に用いて単語を入力する。しかし、予測に用いた軌跡の Shape Matching 用のモデルは、キーからキーへ一直線に引いたモデルであるため、杜撰な入力をするとう正しい単語を入力できない(図7.1)。よって、SHARKの単語予測手法を完全に3次元ジェスチャ入力に拡張できれば、入力精度は向上すると考えられる。また、6.3節にて述べたように、予測アルゴリズムに自然言語処理を導入し、次に来る単語の範囲をある程度狭めるような処理を組み込むことが望ましいと考えられる。

## 第8章 まとめ

VR アプリ上の汎用的な文字入力には、キーの選択にレイキャストを用いるため、1文字入力するのに要する時間が長い点、および面積の狭いキーに対してレイキャストで選択することは向いていない点から非効率である。

本研究では、VR 上の文字入力の入力効率を向上させることを目的として、3次元ジェスチャ入力および立体キーボードを提案した。はじめに、立体キーボードの一つとしてキューブキーボードを提案し、入力性能を調査した結果、WPMは使用回数が増えるほど高くなること、MSDエラー率が低いこと、およびSUSスコアはGB手法にて66.3であることがわかった。次に、キューブキーボードの課題であった、キーが把握しにくいことおよび疲労度が高いことを解決するため、次にカーブキーボードを提案した。平面キーボードとカーブキーボードの入力性能を比較調査した結果、キーボード間のWPMに有意な差はなかったが、キーボード間のTERに有意な差がありカーブキーボードは平面キーボードよりもTERが低い結果となった。よって、カーブキーボードは従来の平面キーボードよりも入力精度が高いことがわかった。



## 謝辞

本研究を進めるにあたり，志築文太郎先生，高橋伸先生には多くのご意見とご指摘をいただきました。こころから感謝いたします。主指導教員である志築文太郎先生には，研究の進め方および論じ方だけでなく，研究に対する心構えなど隅々までご指導いただきました。重ねて感謝いたします。

インタラクティブプログラミング研究室の後輩たち，同期，先輩方には多くの助言をいただきました。チームゼミでは，WAVE チームの皆さまにアイデアを出していただき，よりよい研究になるようにたくさんのご意見をいただきました。2年間という短い研究室の生活は，研究室の皆様と深く関わり合うことによりとても充実したものになりました。深く感謝いたします。

最後に，いままで私を育て支えてくださった両親に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [BB97] James Boritz and Kellogg S. Booth. A study of interactive 3D point location in a computer simulated virtual environment. In *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '97, pp. 181–187, New York, NY, USA, 1997. ACM.
- [BJB09] Sebastian Boring, Marko Jurmu, and Andreas Butz. Scroll, tilt or move it: Using mobile phones to continuously control pointers on large public displays. In *Proceedings of the 21st Annual Conference of the Australian Computer-Human Interaction Special Interest Group: Design: Open 24/7*, OzCHI '09, pp. 161–168, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [BK19] Costas Boletsis and Stian Kongsvik. Text input in virtual reality: A preliminary evaluation of the drum-like VR keyboard. Vol. 7. MDPI, April 2019.
- [BLHB18] Joanna Bergstrom-Lehtovirta, Kasper Hornbæk, and Sebastian Boring. It's a wrap: Mapping on-skin input to off-skin displays. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 564:1–564:11, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [BMS18] Mayra Donaji Barrera Machuca and Wolfgang Stuerzlinger. Do stereo display deficiencies affect 3D pointing? In *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '18, pp. LBW126:1–LBW126:6, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [BMS19] Mayra Donaji Barrera Machuca and Wolfgang Stuerzlinger. The effect of stereo display deficiencies on virtual hand pointing. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, pp. 207:1–207:14, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [BPC19] Marc Baloup, Thomas Pietrzak, and Géry Casiez. Raycursor: A 3D pointing facilitation technique based on raycasting. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, pp. 101:1–101:12, New York, NY, USA, 2019. ACM.

- [Bro96] John Brooke. SUS : A quick and dirty usability scale. *Usability Evaluation in Industry*, pp. 189–194, 1996.
- [Bro13] John Brooke. SUS: A retrospective. *Journal of Usability Studies*, Vol. 8, No. 2, pp. 29–40, February 2013.
- [BS19] Anil Ufuk Batmaz and Wolfgang Stuerzlinger. The effect of rotational jitter on 3D pointing tasks. In *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '19, pp. LBW2112:1–LBW2112:6, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [CP17] Lewis Carter and Leigh Ellen Potter. Spatial virtual keyboard for wand based virtual reality. In *Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction*, SUI '17, pp. 161–161, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [CWG<sup>+</sup>19] Sibor Chen, Junce Wang, Santiago Guerra, Neha Mittal, and Soravis Prakkamakul. Exploring word-gesture text entry techniques in virtual reality. In *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '19, pp. LBW0233:1–LBW0233:6, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [Fit54] Paul. M. Fitts. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 74, pp. 381–391, 1954.
- [GB04] Tovi Grossman and Ravin Balakrishnan. Pointing at trivariate targets in 3D environments. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '04, pp. 447–454, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [GJY<sup>+</sup>19] Aakar Gupta, Cheng Ji, Hui-Shyong Yeo, Aaron Quigley, and Daniel Vogel. Roto-Swype: Word-gesture typing using a ring. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, pp. 14:1–14:12, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [GOZ16] Mitchell Gordon, Tom Ouyang, and Shumin Zhai. WatchWriter: Tap and gesture typing on a smartwatch miniature keyboard with statistical decoding. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 3817–3821, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [HBJ08] Eve Hoggan, Stephen A. Brewster, and Jody Johnston. Investigating the effectiveness of tactile feedback for mobile touchscreens. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '08, pp. 1573–1582, New York, NY, USA, 2008. ACM.

- [HRGMI14] Juan David Hincapié-Ramos, Xiang Guo, Paymahn Moghadasian, and Pourang Irani. Consumed endurance: A metric to quantify arm fatigue of mid-air interactions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 1063–1072, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [JRB16] Isabelle Janzen, Vasanth K. Rajendran, and Kellogg S. Booth. Modeling the impact of depth on pointing performance. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 188–199, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [Kau] Josh Kaufman. google-10000-english. <https://github.com/first20hours/google-10000-english>. 2019 年 7 月 1 日閱覽.
- [KK16] Youngwon R. Kim and Gerard J. Kim. HoVR-type: Smartphone as a typing interface in vr using hovering. In *Proceedings of the 22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '16, pp. 333–334, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [KZ04] Per-Ola Kristensson and Shumin Zhai. SHARK<sup>2</sup>: A large vocabulary shorthand writing system for pen-based computers. In *Proceedings of the 17th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '04, pp. 43–52, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [MJH14] Anders Markussen, Mikkel Rønne Jakobsen, and Kasper Hornbæk. Vulture: A mid-air word-gesture keyboard. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 1073–1082, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [MS02] I. Scott MacKenzie and R. William Soukoreff. A character-level error analysis technique for evaluating text entry methods. In *Proceedings of the Second Nordic Conference on Human-computer Interaction*, NordiCHI '02, pp. 243–246, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [MYA<sup>+</sup>19] Nathan Moore, Soojeong Yoo, Naseem Ahmadpour, Russel Tommy, Martin Brown, and Philip Poronnik. Als-simvr: Advanced life support virtual reality training application. In *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '19, pp. 103:1–103:2, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [PBWI96] Ivan Poupyrev, Mark Billinghurst, Suzanne Weghorst, and Tadao Ichikawa. The Go-Go interaction technique: Non-linear mapping for direct manipulation in vr. In *Proceedings of the 9th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '96, pp. 79–80, New York, NY, USA, 1996. ACM.

- [PS15] Max Pfeiffer and Wolfgang Stuerzlinger. 3D virtual hand selection with ems and vibration feedback. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '15, pp. 1361–1366, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [PS19] Duc-Minh Pham and Wolfgang Stuerzlinger. HawKEY: Efficient and versatile text entry for virtual reality. In *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '19, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [QT17] Yuan Yuan Qian and Robert J. Teather. The eyes don't have it: An empirical comparison of head-based and eye-based selection in virtual reality. In *Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction*, SUI '17, pp. 91–98, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [RH18] Vijay Rajanna and John Paulin Hansen. Gaze typing in virtual reality: Impact of keyboard design, selection method, and motion. In *Proceedings of the 2018 ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, ETRA '18, pp. 15:1–15:10, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [Ric10] Jochen Rick. Performance optimizations of virtual keyboards for stroke-based text entry on a touch-based tabletop. In *Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '10, pp. 77–86, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [RPB11] Anne Roudaut, Henning Pohl, and Patrick Baudisch. Touch input on curved surfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pp. 1011–1020, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [SAKL19] Jeongmin Son, Sunggeun Ahn, Sunbum Kim, and Geehyuk Lee. Improving two-thumb touchpad typing in virtual reality. In *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '19, pp. LBW2217:1–LBW2217:6, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [SFZK18] Marco Speicher, Anna Maria Feit, Pascal Ziegler, and Antonio Krüger. Selection-based text entry in virtual reality. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 647:1–647:13, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [SM01] R. William Soukoreff and I. Scott MacKenzie. Measuring errors in text entry tasks: An application of the Levenshtein string distance statistic. In *CHI '01 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '01, pp. 319–320, New York, NY, USA, 2001. ACM.

- [SM03] R. William Soukoreff and I. Scott MacKenzie. Metrics for text entry research: An evaluation of MSD and KSPC, and a new unified error metric. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '03, pp. 113–120, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [SSR18] Junwei Sun, Wolfgang Stuerzlinger, and Bernhard E. Riecke. Comparing input methods and cursors for 3D positioning with head-mounted displays. In *Proceedings of the 15th ACM Symposium on Applied Perception*, SAP '18, pp. 8:1–8:8, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [ST14] Wolfgang Stuerzlinger and Robert J. Teather. Considerations for targets in 3D pointing experiments. In *Proceedings of HCI Korea*, HCIK '15, pp. 162–168, South Korea, 2014. Hanbit Media, Inc.
- [THY<sup>+</sup>19] Huawei Tu, Susu Huang, Jiabin Yuan, Xiangshi Ren, and Feng Tian. Crossing-based selection with virtual reality head-mounted displays. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, pp. 618:1–618:14, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [TS13] Robert J. Teather and Wolfgang Stuerzlinger. Pointing at 3D target projections with one-eyed and stereo cursors. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, pp. 159–168, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [VK11] Keith Vertanen and Per Ola Kristensson. A versatile dataset for text entry evaluations based on genuine mobile emails. In *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '11, pp. 295–298, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [VSWB12] Simon Voelker, Christine Sutter, Lei Wang, and Jan Borchers. Understanding flicking on curved surfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pp. 189–198, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [WHL17] Chien-Min Wu, Chih-Wen Hsu, Tzu-Kuei Lee, and Shana' Smith. A virtual reality keyboard with realistic haptic feedback in a fully immersive virtual environment. Vol. 21 of *Virtual Reality*, pp. 19–29. Springer, Mar 2017.
- [ZK03] Shumin Zhai and Per-Ola Kristensson. Shorthand writing on stylus keyboard. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '03, pp. 97–104, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [ZKG<sup>+</sup>09] Shumin Zhai, Per Ola Kristensson, Pengjun Gong, Michael Greiner, Shilei Allen Peng, Liang Mico Liu, and Anthony Dunnigan. Shapewriter on the iPhone: From

the laboratory to the real world. In *CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '09, pp. 2667–2670, New York, NY, USA, 2009. ACM.

- [喜多 19] 喜多修太郎, 小倉加奈代, Bista Bhed Bahadur, 高田豊雄. LeapMotion を用いた VR 上での文字入力手法の検討. 情報処理学会研究報告, Vol. 2019-HCI-181, No. 21, p. 7 pages, January 2019.
- [細野 14] 細野敬太, 笹倉万里子, 田邊浩亨, 川上武志. Leap Motion を用いたジェスチャ操作による文字入力方法の提案. 第 28 回全国大会論文集. 人工知能学会, 2014.
- [川口 19] 川口航平, 磯本俊弥, 志築文太郎, 高橋伸. VR 向けの掌上における日本語フリック入力手法の提案. ヒューマンインタフェースシンポジウム 2019. 特定非営利活動法人, 2019.
- [大西 16] 大西未来, 渡辺大地. Leap motion を使用した文字入力方法の提案. コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学 (CG) , 第 2016-CG-165 巻, pp. 1–4, 2016.
- [福仲 19] 福仲伊織, 謝浩然, 宮田一乗. VR 環境におけるフリック入力形式インタフェースの開発. 情報処理学会研究報告, Vol. 2019-HCI-182, No. 3, pp. 1–8, 2019.

# 著者論文リスト

## 本論文に関する論文, 発表および特許

- 査読あり国際会議論文
  1. Naoki Yanagihara and Buntarou Shizuki. 2018. Cubic Keyboard for Virtual Reality. In Proceedings of the Symposium on Spatial User Interaction, SUI '18, ACM, New York, NY, USA, 170-170.
  2. Naoki Yanagihara, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. 2019. Text Entry Method for Immersive Virtual Environments Using Curved Keyboard. In 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '19, ACM, New York, NY, USA, Article 116, 2 pages.
  3. Naoki Yanagihara, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. 2019. A Comparative Study of Planar Surface and Spherical Surface for 3D Pointing Using Direct Touch. In 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '19, ACM, New York, NY, USA, Article 42, 2 pages.
- 査読なし国際会議論文
  1. Naoki Yanagihara, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. 2019. Preliminary Evaluation of Stroke-Based Text Entry for Virtual Reality. In Proceedings of Asian CHI Symposium '19, ACM, Gragrow, UK, 8 pages.
- 査読なし国内会議論文
  1. 柳原直貴, 志築文太郎, 高橋伸, 3次元ストロークを用いた文字入力手法. 情報処理学会研究報告, Vol2019-HCI-181, 6 pages. 2019年1月. 情報処理学会.
- 招待デモ発表
  1. Naoki Yanagihara, Buntarou Shizuki. Cubic Keyboard for Virtual Reality. Special Invitation for SUI 2018 Demos at UIST 2018, In Proceedings of the Symposium on Spatial User Interaction (SUI '18). ACM, New York, NY, USA, 170-170, October 2018.
- 出願済み特許
  1. 柳原直貴, 志築文太郎. 情報処理装置. 特願 2019-203287. 2019年11月



## その他の論文

- 査読あり国際会議論文

1. Shun Fujita, Naoki Yanagihara, Buntarou Shizuki, Shin Takahashi. Ray-Casting Based Interaction Using a Extended Pull-Out Gesture for Interactive Tabletops. Proceedings of the 31st Australian Computer-Human Interaction Conference (OzCHI 2019), 4 pages.

- 査読なし国内会議論文

1. 藤田 俊, 柳原 直貴, 志築 文太郎, 高橋 伸. レイキャストによる引出しジェスチャを用いた大型ディスプレイ向けの操作手法. 第27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, 2 pages.

## 付録A 実験の際に用いた各種書類

本研究における実験にて用いた，実験同意書，実験計画書，ビデオ画像の公開についての承諾書・承諾変更書を以下に示す．さらに，各実験に用いた実験後アンケートの用紙も合わせて示す．

## A.1 実験計画書

### 研究実施計画書

#### ■課題名

仮想現実に対する操作手法の評価

#### ■実施責任者

システム情報系 准教授 志築文太郎

#### ■研究等の概要

仮想現実（以降、VR）を用いた既存の操作手法は非効率であるものが多い。主にVRで用いられる操作としては、レーザーポインタのように物体を指して選択するポインティング操作や、仮想キーボードを利用した文字入力操作である。例えば、文字入力操作についてはVR空間に平面的なキーボードを配置し、VR専用のコントローラで選択するものがあるが、入力速度や精度などの性能は物理キーボードよりもかなり劣る。

我々は、操作が簡単かつ効率的な手法を実現するために、新たな操作手法（以降、提案手法）を開発した。提案手法は、一文字ずつ入力するものではなく、ある単語を連想する文字列に連続して触れることにより単語単位の入力するものである。提案手法の性能は既存手法よりも向上すると考え、提案手法の性能を評価するための実験を行う。

#### ■実験内容

実験参加者に、提案手法を実装した図1に示す実験装置を用いて指定した操作を行う。実験参加者には頭部装着型デバイス(HMD)([1]など)を被ってもらい、提案手法を用いてコントローラを用いてVR空間上に表示される文章と同じ文の作成を行う。文字入力は、片手に持つコントローラを使用して、VR空間上の空中に配置された仮想的なキーにコントローラを接触させることにより行う。実験は、1文章における入力速度および精度の測定であり、30文章の入力を行う。また、5文章の入力ごとに数分(少なくとも1分)の休憩時間を設け、任意でHMDを外してもらい。実験は、図2に示すように立った状態で行い、休憩時間の際には椅子に座って休憩してもらい。HMDを長時間使用して、タスクを行う

ことで肉体的・精神的な疲労が予想される。そのため、実験中は各条件の途中であっても、研究対象者の意思で自由に中断・休憩、もしくは参加を中止できることを事前に説明する。



図1：実験装置



図2：実験実施図

■実験参加者

実験協力者は本学教職員および学生の中から任意で参加を依頼する。また、実験協力者には、実験へ参加した時間に対する報酬として、筑波大学の謝金規定

に基づいた時給(830円)を支払う。報酬の支給方法は口座振り込みまたはアマゾンギフト券等の提供とする。実験を途中で止めた場合も、実験協力者が実験に参加した時間から時給を算出し、支払うこととする。

■実験手順

1. 実験参加者から、同意書に基づき実験への同意を得る。
2. 実験参加者にHMDを装着してもらう。
3. 提案手法の練習時間を5～10分程度設ける。
4. 一度、HMDを外してもらい、休憩を数分設ける。
5. 実験参加者にHMDを装着してもらう。
6. 以下(セッション)を、指定した回数行ってもらう。
  - (a) VR空間上に表示された文章(5文章)と同じ文を作成してもらう。(5～10分)
  - (b) 疲労を抑えるために、休憩時間を設ける(1～3分)
7. セッションを指定した回数(6回程度)繰り返す。
8. 全てのセッションが終わった後、実験に関する意見についてのアンケート(図3)を行う。(1～2分)

1セッションの所要時間は40分～60分と見積もっている。なお、実験参加者に過度の負荷が掛からないように、アンケートへの記入時間も含めて、実験の総所要時間が2時間00分を超えないようにする。

## A.2 実験同意書

### 同 意 書

筑波大学システム情報系長 殿

私は、「課題名：仮想現実に対する操作手法の評価」について、研究概要、方法、研究対象者の必要性、研究対象者に対するリスクと安全性、研究に参加する上で想定される危険の回避、ビデオ録画を含めた個人情報の保護について十分な説明を受けました。

説明の際、本研究に協力することに同意しなくても何ら不利益を受けないこと、さらに、同意後も私自身の自由意思により不利益を受けず、参加の同意を撤回できることも理解しました。また、研究や実験の終了後であっても、枠下に指定の期日迄であれば、データ提供の同意を撤回できることも理解しました。私は、このことを理解した上で研究対象者になることに同意します。

平成 年 月 日

氏 名 \_\_\_\_\_ (署名)

「課題名：仮想現実に対する操作手法の評価」の研究について、次の内容について平成 年 月 日に説明を行い、上記のとおり同意を得ました。

実施責任者 所 属 \_\_\_\_\_

氏 名 \_\_\_\_\_ (署名又記名押印)

データ提供の同意撤回の期限は同意書署名の日から30日後までとさせていただきます。

研究や実験に協力した結果、不都合があった場合の連絡先

実施分担者 (所属: \_\_\_\_\_ 氏名: \_\_\_\_\_ TEL: \_\_\_\_\_)

(実施分担者が学生の場合、研究室の電話番号を記入してください。)

実施責任者 (所属:筑波大学 システム情報系 氏名:志築文太郎 TEL:029-853-5520)

筑波大学 システム情報系 研究倫理委員会 事務局

(システム情報エリア支援室 TEL:029-853-4989)

(裏面)

① 研究の概要について

仮想現実（以降、VR）を用いた既存の操作手法は非効率であるものが多い。主に VR で用いられる操作としては、レーザーポインタのように物体を指して選択するポインティング操作や、仮想キーボードを利用した文字入力操作である。例えば、文字入力操作については VR 空間に平面的なキーボードを配置し、VR 専用のコントローラで選択するものがあるが、入力速度や精度などの性能は物理キーボードよりもかなり劣る。我々は、操作が簡単かつ効率的な手法を実現するために、新たな操作手法（以降、提案手法）を開発した。また、本研究は大学からの研究費、科学研究費補助金に加えて企業との共同研究等も原資とした研究である。

**拘束時間**

実験の 1 日当たりの所要時間は、休憩やアンケートの記入も含めて最大 120 分程度となります。

**謝金の対応**

実験協力者には、実験へ参加した時間に対する報酬として、筑波大学の謝金規定に基づいた時給(830 円)を支払います。報酬の支給方法は口座振り込みまたはアマゾンギフト券等の提供とします。実験を途中で止めた場合も、実験協力者が実験に参加した時間から時給を算出し、支払うこととします。

**研究等を行う期間**

研究倫理委員会承認後                    ～   2024年   3月31日

② 研究対象者の必要性、研究への参加におけるリスクと安全性、危険回避の方法について

提案手法は、一文字ずつ入力するものではなく、ある単語を連想する文字列に連続して触れることにより単語単位の入力するものです。提案手法の性能は既存手法よりも向上すると考え、提案手法の性能を評価するための実験を行う必要があります。

そのために、この実験では、設計・開発中のシステムを実験協力者に使用していただき、その後アンケートにご回答頂きます。回答したくない項目に関しては空欄としてください。

本実験の参加は、任意であり、参加に同意しないことによる影響は一切ありません。また、実験協力者が与えたインフォームド・コンセントについて、いつでも不利益を受けることなく撤回することができます。

HMD を装着する時間は測定実験を行う時間のみとし、休憩の際には HMD を外してもらい、心身の苦痛及び不快な状態とならないように配慮します。なお、HMD を長時間装着したタスクを行うため、肉体的・精神的な疲労が予想されます。実験中は各条件の途中であっても、実験協力者の申出により自由に中断・休憩、もしくは参加を中止いただけます。研究成果公表の際、実験協力者から得られたビデオ画像以外のデータは個人を特定できないように加工して使用させていただきます。ビデオ画像に関してはビデオ画像の公開についての承諾書の内容に従います。

研究に関する問い合わせは同意書署名欄下部に記載された連絡先(志築文太郎准教授)までお願いいたします。

③ 個人情報の保護について

- 実験中に、操作手法の性能の確認および問題点の抽出を行うため、写真やビデオの撮影を行う場合があります。また、その写真やビデオを発表において利用する場合は、実験協力者の確認を得た上で、研究目的においてのみ利用いたします。
- 実験への参加は、協力者の自由意思によるものであり、実験への参加を随時拒否・撤回することができます。
- 学会・論文などでデータを発表する際は、データおよびそれを統計的に処理したものだけを用います。実験参加者を表現するためには、記号・数字を用います。個人を特定できる情報は公表しません。ただし、実験参加者全体については、性別の実験参加者数、年齢の範囲、所属を公表することがあります。
- 実験において得たデータは全て暗号化された状態で論文発表後 10 年間保存されます。暗号化に用いられるパスワードは本研究に関わる研究者のみが知っているものを使用します。なお、さらに安全を期すため、データに個人名が入ることはありません。個人名が記入された書類は研究期間の終了後シュレッダーにて粉碎されます。
- 上記以外のいかなる場合においても実験協力者のプライバシーは保全されます。



### A.3 ビデオ画像の公開についての承諾書・承諾変更書

#### ビデオ画像の公開についての

承諾書・承諾変更書 (どちらかに○を付けてください)

筑波大学システム情報系  
(実施責任者) 志築文太郎 殿

私は、「研究課題：3次元ポインティングに関する評価」におけるビデオ画像が公開されることについて  
(該当する選択肢の□にチェックを付けてください)

- 承諾します。(どちらかにチェックを付けてください)
- 顔が特定される形式のまま、画像が論文発表、Web への掲載、テレビ放映などで公開されることに異存ありません。
- モザイク処理等をして個人が特定されない形式にした上で、画像が論文発表、Web への掲載、テレビ放映などで公開されることに異存ありません。
- 以下の条件付きで公開を承諾します。  
条件：(具体的に記述してください)

承諾しません。

平成 年 月 日 氏名

## A.4 実験後アンケート（キューブキーボード）

### System Usability Scale (A 手法)

文責：柳原 直貴

1. このシステムをしばしば使いたいと思う  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
2. このシステムは不必要なほど複雑であると感じた  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
3. このシステムは容易に使えると思った  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
4. このシステムを使うのに技術専門家のサポートが必要とするかもしれない  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
5. このシステムにあるさまざまな機能がよくまとまっていると感じた  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
6. このシステムでは、一貫性のないところが多くあったとおもった  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
7. たいいていのユーザは、このシステムの仕様方法について、素早く学べるだろう  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
8. このシステムはとても扱いにくいと思った  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
9. このシステムを使うのに自信があると感じた  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
10. このシステムを使い始める前に多くのことを学ぶ必要があった  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)

**System Usability Scale (B 手法)**

文責：柳原 直貴

11. このシステムをしばしば使いたいと思う  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
12. このシステムは不必要なほど複雑であると感じた  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
13. このシステムは容易に使えると思った  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
14. このシステムを使うのに技術専門家のサポートが必要とするかもしれない  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
15. このシステムにあるさまざまな機能がよくまとまっていると感じた  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
16. このシステムでは、一貫性のないところが多くあったとおもった  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
17. たいいていのユーザは、このシステムの仕様方法について、素早く学べるだろう  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
18. このシステムはとても扱いにくいと思った  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
19. このシステムを使うのに自信があると感じた  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
20. このシステムを使い始める前に多くのことを学ぶ必要があった  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)

実験後アンケート

1. どちらの手法がより楽にタスクを行えましたか。 A 手法・B 手法

理由

--

2. 本システムについて、良かった点、改善すべき点、感想をご記入ください。

良かった点	良かった点
改善すべき点	改善すべき点
感想等	感想等

3. 自由記述欄

--

アンケートは以上になります。ご協力ありがとうございました。

## A.5 実験前アンケート（カーブキーボード）

### 事前アンケート

文責：柳原 直貴

1. 以下にご回答をお願いします
    - 年齢：（ ）歳
    - 利き手：（ ）
    - メガネの使用：（有 / 無）
    - VRの使用経験：（一度もない / 1,2回程度 / 頻繁に使用している）
    - キーボードの使用経験：（一度もない / 稀に使用 / 頻繁に使用している）
      - ・日常的に使用するキーボード：（ ）
- 【例：物理的な QWERTY キーボード，スマートフォンのフリックキーボード】

## A.6 実験後アンケート（カーブキーボード）

### System Usability Scale (PR 手法)

文責：柳原 直貴

1. このシステムをしばしば使いたいと思う  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
2. このシステムは不必要なほど複雑であると感じた  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
3. このシステムは容易に使えると思った  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
4. このシステムを使うのに技術専門家のサポートが必要とするかもしれない  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
5. このシステムにあるさまざまな機能がよくまとまっていると感じた  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
6. このシステムでは、一貫性のないところが多くあったとおもった  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
7. たいていのユーザは、このシステムの仕様方法について、素早く学べるだろう  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
8. このシステムはとても扱いにくいと思った  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
9. このシステムを使うのに自信があると感じた  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
10. このシステムを使い始める前に多くのことを学ぶ必要があった  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)

### System Usability Scale (CR 手法)

文責：柳原 直貴

1. このシステムをしばしば使いたいと思う  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
2. このシステムは不必要なほど複雑であると感じた  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
3. このシステムは容易に使えと思った  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
4. このシステムを使うのに技術専門家のサポートが必要とするかもしれない  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
5. このシステムにあるさまざまな機能がよくまとまっていると感じた  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
6. このシステムでは、一貫性のないところが多くあったとおもった  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
7. たいいていのユーザは、このシステムの仕様方法について、素早く学べるだろう  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
8. このシステムはとても扱いにくいと思った  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
9. このシステムを使うのに自信があると感じた  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
10. このシステムを使い始める前に多くのことを学ぶ必要があった  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)

### System Usability Scale (PG 手法)

文責：柳原 直貴

1. このシステムをしばしば使いたいと思う  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
2. このシステムは不必要なほど複雑であると感じた  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
3. このシステムは容易に使えと思った  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
4. このシステムを使うのに技術専門家のサポートが必要とするかもしれない  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
5. このシステムにあるさまざまな機能がよくまとまっていると感じた  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
6. このシステムでは、一貫性のないところが多くあったとおもった  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
7. たいいていのユーザは、このシステムの仕様方法について、素早く学べるだろう  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
8. このシステムはとても扱いにくいと思った  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
9. このシステムを使うのに自信があると感じた  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
10. このシステムを使い始める前に多くのことを学ぶ必要があった  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)



### System Usability Scale (CG 手法)

文責：柳原 直貴

1. このシステムをしばしば使いたいと思う  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
2. このシステムは不必要なほど複雑であると感じた  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
3. このシステムは容易に使えると思った  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
4. このシステムを使うのに技術専門家のサポートが必要とするかもしれない  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
5. このシステムにあるさまざまな機能がよくまとまっていると感じた  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
6. このシステムでは、一貫性のないところが多くあったとおもった  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
7. たいいていのユーザは、このシステムの仕様方法について、素早く学べるだろう  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
8. このシステムはとても扱いにくいと思った  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
9. このシステムを使うのに自信があると感じた  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)
10. このシステムを使い始める前に多くのことを学ぶ必要があった  
(そう思う) 5・4・3・2・1 (まったく思わない)

事後アンケート

文責：柳原 直貴

1. どの手法を最も使いたいと思われましたか？

- ・PR 手法：平面キーボード + レイキャスト入力
- ・CR 手法：カーブキーボード + レイキャスト入力
- ・PG 手法：平面キーボード + ジェスチャ入力
- ・CG 手法：カーブキーボード + ジェスチャ入力

理由：

2. レイキャスト入力ではどちらの方が使いやすいと思われましたか？

平面キーボード / カーブキーボード

理由：

3. ジェスチャ入力ではどちらの方が使いやすいと思われましたか？

平面キーボード / カーブキーボード

理由：

4. 感想およびコメントをご記入お願いします。

実験は以上です，ご協力ありがとうございました。