

VR 環境のためのキーのグループ化および フリックを用いた QWERTY キーボード

2024 年 3 月

202010423

折居 篤

筑波大学 情報学群
知識情報・図書館学類

VR 環境のためのキーのグループ化および フリックを用いた QWERTY キーボード

折居 篤

近年、Head-Mounted Display（以降、HMD）を用いた VR システムが普及している。HMD とは、ユーザの視界を物理的に遮断し、仮想的な映像をユーザに提供するデバイスである。HMD を頭部に装着することにより、ユーザは仮想的な映像を見ることができる。HMD を通じて提供される VR 環境には、パスワードを入力する場面、および VRChat のようなソーシャルアプリケーションにおいてチャットを行う場面など、文字入力が必要とする場面がある。

VR 空間における文字入力には、仮想キーボードが主に用いられる。仮想キーボードとは、仮想空間上に表示される実世界のキーボードの形状を模したオブジェクトである。仮想キーボードの文字を選択することにより、ユーザは入力する文字を決定する。文字の選択には、コントローラから伸びる光の線（以降、レイ）を用いることにより、仮想キーボード上のキーをポインティングし、かつトリガを引くことによってそのキーを選択する手法が一般的である。しかし、現実の物理的なキーボードを用いた文字入力と比較して、VR 環境における文字入力は、入力性能およびユーザの満足度が劣る。その理由の 1 つとしてキー選択が難しいという課題が挙げられる。VR 環境においては、仮想キーボード上に配置されている各キーが小さく、かつ密集している。ユーザはこれらのキーの中から入力したいキーを、コントローラから伸びるレイを用いて選択する必要がある。

この課題を解決するため、キーがグループ化され、かつフリックを用いてグループ内のキー選択が行われる仮想キーボードを用いた文字入力手法を設計した。これにより、キーの判定が大きくなるため、レイを用いたポインティングを行いやすくなる。比較実験においては、仮想キーボード上のキーを 3 つのグループに分割した Around 手法、仮想キーボード上のキーを 5 つのグループに分割した Hexagonal 手法、および仮想キーボード上のキーを 9 つのグループに分割したレイアウトの異なる Horizontal 手法ならびに Vertical 手法を実装した。実験の結果、Around 手法のエラー率が他のキーのグループ化手法と比べて有意に高かったため、フリックする方向が多いことがエラー率に悪い影響を及ぼすことがわかった。さらに、キーのグループのポインティングおよびフリックする方向の分析を行った。その結果、Horizontal 手法は、Around 手法および Hexagonal 手法と比較してポインティングのエラー率が有意に高かった。また Around 手法は、Horizontal 手法および Vertical 手法と比べて有意にフリックのエラー率が高かった。この結果は、キーのグループのサイズがポインティングのエラー率に、フリックする方向の数がフリック方向のエラー率に影響を及ぼす可能性を示す。

（指導教員 金 宣経）

目次

第 1 章	序章	1
1.1	背景	1
1.2	VR 環境における文字入力	1
1.3	文字入力の課題	2
1.4	目的とアプローチ	3
1.5	貢献	3
1.6	本論文の構成	3
第 2 章	関連研究	5
2.1	VR 環境における文字入力	5
2.2	キーのグループ化を行った文字入力	6
2.3	フリックを用いた文字入力	6
第 3 章	キーのグループ化およびフリックを用いた文字入力手法	8
3.1	使用手順	8
3.2	実装	9
3.3	本手法の動作環境	10
第 4 章	キーのグループ化の手法が異なる QWERTY キーボード間における比較 実験	11
4.1	設計	11
4.2	手法	11
4.2.1	Around 手法	12
4.2.2	Hexagonal 手法	13
4.2.3	Horizontal 手法	13
4.2.4	Vertical 手法	14
4.3	評価指標	15

4.4	実験参加者および実験環境	16
4.5	セッション	17
4.6	実験結果	17
4.6.1	WPM	17
4.6.2	TER	18
4.6.3	NASA-TLX スコア	19
4.6.4	SUS スコア	20
4.6.5	キーのグループ化の手法の順位づけ	21
4.7	考察	22
4.7.1	文字入力性能	22
4.7.2	主観的評価	23
第 5 章	入力間違いに対する分析	24
5.1	分析する文字の抽出	24
5.1.1	入力間違いに対する分析の評価基準	24
5.1.2	PER	25
5.1.3	FER	26
5.1.4	考察	27
第 6 章	議論および今後の課題	28
6.1	追加実験	28
6.2	システムの改善	29
6.3	コントローラを用いた文字入力以外における活用方法	29
第 7 章	結論	30
参考文献		i
付録 A: 入力したい文字と入力された文字についての混同行列		v

目次

1.1	a)VRChat において用いられる仮想キーボード. b)YouTube において用いられる仮想キーボード.	2
3.1	周囲が青くハイライトされているキーグループ.	9
3.2	Meta Quest 2 付属コントローラ.	10
3.3	本手法の動作環境.	10
4.1	Around 手法の仮想キーボード. a)Around 手法のレイアウト. b) キーグループにおけるフリックする方向, およびキーの組み合わせ.	12
4.2	Hexagonal 手法の仮想キーボード. a)Hexagonal 手法のレイアウト. b) キーグループにおけるフリックする方向, およびキーの組み合わせ. . .	13
4.3	Horizontal 手法の仮想キーボード. a)Horizontal 手法のレイアウト. b) キーグループにおけるフリックする方向, およびキーの組み合わせ. . .	14
4.4	Vertical 手法の仮想キーボード. a)Vertical 手法のレイアウト. b) キーグループにおけるフリックする方向, およびキーの組み合わせ.	15
4.5	キーのグループ化の手法ごとの SUS スコア.	18
4.6	キーのグループ化の手法ごとの <i>TER</i>	19
4.7	キーのグループ化の手法ごとの NASA-TLX スコア.	20
4.8	キーのグループ化の手法ごとの SUS スコア.	21
4.9	キーのグループ化の手法の順位づけ.	21
5.1	キーのグループ化の手法ごとの <i>PER</i>	26
5.2	キーのグループ化の手法ごとの FlickintingErrorRate.	27
7.1	Around 手法の入力したい文字と入力された文字についての混同行列. .	vi
7.2	Hexagonal 手法の入力したい文字と入力された文字についての混同行列.	vii
7.3	Horizontal 手法の入力したい文字と入力された文字についての混同行列.	viii

7.4	Veritical 手法の入力したい文字と入力された文字についての混同行列. . .	ix
-----	--	----

表目次

4.1	ユーザごとのキーのグループ化の手法の順位づけ	22
-----	----------------------------------	----

第 1 章

序章

本章においては，本研究の背景，本研究の目的とアプローチ，本論文の貢献，および本論文の構成を述べる．

1.1 背景

近年，Head-Mounted Display（以降，HMD）を用いた VR システムが普及している．HMD とは，ユーザの視界を物理的に遮断し，仮想的な映像をユーザに提供するデバイスである [7, 10, 23]．HMD を頭部に装着することにより，ユーザは HMD を通じて表示される仮想的な映像を見ることができる．

HMD を通じて提供される VR 環境には，例として，パスワードを入力する場面，および VRChat [26] のようなソーシャルアプリケーションにおいてチャットを行う場面など，文字入力を必要とする場面がある．しかし，物理的なキーボードを用いた文字入力と比べて VR 環境下における文字入力は，文字入力性能およびユーザの満足度が劣る [5]．

1.2 VR 環境における文字入力

VR 空間における文字入力には，主に仮想キーボードが用いられる [7, 10, 23]．仮想キーボードとは，仮想空間上に表示される実世界のキーボードの形状を模したオブジェクトである (図 1.1)．



図1.1 a)VRChat において用いられる仮想キーボード． b)YouTube において用いられる仮想キーボード．

仮想キーボードの文字を選択することにより，ユーザは入力する文字を決定する．文字の選択には，コントローラを用いる手法，およびユーザ自身の手を用いる手法 [25] がある．前者の手法においては，コントローラから伸びる光の線（以降，レイ）を用いて，仮想キーボード上のキーをポインティングし，かつトリガを引くことによってそのキーを選択する手法が一般的である．後者の手法においては，まず，HMD に搭載されているハンドトラッキング機能を用いてユーザの手を認識する．これにより，仮想的なユーザの手を仮想空間内に描画する．その後，ユーザはその描画された手を仮想キーボード上のキーに接触させることにより文字入力を行う．

1.3 文字入力の課題

現実の物理的なキーボードを用いた文字入力と比較して，VR 環境における文字入力は，入力性能およびユーザの満足度が劣る [5]．その理由の 1 つとしてキー選択が難しいという課題が挙げられる．その理由の 1 つとしてキー選択が難しいという課題が挙げられる．VR 環境においては仮想キーボード上に配置されている 1 つ 1 つのキーが小さく，キーが密集している．ユーザはこれらのキーから入力したいキーをコントローラから伸びるレイ，もしくは仮想的な手を用いて選択しなくてはならない．

コントローラから伸びるレイを用いて，密集したキーから入力したいキーを選択することは，離れた位置からのレーザーポインタによるポインティングと類似している．そのようなタスクが難しいことは Regis ら [14] が明らかにしている．

仮想的な手を用いたキーの選択も難しい．その理由は，密集されたキーの中から，仮想的な指を入力したいキーと接触させる必要があるため入力は難しい．特に，現在一般的に普及している HMD に搭載されているハンドトラッキングの精度の限界から，ユーザの指の位置のズレおよび指の動作の遅延が生じる．そのため，ユーザは，仮想キーボードのタ

ップに違和感を感じたり、誤ったキーを選択してしまうことがしばしば起こる [11].

1.4 目的とアプローチ

本手法の目的は、VR 環境における仮想キーボードを用いた文字入力のエラー率を下げつつ、文字入力速度を維持することである。そこで、仮想キーボード上のキーをグループ化し、判定を大きくすることによってレイを用いたポインティングを行いやすくし、かつフリックを用いてグループ内のキー選択を行えるようにする。また、本研究においては、仮想キーボード上のキーを3つのグループに分割した Around 手法、仮想キーボード上のキーは5つのグループに分割した Hexagonal 手法、および仮想キーボード上のキーは9つのグループに分割したレイアウトの異なる Horizontal 手法ならびに Vertical 手法を実装した。さらに、これらの手法の文字入力性能を比較し、適切なキーのグループ化の手法を検討した。また、レイを用いたポインティングおよびフリックする方向について分析することにより、本手法の改良について考察する。

1.5 貢献

本研究の貢献を以下に示す。

- VR 環境のためのキーのグループ化およびフリックを用いた QWERTY キーボードを実装した。
- キーのグループ化の手法の異なる4種類の QWERTY キーボードに実装し、かつその性能を比較調査した。
- 本手法を用いたときに生じた文字の入力間違い、およびその発生理由を分析・考察した。

1.6 本論文の構成

第1章において、本研究の背景、本研究の目的、および本研究の貢献を述べた。第2章において、本研究と関連する研究に対する本研究の位置づけを述べる。第3章においては、本研究にて使用するアプリケーションの実装方法および仕様を述べる。第4章においては、キーのグループ化の手法を変えた複数種類の QWERTY キーボードの比較実験として実施した文字入力実験について、その内容、実験結果、および考察を述べる。第5章においては、本手法を用いた実験参加者の文字入力の特徴の分析、および考察を述べる。第6章においては本手法の議論、今後の課題、および展望を述べる。第7章においては本研

究の結論を述べる.

第 2 章

関連研究

本手法では VR 環境における本手法では VR 環境における仮想キーボード上のキーをグループ化し、かつフリックを用いてグループ内のキー選択を行う手法を提案した。したがって、我々は、本章において、VR 環境における文字入力の研究、キーのグループ化を行った文字入力の研究、およびフリックを用いた文字入力の研究を示す。これにより、本手法との位置付けを述べる。

2.1 VR 環境における文字入力

VR 環境において一般的に用いられる文字入力手法は、コントローラから伸びるレイを用いて仮想キーボード上のキーを指し、かつトリガを引くことによりキーを選択する手法（以降、従来手法）である。Speicher ら [25] は従来手法などの文字入力手法について、入力速度、エラー率、作業負荷、およびユーザの好みを調査するための比較実験を行った。その結果、全ての指標において、従来手法が、指を用いた文字入力手法、およびコントローラ上のトラックパッドを利用した文字入力手法などのような他の文字入力手法より良い評価を得ることを明らかにした。

また、VR 環境において、物理的なキーボードを用いた研究が行われている [12, 17, 20, 21]。これらの手法では、コントローラから伸びるレイを用いた文字入力手法よりも文字入力の速度が速い。一方、ユーザの手を認識するために高性能なトラッキング機能、およびキーボードの精巧なモデルを用意する必要がある。そのため、一般に普及させることが難しい。

VR 環境におけるジェスチャを用いた文字入力の研究も行われている [3, 6, 18]。これらの手法を習熟することにより、一般的な仮想キーボードを用いた文字入力より速く文字入力を行うことができる可能性がある。一方、入力する単語を予測することが前提となっているため、パスワードのようなデータに存在しない単語の入力が難しい。

コントローラを用いた手法の中にもいくつかの手法が提案されている [15, 22, 27]. これらの手法では、キーボードのレイアウトが異なる. Leng ら [15] の手法は、キーのレイアウトを放射線状に変化させることにより、方向と距離によって入力する文字を決定する. Nguyen ら [22] らの手法は、コントローラに取り付けられた円形のパッドを用いることにより、円形に再配置された仮想キーボード上のキーを選択する. Yanagihara ら [27] の手法は、キーボード上のキーを $3 \times 3 \times 3$ に配列することにより、コントローラの動きによって文字入力を可能にする.

本手法では、キーボードのレイアウトを変化させないことにより、ユーザがキーの位置を把握しやすくした. その上で、キーのグループ化およびフリックを用いた文字入力手法を開発し、実装した.

2.2 キーのグループ化を行った文字入力

キーをグループ化することにより入力を行いやすくする研究もいくつか行われている. SplitBoard [9] では、スマートウォッチ上に QWERTY 配列キーボードの一部を表示し、かつスワイプによって表示する部分を切り替える. SwipeBoard [4] はキーをグループ化し、かつ左右へのフリックによってキーを選択する. これらの手法では、スマートウォッチの小さな画面において、正確にキーボード上のキーをタップするためのアプローチとして、キーのグループ化を行なっている. 1line keyboard [16] はタブレット端末上のソフトウェアキーボードを用いることにより、タイピング時に使用する指ごとにキーボードのキーをグループ化し、かつキーボードを 8 つのキーのみによって構成する手法の評価を行った.

本研究では、我々は、これらの研究のようなグループ化を、VR 環境における文字入力に適応した場合の文字入力性能を調査する.

2.3 フリックを用いた文字入力

スマートフォンおよびタブレット端末などのタッチパネルを備えた機器において、フリック入力を用いられる. フリック入力とは、タッチパネルを指によって押圧したのち、弾くように動かす操作方法である. この文字入力手法は主に日本語文字入力において用いられており、指による押圧によって子音を選択し、弾くように動かす動作によって母音を選択している.

フリックを用いた文字入力は VR 環境の文字入力に応用されることがある. しかし、スマートフォンおよびタブレットとは異なり、VR 環境においては、指が文字入力を行ったに触覚フィードバックを受けない. そのため、ユーザは自身の指が仮想キーボードに触れ

ているのかを認識しにくい。そこで、VR 環境においてフリック入力をしやすくするためにいくつかの研究がされている。大石ら [31] は、VR フリック入力手法において指先をキーから離す動作を、親指を伸ばす動作によって代替したかな文字入力手法を提案した。また、小澤ら [30] は、VR フリック入力手法において指先をキーに触れさせる動作を、指をつまむ動作によって代替した文字入力手法を提案した。竹永ら [32] は、VR フリック入力手法をコントローラから伸びるレイおよびトリガを用いることで実装した。

これらの研究はすべてかな文字入力を対象としている。一方、QWERTY 配列のキーボードに対して、フリックを用いて文字入力を行った研究はあまり行われていない。TapStr [24] はスマートフォン上の QWERTY 配列のソフトウェアキーボードを 3 つのグループに分割することにより、フリックを用いた文字入力を可能にした。しかし、グループに分割したことが文字入力にどのような影響を及ぼしたのか、およびフリックする方向に関する特徴などの分析は行なっていない。

本研究では、フリック入力を QWERTY 配列のキーボードに適応するとともに、複数のフリックの方向、およびグループ化の方法の横断的な調査を行う。

第3章

キーのグループ化およびフリックを用いた文字入力手法

本章では、本手法におけるキーのグループ化およびフリックを用いた文字入力手法およびその実装を述べる。

3.1 使用手順

本手法においてユーザは、複数のキーがグループ化されたターゲット（以降、キーグループ）をポインティングしたのち、フリックをすることによって文字入力を行う。文字入力の手順を以下に示す。

1. コントローラから伸びるレイを用いて、仮想キーボード上のキーグループを指す。
2. コントローラのトリガを引くことによってキーグループを選択する。
3. グループ内の選択したいキーの位置に応じて以下の操作をする。
 - (a) 選択したいキーが中心にある場合、トリガを離す。
 - (b) 選択したいキーが中心にない場合、そのキーがある方向にコントローラをフリックする。

ユーザがレイを用いてキーグループを指した時、キーグループの周囲が青くハイライトされる (図 3.1)。ハイライトの目的は、レイがどこを指しているのかを視覚フィードバックによって認識しやすくすることにより、文字入力の性能を向上させ、かつユーザの疲労を軽減することである [28]。



図3.1 周囲が青くハイライトされているキーグループ。

また、レイを用いてキーグループを指しトリガを引いた時、選択されたキーグループ以外のキーグループは非表示になる。これは、ユーザが選択されたキーグループを認識しやすくすること、およびフリックの方向を把握しやすくすることを目的としている。

また、ユーザが文字を入力すると、小さな音声流れる。これにより、ユーザは音声のフィードバックを受けることができる。

3.2 実装

実験アプリケーションの実装には、Unity を使用した。実験アプリケーション内にはテキスト表示フィールド、入力フィールド、スタートボタン、および仮想キーボードが表示されている。仮想キーボードおよびテキスト表示フィールドは、ユーザの足元を高さ 0 m とした時に、高さ 1.3 m–1.65 m、およびユーザからの水平方向の距離は 0.7 m の位置に配置された。

HMD には Meta Quest 2 を、コントローラには Meta Quest 2 付属のコントローラを用いた。

Meta Quest 2 付属のコントローラには、2 種類のボタン、2 種類のトリガおよびジョイスティックが搭載されている (図 3.2)。本研究では、人差し指トリガを用いることによりポインティングしたターゲットを選択する。また、文字入力においては、コントローラを持つユーザの手前にあるボタンを用いて文字の削除を行い、かつコントローラの奥にあるボタンを用いて次の文章を表示する。

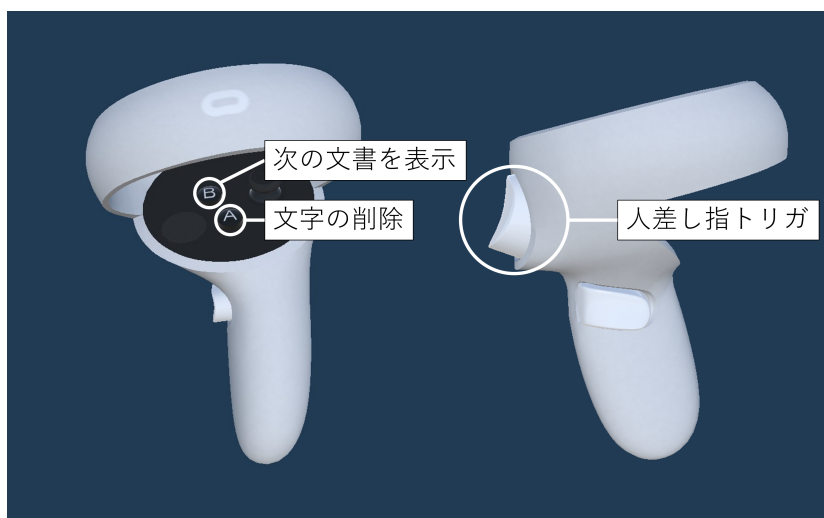


図3.2 Meta Quest 2 付属コントローラ.

実験におけるフレーズセットには, MacKenzie ら [19] の提供した英文のフレーズセットを用いた. このフレーズセットは 500 種類の英文のフレーズで構成されている. フレーズ内の単語と単語の間は空白文字にて区切られており, 句読点および数字を含まない. また, 本手法は小文字しか入力できないため, 大文字を小文字に変換した. 学習効果を抑えるために, 入力するフレーズは重複しないようにした.

3.3 本手法の動作環境

動作環境を以下の図 3.3 に示す. 実験環境は, テキスト表示フィールド, 入力フィールド, スタートボタン, および仮想キーボードによって構成されている.

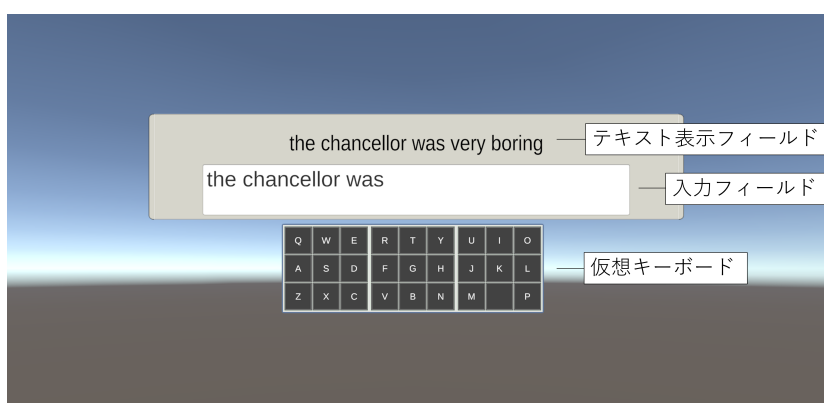


図3.3 本手法の動作環境.

第 4 章

キーのグループ化の手法が異なる QWERTY キーボード間における比 較実験

本章では、キーのグループ化の手法が異なる QWERTY キーボード間について、どのようなキーのグループ化の手法が適切であるかを分析するための実験を行った。

4.1 設計

本章にて行う比較実験の目的は、本研究において実装したキーのグループ化およびフリックを用いた文字入力手法について、キーのグループ化の手法が入力性能に影響するかを調査することである。そのため、実験ではキーグループが大きい手法、およびキーグループが小さい手法を実装し、文字入力性能および主観的評価について比較を行う。前者はレイを用いてポインティングをしやすいが、フリックする方向が多く、正確なフリックが難しい。後者はキーグループが小さくレイを用いてポインティングしづらいが、フリックする方向が少なく、正確なフリックが容易である。また、これらの手法を比較することにより、本実験ではポインティングのしやすさおよびフリックのしやすさが文字入力にどのような影響を及ぼすのか調査する。

4.2 手法

本節では実装した 4 種類のキーのグループ化の手法について説明する。仮想キーボード上のキーを 3 つのグループに分割した手法が、Around 手法である。仮想キーボード上のキーを 5 つのグループに分割した手法が、Hexagonal 手法である。仮想キーボード上のキー

を9つのグループに分割した手法のうち、キーグループが横長であるものが、Horizontal 手法である。それに対してキーグループが縦長であるものが Vertical 手法である。全てのキーボードはレイアウトを統一しているが、Hexagonal 手法のみ、キーのグループ化において余分なキーが発生したため、文字を入力できないキーを仮想キーボードに追加した。また、キーボードの P の位置およびスペースの位置をグループ化のために移動した。

4.2.1 Around 手法

Around 手法において、仮想キーボード上のキーは3つのグループに分割される。1つのグループには 3×3 のキーが配置されている。ユーザが中心のキーを入力したい場合は、レイをキーグループの判定から出さずにトリガを離す。ユーザが中心のキー以外を選択したい場合は、トリガを離さずにそのキーが存在する方向にレイをフリックすることにより、キーを選択する。フリックする方向と、キーの組み合わせを図に示す(図4.1)。

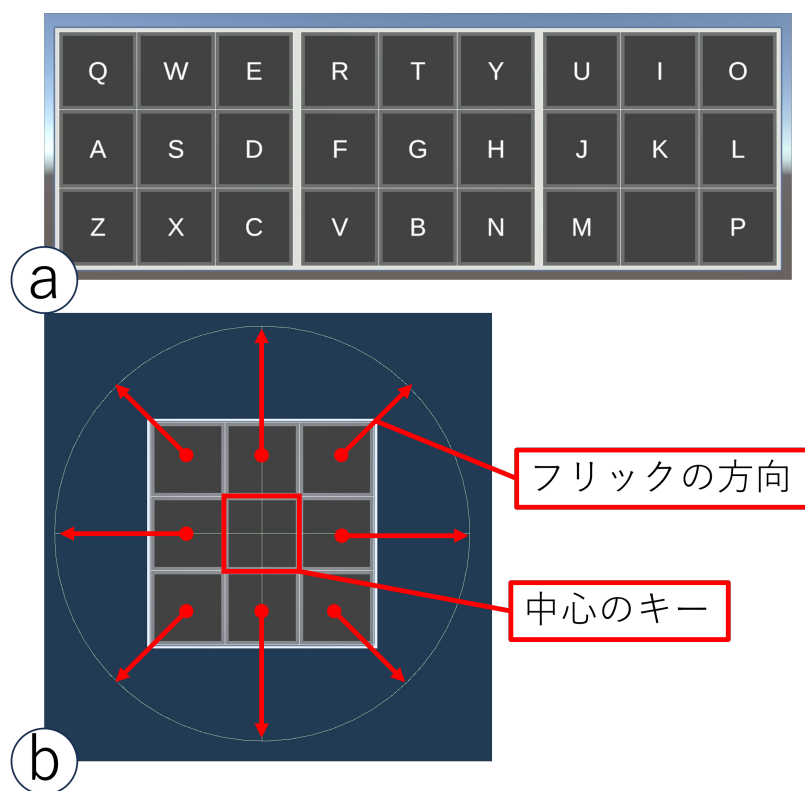


図4.1 Around 手法の仮想キーボード. a)Around 手法のレイアウト. b) キーグループにおけるフリックする方向, およびキーの組み合わせ.

4.2.2 Hexagonal 手法

Hexagonal 手法において、仮想キーボード上のキーは5つのグループに分割される。1つのグループには 2×3 のキーが配置されている。ユーザがキーを選択したい場合は、トリガを離さずにそのキーが存在する方向にレイをフリックすることによりキーが選択できる。フリックする方向と、キーの組み合わせを図に示す(図4.2)。

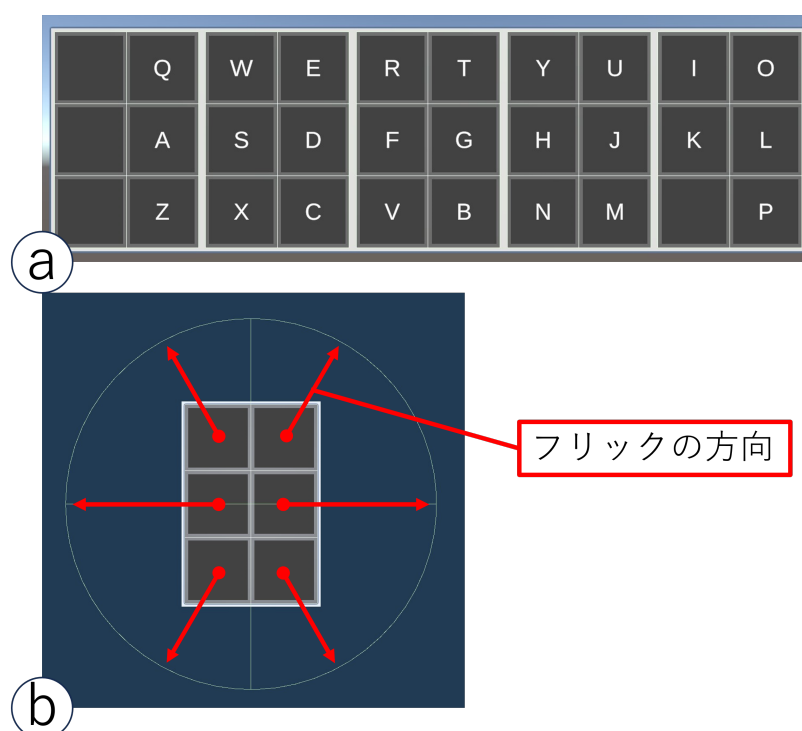


図4.2 Hexagonal 手法の仮想キーボード. a)Hexagonal 手法のレイアウト. b) キーグループにおけるフリックする方向, およびキーの組み合わせ.

4.2.3 Horizontal 手法

Horizontal 手法において、仮想キーボード上のキーは9つのグループに分割される。1つのグループには 3×1 のキーが配置されている。ユーザがキーを選択したい場合は、トリガを離さずにそのキーが存在する方向にレイをフリックすることによりキーが選択できる。フリックする方向と、キーの組み合わせを図に示す(図4.3)。

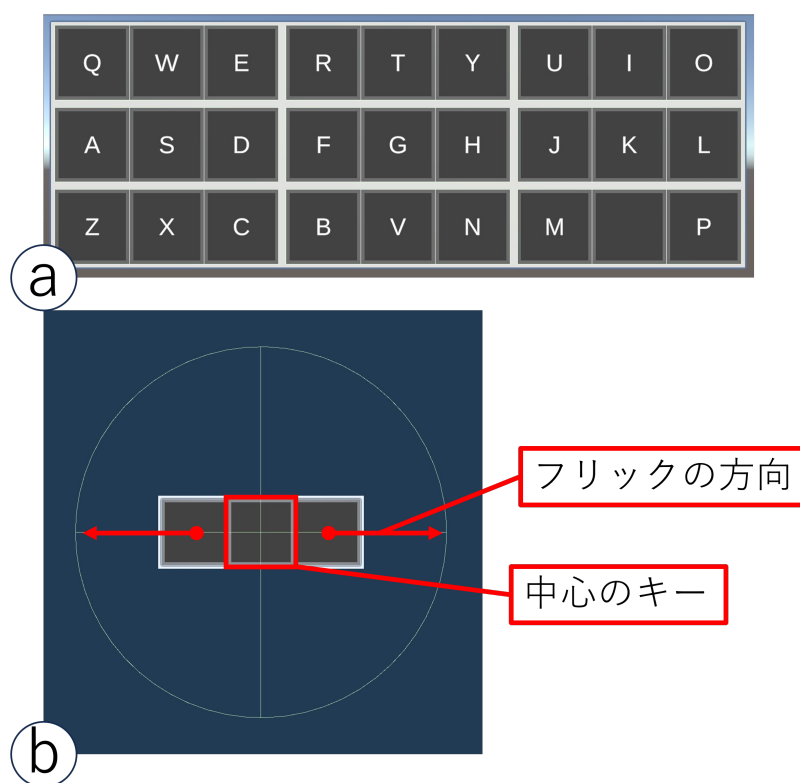


図4.3 Horizontal 手法の仮想キーボード. a)Horizontal 手法のレイアウト. b) キーグループにおけるフリックする方向, およびキーの組み合わせ.

4.2.4 Vertical 手法

Vertical 手法において, 仮想キーボード上のキーは9つのグループに分割される. 1つのグループには 1×3 のキーが配置されている. ユーザがキーを選択したい場合は, トリガを離さずにそのキーが存在する方向にレイをフリックすることによりキーが選択できる. フリックする方向と, キーの組み合わせを図に示す (図 4.4).

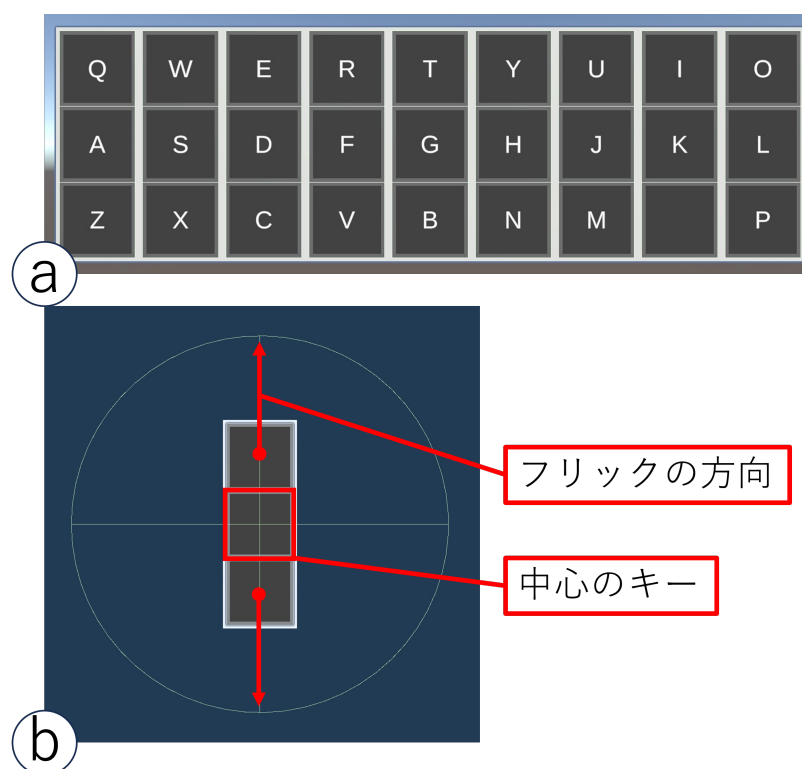


図4.4 Vertical 手法の仮想キーボード. a)Vertical 手法のレイアウト. b) キーグループにおけるフリックする方向, およびキーの組み合わせ.

4.3 評価指標

文字入力性能の評価に用いる指標には, 文字入力速度を測定するための指標である Words Per Minute(以下, *WPM*), および Total Error Rate (以下, *TER*) [1] を用いた.

WPM は, 式 4.1のとおりに定義される. 式中における T は最終的に入力された合計の文字数 (スペースを含む), S は 1 文字目が入力されてから最後の単語が入力されるまでの時間 (秒) である. なお, 英単語において, 1 単語はスペース, 数字, および他の印字可能文字も含めて平均 5 文字であるため, 合計の文字数を時間で割ったものに 5 分の 1 を掛ける. これを 1 フレーズずつ計測し, 全フレーズの *WPM* の平均を算出する.

$$WPM = \frac{|T| - 1}{S} \times 60 \times \frac{1}{5} \quad (4.1)$$

TER は, 式 4.2のとおりに定義される. 式中における INF は最終的に入力された文字のうち, 修正されなかった文字数である. IF は入力文字の中における, 入力を誤ったため, 修正された文字の数である. C は最終的に入力された文字のうち, 正しい文字の数である.

これを1フレーズずつ計測し、全フレーズの TER の平均を算出する。

$$TER = \frac{INF + IF}{C + INF + IF} \times 100\% \quad (4.2)$$

また実験参加者に対してアンケートを実施し、定性的なデータを取得した。ユーザの主観的な作業負荷を計測するために NASA Task Load Index (以降, NASA-TLX) [8] アンケートを行った。同アンケートでは、精神的負荷、身体的負荷、時間的負荷、努力、パフォーマンスおよびフラストレーションの6項目から各手法に対する作業負荷を評価する。これらの合計を NASA-TLX スコアとして記録する。このスコアが高いほど作業負荷が大きいことを示す。

また各手法に対するユーザビリティを評価するために System Usability Scale (以降, SUS) [2] と呼ばれるアンケートを行った。同アンケートでは10項目からなる質問により構成され、各手法のユーザビリティを0-100のスケールによって評価する。このスコアが高いほどユーザビリティが良いことを示す。

また実験後に、キーのグループ化の手法についての順位付け、視写中に意識した点、実験全体に対する意見などに関する半構造化インタビューを行った。

4.4 実験参加者および実験環境

実験参加者は、著者と同じ研究室に所属している22から24歳 ($M = 22.75, SD = 0.83$) の大学生および大学院生8名である。実験参加者は1人が左利きであり、他は右利きであった。また、実験参加者は全て男性だった。

HMD およびコントローラには Meta Quest 2 と付属のコントローラを用いた。実験参加者は HMD を装着し、椅子に座った状態において視写を行った。実験アプリケーションは Unity を用いて実装された。

実験参加者は、まず実験全体についての説明を受ける。その後4つのキーのグループ化の手法を実装したそれぞれについて以下の手順を繰り返す。

1. 実験において用いるキーのグループ化の手法について説明を受ける。
2. 練習セッションとして、5文の英文を視写する。
3. 5分間の休憩を取る。
4. 本番セッションとして15文の英文を視写する。
5. NASA-TLX, SUS に回答する。

4つのグループ化レイアウトそれぞれについての実験が終わったのち、ユーザにキーのグループ化の手法の順位付け、文字入力中に意識した点、実験全体に対する意見などに関する

半構造化インタビューを行った。

ユーザが視写を行う時は「できる限り速く正確に」文字を入力するよう指示した。

4.5 セッション

ユーザはスタートボタンにレイを当ててトリガを引くことによって実験を開始する。ユーザが実験を開始すると、テキスト表示フィールドにフレーズセットからランダムに選ばれた1文が表示される。ユーザが仮想キーボードを用いてテキスト入力フィールドに文字入力を行ったのち、コントローラの奥にあるボタンを押すと、テキスト表示フィールドに新たな一文が表示され、かつテキスト入力フィールドがリセットされる。ユーザがあらかじめ設定された数の文章の入力を終わると、テキスト表示フィールドに「Finish」という文字が表示され実験は終了する。

4.6 実験結果

実験によって明らかになった各手法の *WPM*, *TER*, *SUS* スコア, および *NASA-TLX* スコアを示し, また, 統計解析を行った結果を示す。なお, 統計解析において有意水準は 0.05 とした。

4.6.1 *WPM*

WPM の平均および分析の結果を図 4.5 に示す。 *WPM* の平均は, Around 手法が 9.490 ($SD = 1.99$), Hexagonal 手法が 9.447 ($SD = 1.47$), Vertical 手法が 10.055 ($SD = 1.99$), Horizontal 手法が 10.079 ($SD = 2.03$) であった。対応のある一元配置分散分析を行った結果, これらの手法間には有意差が示されなかった ($p = 9.4 \times 10^{-2} > 0.05$)。

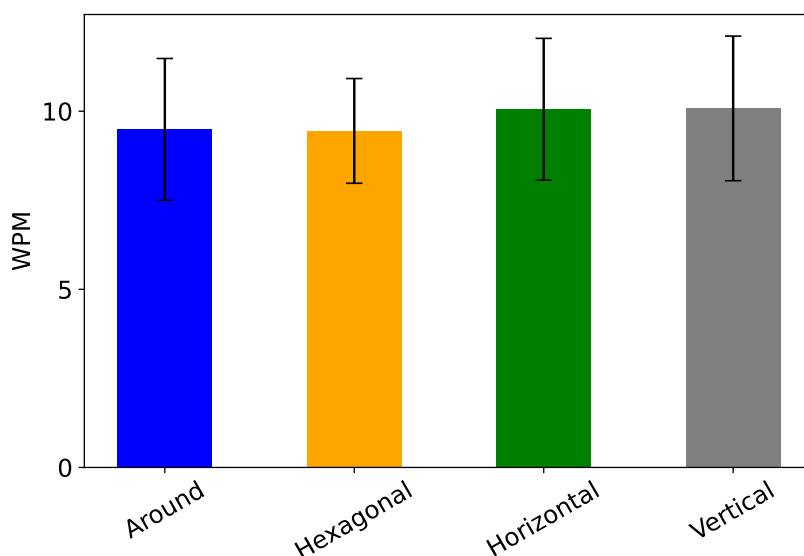


図4.5 キーのグループ化の手法ごとの SUS スコア.

4.6.2 TER

TER の平均および分析の結果を図 4.6に示す. *TER* の平均は Around 手法が 0.203 ($SD = 0.16$), Hexagonal 手法が 0.142 ($SD = 0.105$), Horizontal 手法が 0.137 ($SD = 0.128$), Vertical 手法が 0.155 ($SD = 0.174$) であった. 対応のある一元配置分散分析を行ったところ有意差が示された ($F = 5.199, p = 1.53 \times 10^{-3} < 0.05$). そこで正規性のある組み合わせに対応のある t 検定, 正規性のない組み合わせにウィルコクソンの符号付順位和検定を行ったところ, 有意差が示されたのは, Around 手法–Hexagonal 手法間 ($p = 6.16 \times 10^{-4} < 0.05$), Around 手法–Horizontal 手法間 ($p = 5.05 \times 10^{-4} < 0.05$), Around 手法–Vertical 手法間 ($p = 2.90 \times 10^{-3} < 0.05$) である.

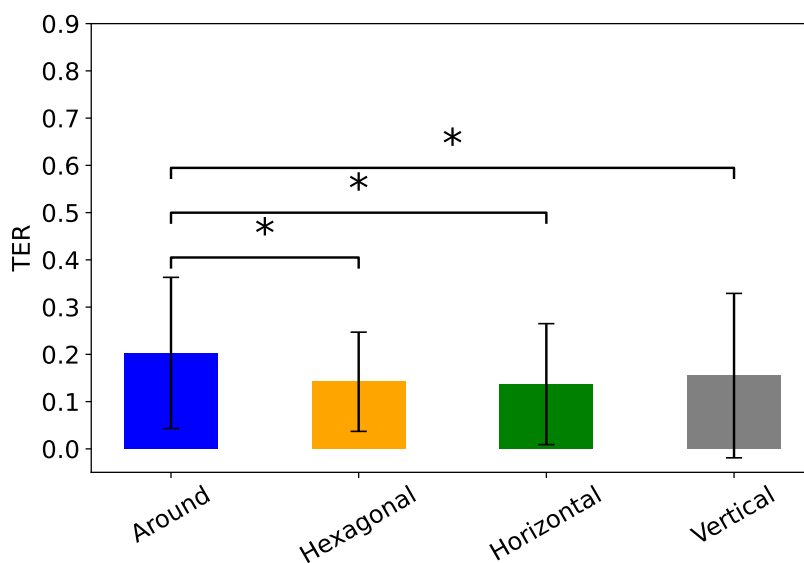


図4.6 キーのグループ化の手法ごとの TER.

4.6.3 NASA-TLX スコア

NASA-TLX スコアの平均および分析の結果を図 4.7に示す. 各キーのグループ化の手法それぞれに対して, NASA-TLX スコアの分析を行った. NASA-TLX スコアは高いほど作業負荷が大きい. 対応のある一元配置分散分析を行った結果, これらのキーのグループ化の手法ごとの NASA-TLX スコアには有意差が示されなかった ($p = 0.992 > 0.05$). SUS スコアの平均は, Around 手法が 61.08 ($SD = 20.93$), Hexagonal が 61.50 ($SD = 19.76$), Horizontal が 59.58 ($SD = 19.28$), Vertical が 58.88 ($SD = 19.09$) であった.

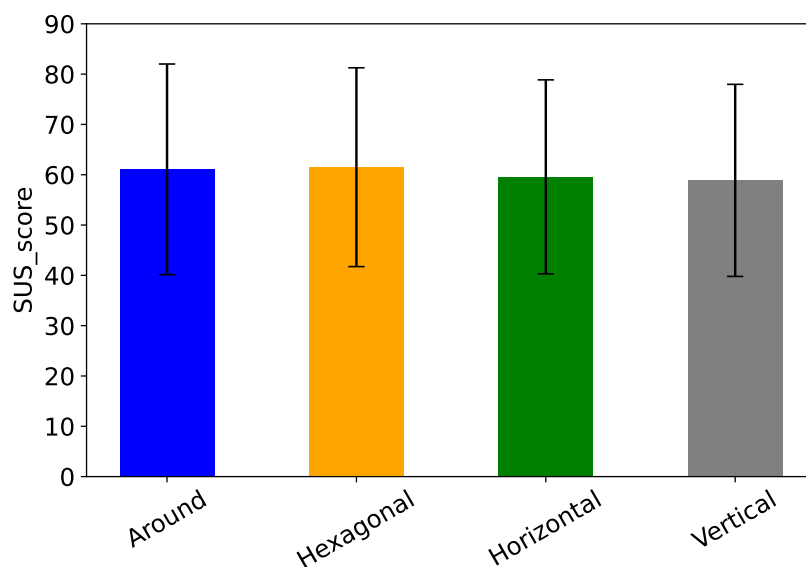


図4.7 キーのグループ化の手法ごとの NASA-TLX スコア.

4.6.4 SUS スコア

SUS スコアの平均および分析結果を図 4.8に示す. 各キーのグループ化の手法それぞれについて, SUS スコアの分析を行った. 対応のある一元配置分散分析を行った結果, これらのキーのグループ化の手法ごとの SUS スコアには有意差が示されなかった ($p = 0.922 > 0.05$). SUS スコアの平均は, Around 手法が 64.69 ($SD = 20.72$), Hexagonal が 61.56 ($SD = 23.18$), Horizontal が 69.06 ($SD = 24.09$), Vertical が 66.88 ($SD = 22.35$) であった.

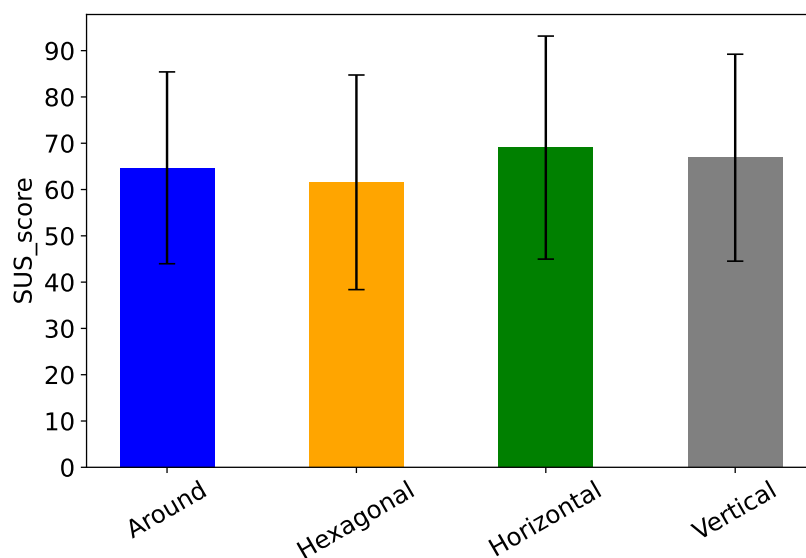


図4.8 キーのグループ化の手法ごとの SUS スコア.

4.6.5 キーのグループ化の手法の順位づけ

実験後に行ったインタビューにおいて、キーのグループ化の手法の順位づけを行ってもらった。その結果について、図 4.9にまとめる。色が濃いほど多くの参加者がその順位を選んだことを示す。また数字はその順位を選んだ参加者を示す。

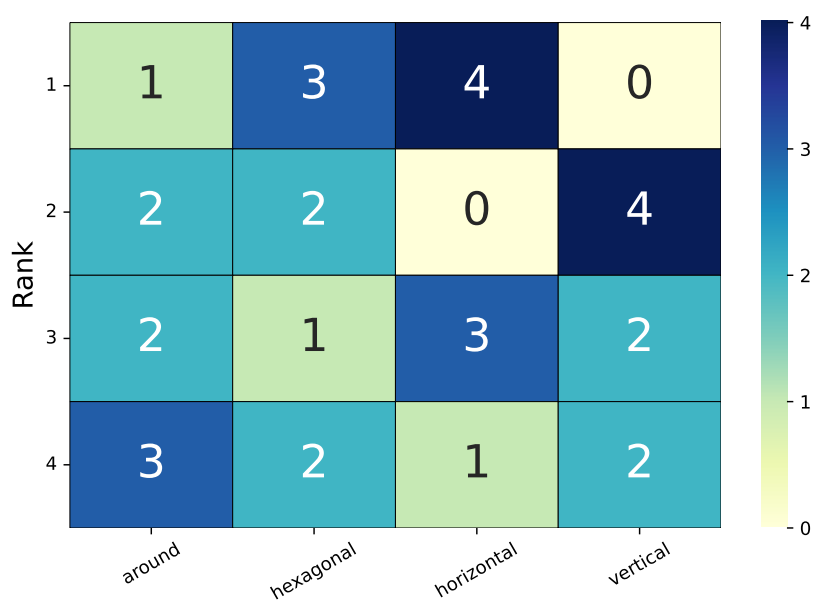


図4.9 キーのグループ化の手法の順位づけ.

また以下にユーザごとのキーのグループ化の手法の順位付けの表 4.1 を示す.

表4.1 ユーザごとのキーのグループ化の手法の順位づけ

ID	Rank 1	Rank 2	Rank 3	Rank 4
1	horizontal	vertical	around	hexagonal
2	horizontal	vertical	hexagonal	around
3	horizontal	vertical	around	hexagonal
4	around	hexagonal	horizontal	vertical
5	horizontal	hexagonal	vertical	around
6	hexagonal	vertical	horizontal	around
7	hexagonal	around	horizontal	vertical
8	hexagonal	around	vertical	horizontal

4.7 考察

本実験により得られた各手法ごとの *WPM* および *TER* の分析の結果から, 本手法の文字入力性能について考察する. また, 本実験により得られた *SUS* スコア, *NASA-TLX* スコア, およびアンケートの分析結果から, 本手法の主観的評価について考察する.

4.7.1 文字入力性能

文字入力性能の統計分析の結果, 有意な差が発生したのは *TER* のスコアのみであった. Around 手法は, フリックの方向が 8 方向あり, Hexagonal 手法の 6 方向および, Horizontal 手法, ならびに Vertical 手法の 2 方向と比べて多い. このことが, フリックの方向エラーを引き起こしたのではないかと考察する. また, 実験参加者 P5 も「方向が多い分フリックの精度が求められて難しかった」と報告している.

文字の入力間違いが発生した場合, 実験参加者は入力した文字を削除し, 正しい文字を入力するケースが多い [29]. 一方, Around 手法は *TER* が他の手法と比べて有意に高いのに関わらず, *WPM* は他の手法と比較して有意差がない. このことは, Around 手法のキーグループがポインティングに良い影響を及ぼしたためではないかと考察した.

Horizontal 手法および Vertical 手法はキーのグループ化の形が異なるため, フリックを行う方向が異なるが, フリックできる方向の数, およびキーグループのサイズは同一のものとなっている. この 2 つの手法間について, *WPM*, *TER* に有意な差はない. そのため, フリックを行う方向が 2 つの場合, フリックの方向が *WPM*, *TER* に影響を及ぼすと

は言えない。

4.7.2 主観的評価

SUS スコアおよび NASA-TLX スコアについてどの手法間においても、有意な差はなかった。これは特定のキーのグループ化の手法が際立ってユーザビリティが悪い、もしくは作業負荷が高いということはなかったことを示す。

キーのグループ化の手法の順位付けのヒートマップを見ても、いずれの手法においても高い順位および低い順位を満遍なく獲得している。順位づけの傾向として、キーグループが大きくフリックする方向が多い Around 手法および Hexagonal 手法という組み合わせ、ならびにキーグループが小さくフリックする方向が少ない Horizontal 手法および Vertical 手法という組み合わせが順位づけに多く登場した。P1, P2, P3 は Horizontal 手法および Vertical 手法を 1 位もしくは 2 位に、Around 手法および Hexagonal 手法を 3 位もしくは 4 位に順位づけした。一方、P4, P7, P8 は Around 手法および Hexagonal 手法を 1 位もしくは 2 位に、Horizontal 手法および Vertical 手法を 3 位もしくは 4 位に順位づけした。このことから、実験参加者が、キーグループが大きくフリックする方向が多い手法を好むのか、もしくはキーグループが小さくフリックする方向が少ない手法を好むのかに大きく分けられると考察される。

第 5 章

入力間違いに対する分析

実験参加者は表示された文章を見て、自身が入力すべき文字を把握し、仮想キーボードを用いて文字入力を行う。そこで本章では、実験参加者が入力しようとした文字と入力した文字の違いについて分析することにより、グループ化レイアウトごとの文字入力の特徴について分析する。

5.1 分析する文字の抽出

実験全体において 15675 字の文字が入力された。それらの文字が入力された際の、実験参加者が入力しようとした文字と入力された文字をセットとして分析を行う。そのため本章では、表示された文章を間違わずに視写できている状態において入力された文字の分析を行う。これにより、ユーザが今まで入力した文字、およびテキスト表示フィールドに表示された文字から、正確に入力したい文字を推測できる。そのような状態において入力された文字は、実験全体において 13894 文字であり、入力したい文字と入力された文字のセットを 13894 組作成した。

5.1.1 入力間違いに対する分析の評価基準

各手法ごとに、入力したい文字および入力された文字についての混同行列を作成した。各手法について付録に添付する。その結果、Around 手法は正確に入力できていない文字が一部の文字に集中しているのに対し、Horizontal 手法は正確に入力できていない文字がまばらであることを推察できた。この違いが、キーのグループ化の手法の違いによるものかを検証するため、先ほどの条件において得られたデータに対して、入力したい文字と入力した文字が一致しないとき、キーグループの選択を間違えたのか、あるいはフリック方向を間違えたのかを判別し、それらの間違いの発生率について分析する。

第一に、キーグループの選択エラー率を *PER*（以降、*PER*）と定義した。

PER は、式 5.1のとおりに定義する。式中における *PE* は入力した文字のうち、入力したい文字と入力した文字が一致せず、かつ入力した文字が入力したい文字と同じキーグループに属していない文字の数である。T は入力した文字の合計数である。これを特定の手法内での参加者ごとに計測し、その手法における参加者ごとの *PER* を算出する。

$$PER = \frac{PE}{T} \times 100\% \quad (5.1)$$

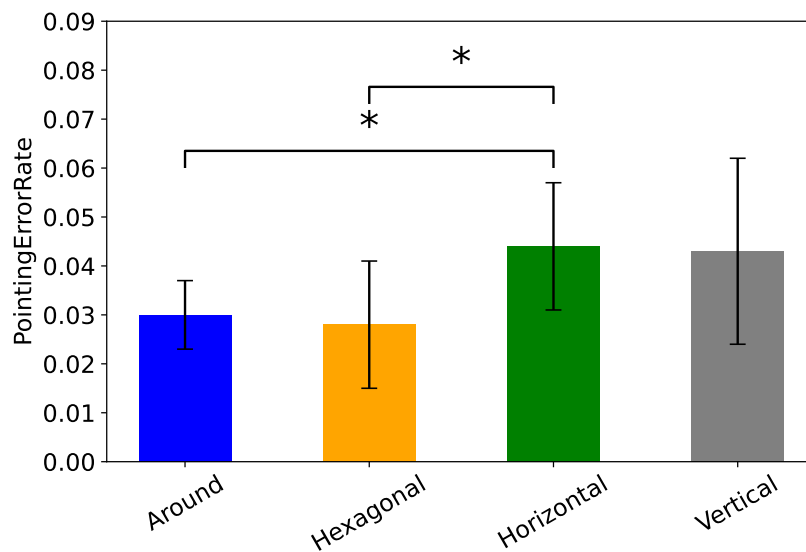
次に、フリック方向のエラー率を FlickingErrorRate（以降、*FER*）と定義した。

FER は、式 5.2のとおりに定義する。式中における *FE* は入力した文字のうち、入力したい文字と入力した文字が一致せず、かつ入力した文字が入力したい文字と同じキーグループに属する文字の数である。T は入力した文字の合計数である。これを特定の手法内での参加者ごとに計測し、その手法における参加者ごとの *FER* を算出する。

$$FER = \frac{FE}{T} \times 100\% \quad (5.2)$$

5.1.2 *PER*

PER の平均および分析結果を図 5.1に示す。*PER* の平均は、Around 手法が 0.030 (*SD* = 0.007), Hexagonal 手法が 0.028 (*SD* = 0.013), Horizontal 手法が 0.044 (*SD* = 0.013), Vertical 手法が 0.043 (*SD* = 0.019) であった。対応のある一元配置分散分析を行ったところ有意差が示された ($F = 3.15, p = 4.06 \times 10^{-2} < 0.05$)。そこで正規性のある組み合わせに対応のある t 検定、正規性のない組み合わせにウィルコクソンの符号付順位和検定を行ったところ Around 手法–Horizontal 手法間 ($p = 1.56 \times 10^{-2} < 0.05$) および Hexagonal 手法–Horizontal 手法間 ($p = 2.77 \times 10^{-2} < 0.05$) に有意差が示された。

図5.1 キーのグループ化の手法ごとの *PER*.

5.1.3 *FER*

FER の平均および分析結果を図 5.2に示す. *FER* の平均は, Around 手法が 0.087 ($SD = 0.030$), Hexagonal 手法が 0.060 ($SD = 0.028$), Vertical 手法が 0.045 ($SD = 0.014$), Horizontal 手法が 0.049 ($SD = 0.017$) であった. 対応のある一元配置分散分析を行ったところ有意差が示された ($F = 5.25, p = 5.30 \times 10^{-4} < 0.05$). そこで正規性のある組み合わせに対応のある t 検定, 正規性のない組み合わせにウィルコクソンの符号付順位和検定を行ったところ, Around 手法–Horizontal 手法間 ($p = 2.90 \times 10^{-3} < 0.05$) および Around 手法–Vertical 手法間 ($p = 8.20 \times 10^{-3} < 0.05$) に有意差が示された.

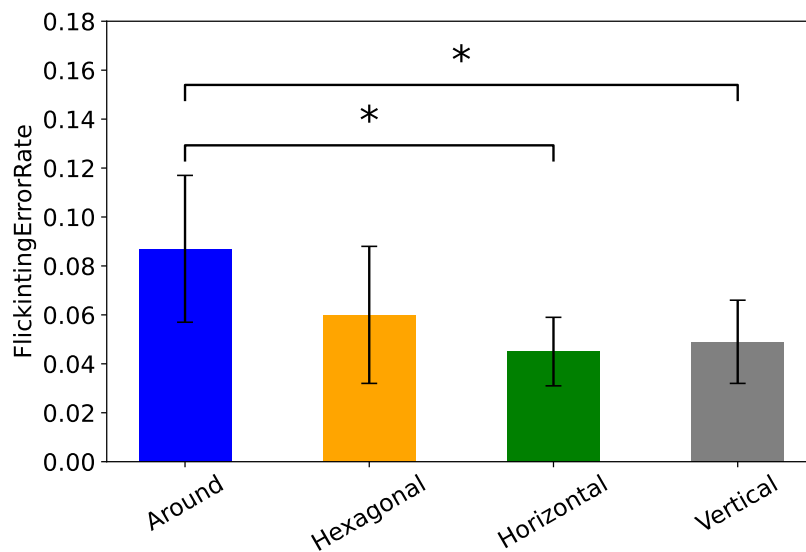


図5.2 キーのグループ化の手法ごとの FlickintingErrorRate.

5.1.4 考察

PER について Around 手法–Horizontal 手法間および Around 手法–vertical 手法間に有意差が示されたのは、1つのグループの大きさが異なることが要因であると考えらる。Around 手法–Horizontal 手法間および Around 手法–vertical 手法間のグループの大きさは3倍であり、グループの大きさはレイを用いた選択のエラー率に影響することがわかる。一方、Around 手法–Hexagonal 手法間には有意差がない。Around 手法–Hexagonal 手法間のグループの大きさは1.5倍であるが、これはレイを用いた選択のエラー率に影響しない可能性がある。そのため、どの程度のグループの大きさが、エラー率に影響するのかを調査する必要がある。

FER について Around 手法–Horizontal 手法間および Around 手法–vertical 手法間に有意差が示されたのは、フリックの方向の数が影響していると思われる。Around 手法はフリックできる方向が8方向存在する。一方、Horizontal 手法および Vertical 手法はフリックできる方向が2方向しか存在しない。そのため、Horizontal 手法および Vertical 手法の *FER* は Around 手法よりも小さくなったと考察できる。しかし、Hexagonal 手法はフリックできる方向が6方向存在するのに関わらず、Around 手法、Horizontal 手法および Vertical 手法の *FER* に対して有意差がない。そこで、フリックできる方向が文字入力にどのような影響をおよぼすかを調査する。

第 6 章

議論および今後の課題

本章では，比較実験および分析から考えられる議論および今後の課題を述べる．

6.1 追加実験

今後の課題として，追加の文字入力実験を行う必要性が挙げられる．

4 章における実験は，実験参加者が少ないため，結果および検定精度の信頼度が高くない．よって，4 章における実験をより多くの参加者を対象として実施することが必要である．

また，文字入力についての研究においては，長期実験を行うことによって，実験参加者が手法に慣れている状態における性能評価が行われることがある [13, 29]．そのため，長期にわたる性能調査を行うことで，4 つのキーのグループ化の手法を正しく評価できるだろう．

さらに，本手法を従来手法と比べたときに，どのような文字入力性能の違いがあるかを比較する必要がある．著者自身は，Hexagonal 手法および従来手法を用いた文字入力の比較を行った．Hexagonal 手法および従来手法の両方が習熟するまで練習を行ったのち，比較実験における本番セッションを行った結果，*WPM* の平均は Hexagonal 手法の場合が 12.8，従来手法の場合が 12.3 であり，*TER* の平均は Hexagonal 手法の場合が 0.058，従来手法の場合が 0.082 であった．よって，著者実験については，本手法が従来手法よりも良い文字入力性能を示した．そのため，十分に練習を行った状態において，本手法および従来手法の比較実験を行うことで，本手法の有用性を示すことができると考える．

6.2 システムの改善

4章における実験において説明したように、フリックする方向は、仮想キーボード平面を均等に分割したものである。しかし、5章の分析において述べたようにフリックの方向には特徴があるため、フリックの方向の判定を変えることにより文字入力のエラー率を低減できる可能性がある。

また、実験後のアンケートおよび半構造化インタビューからいくつかの改善点を挙げる事ができる。特にフリックが完了したと識別するための判定を小さくするという改良方法が候補に挙がる。これにより、レイの動きが小さい場合でも文字を入力できるようになり、その上動作の小ささから文字入力の速度が向上することも見込まれる。一方、フリックの方向の判定範囲が小さくなるため、ユーザにより正確なフリックを強いることになる可能性があるため、その点も含めて実装および調査を行いたい。

6.3 コントローラを用いた文字入力以外における活用方法

本手法であるグループ化およびフリックを用いた文字入力は、VR環境におけるコントローラを用いた文字入力以外にも用いることができると考えられる。VR環境においては、ユーザの仮想的な指を用いた文字の入力への活用が考えられる。一般的なHMDの指先のトラッキング精度はあまり良くないため、指を用いた仮想キーボード上のキーの選択は難しいが、キーのグループ化によりキーの選択が行いやすくなる可能性がある。

また、本手法は本来正確なポインティングが必要となるタイピングタスクを、グループ化とフリック動作を組み合わせることによって簡略化しているため、ポインティングが難しい小さなデバイスにおいて本手法が有用である可能性がある。例をとって、スマートウォッチ上において文字入力を行うときなどに、キーのグループ化およびフリックを用いたキーボードを実装することで、小さなソフトウェアキーボード上のキー選択がしやすくなる可能性がある。また、スマートリングのようなデバイスにおいてもタップ位置と擦る方向によって文字を入力できる可能性もある。

さらに、家庭用ゲーム機におけるソフトウェアキーボードを用いた文字の入力への活用も考えられる。ユーザはジョイスティック等を用いてカーソルを操作しキーを選択するが、キーの数が多いため目的のキーを選ぶため操作の回数も多くなってしまう。そこで、キーのグループ化を行い、左のジョイスティックを用いてグループを選択したのち、右のジョイスティックをもちいたフリックでキーを選択することにより操作の回数を減らすことができ、入力速度の向上などが見込まれる。

第 7 章

結論

本研究においては、VR 環境のための、キーのグループ化およびフリックを用いた文字入力を提案および実装した。また、実験によって、キーのグループ化の手法ごとの文字入力性能、およびユーザの主観的な評価について調査を行い、Around 手法は他の手法と比較して有意に *TER* が高いことがわかった。さらに、実験参加者の意図する文字が入力できなかった場合の文字入力の特徴について分析を行った。分析の結果、Around 手法–Horizontal 手法間および Hexagonal–Horizontal 手法間において *PER* に有意差があり、グループの大きさはレイを用いたキーグループ選択のエラー率に影響する可能性があることが示された。また、Around 手法–Horizontal 手法間および Around 手法–Vertical 手法間において *FER* に有意さがあり、フリックする方向の数がフリックする方向のエラー率に影響する可能性があることを示した。今後は、追加実験による性能調査、本手法の改良、および VR 環境文字入力以外の用途の探求を行う。

参考文献

- [1] A. Arif and W. Stuerzlinger. Analysis of text entry performance metrics. pp. 100–105. TIC-STH' 09: 2009 IEEE Toronto International Conference - Science and Technology for Humanity, 2009.
- [2] J. Brooke. SUS : a quick and dirty usability scale, pp. 189–194. Taylor & Francis, 1996.
- [3] S. Chen, J. Wang, S. Guerra, N. Mittal, and S. 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. 1–6, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [4] X. A. Chen, T. Grossman, and G. Fitzmaurice. Swipeboard: A text entry technique for ultra-small interfaces that supports novice to expert transitions. In Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '14, pp. 615–620, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [5] B. Doug, R. Christopher, and M. S. Pinho. Text Input Techniques for Immersive Virtual Environments: An Empirical Comparison. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 46:2154–2158, 2002.
- [6] T. J. Dube, K. Johnson, and A. S. Arif. Shapeshifter: Gesture typing in virtual reality with a force-based digital thimble. In Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [7] Facebook Inc. Meta Quest VR ヘッドセット、アクセサリ、機器 | Meta Quest. <https://www.meta.com/jp/quest/>. 最終確認日：2024 年 1 月 9 日.
- [8] P. A. Hancock and N. Meshkati. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In Human Mental Workload, Vol. 52 of Advances in Psychology, pp. 139–183. North-Holland, 1988.

- [9] J. Hong, S. Heo, P. Isokoski, and G. Lee. SplitBoard: A simple split soft keyboard for wristwatch-sized touch screens. In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15, pp. 1233–1236, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [10] HTC Corporation. VIVE Pro Eye 概要 | VIVE 日本. <https://www.vive.com/jp/product/vive-pro-eye/overview/>. 最終確認日：2024 年 1 月 9 日.
- [11] T. Kim, A. Karlson, A. Gupta, T. Grossman, J. Wu, P. Abtahi, C. Collins, M. Glueck, and H. B. Surale. STAR: Smartphone-Analogous Typing in Augmented Reality. In Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '23, pp. 1–13, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [12] P. Knierim, V. Schwind, A. M. Feit, F. Nieuwenhuizen, and N. Henze. Physical keyboards in virtual reality: Analysis of typing performance and effects of avatar hands. In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '18, pp. 1–9, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [13] K. Komiya and T. Nakajima. A New Japanese Input Method for Virtual Reality Applications. In Human-Computer Interaction. Interaction Technologies, pp. 43–55. Springer International Publishing, 2018.
- [14] R. Kopper, D. A. Bowman, M. G. Silva, and R. P. McMahan. A human motor behavior model for distal pointing tasks. International Journal of Human-Computer Studies, 68(10):603–615, 2010.
- [15] J. Leng, L. Wang, X. Liu, X. Shi, and M. Wang. Efficient Flower Text Entry in Virtual Reality. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 28(11):3662–3672, 2022.
- [16] F. C. Y. Li, R. T. Guy, K. Yatani, and K. N. Truong. The 1line Keyboard: A QWERTY Layout in a Single Line. In Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '11, pp. 461–470, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [17] J.-W. Lin, P.-H. Han, J.-Y. Lee, Y.-S. Chen, T.-W. Chang, K.-W. Chen, and Y.-P. Hung. Visualizing the Keyboard in Virtual Reality for Enhancing Immersive Experience. In ACM SIGGRAPH 2017 Posters, SIGGRAPH '17, pp. 1–2, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [18] Z. Liu, J. He, J. Feng, and J. Zhou. PrinType: Text Entry via Fingerprint Recognition. Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol., 6(4):1–

- 31, 2023.
- [19] I. S. MacKenzie and R. W. Soukoreff. Phrase sets for evaluating text entry techniques. In CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '03, pp. 754–755, New York, NY, USA, 2003. Association for Computing Machinery.
- [20] M. McGill, D. Boland, R. Murray-Smith, and S. Brewster. A Dose of Reality: Overcoming Usability Challenges in VR Head-Mounted Displays. In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15, pp. 2143–2152, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [21] M. McGill, S. Brewster, D. P. De Sa Medeiros, S. Bovet, M. Gutierrez, and A. Kehoe. Creating and augmenting keyboards for extended reality with the keyboard augmentation toolkit. ACM Transaction Computer–Humen Interaction, 29(2):1–39, 2022.
- [22] A. Nguyen, S. Bittman, and M. Zank. Text input methods in virtual reality using radial layouts. In Proceedings of the 26th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '20, pp. 1–3, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [23] PICO Technology Japan. PICO 4 All-In-One VR Headset | PICO Japan. <https://www.picoxr.com/jp/products/pico4>. 最終確認日：2024 年 1 月 9 日.
- [24] M. A. Sharif, G. Rakhmetulla, and A. S. Arif. TapStr: A Tap and Stroke Reduced-Qwerty for Smartphones. In Companion Proceedings of the 2020 Conference on Interactive Surfaces and Spaces, ISS '20, pp. 47–50, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [25] M. Speicher, A. M. Feit, P. Ziegler, and A. Kruger. Selection-based Text Entry in Virtual Reality. In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '18, pp. 1–13, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [26] VRChat Inc. VRChat. <https://hello.vrchat.com/>. 最終確認日：2024 年 1 月 9 日.
- [27] N. Yanagihara and B. Shizuki. Cubic Keyboard for Virtual Reality. In Proceedings of the 2018 ACM Symposium on Spatial User Interaction, SUI '18, p. 170, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [28] C. Yildirim. Point and Select: Effects of Multimodal Feedback on Text Entry Performance in Virtual Reality. International Journal of Humanâ Computer Interaction, 39(19):3815–3829, 2023.

-
- [29] K. Yokoyama, R. Takakura, and B. Shizuki. JoyFlick: Japanese Text Entry Using Dual Joysticks for Flick Input Users. In C. Ardito, R. Lanzilotti, A. Malizia, H. Petrie, A. Piccinno, G. Desolda, and K. Inkpen eds., Human-Computer Interaction – INTERACT 2021, pp. 107–125. Springer International Publishing, 2021.
- [30] 小澤宗馬, 梅澤猛, 大澤範高. 空中におけるつまむ動作を用いた効率的な文字入力の検討. 第 14 回情報科学技術フォーラム第 3 分冊, pp. 389–390. 情報処理学会, 2015.
- [31] 大石真佐貴, 物部寛太郎. VR におけるハンドトラッキングを用いた日本語入力手法の検討. 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 2C1-2, pp. 1–4. 情報処理学会, 2021.
- [32] 竹永正輝, 橋本直. 片手持ち VR コントローラのための日本語入力 UI の提案. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2019 論文集, pp. 12–16. 情報処理学会, 2019.

付録 A: 入力したい文字と入力された文字についての混同行列

入力間違いに対する分析において作成した，入力したい文字と入力された文字についての混同行列を示す．

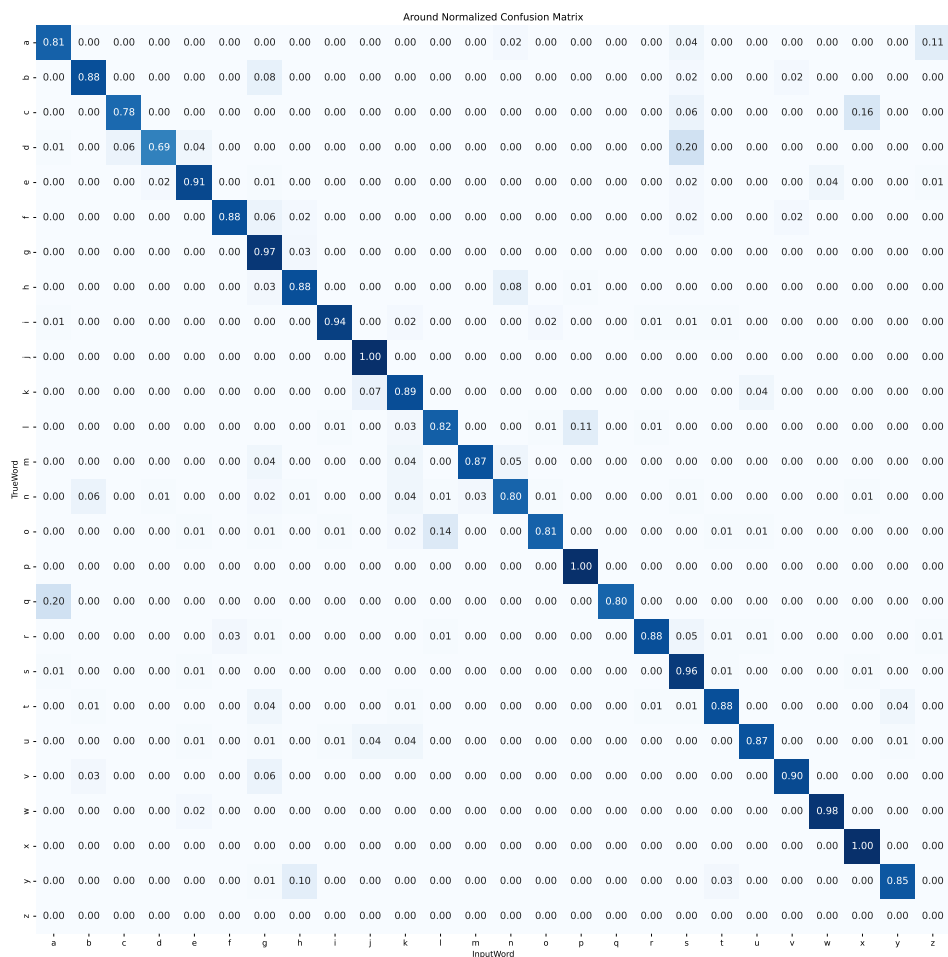


図7.1 Around 手法の入力したい文字と入力された文字についての混同行列.

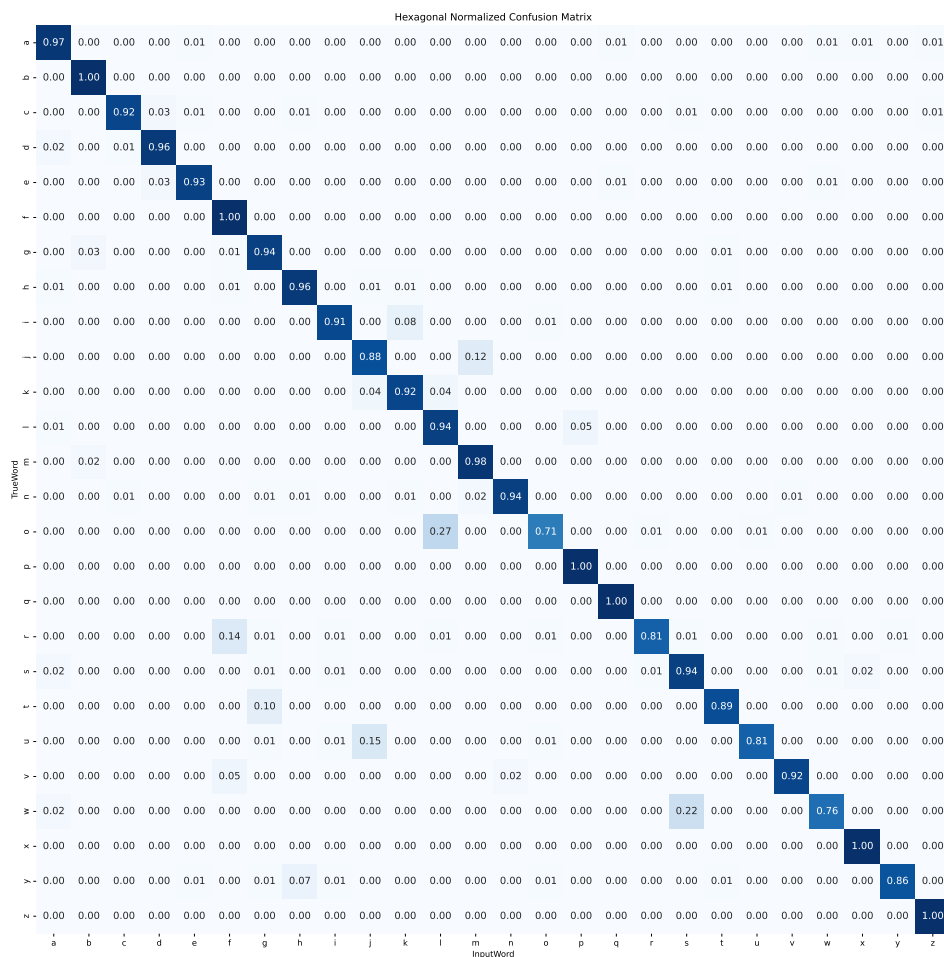


図7.2 Hexagonal 手法の入力したい文字と入力された文字についての混同行列.

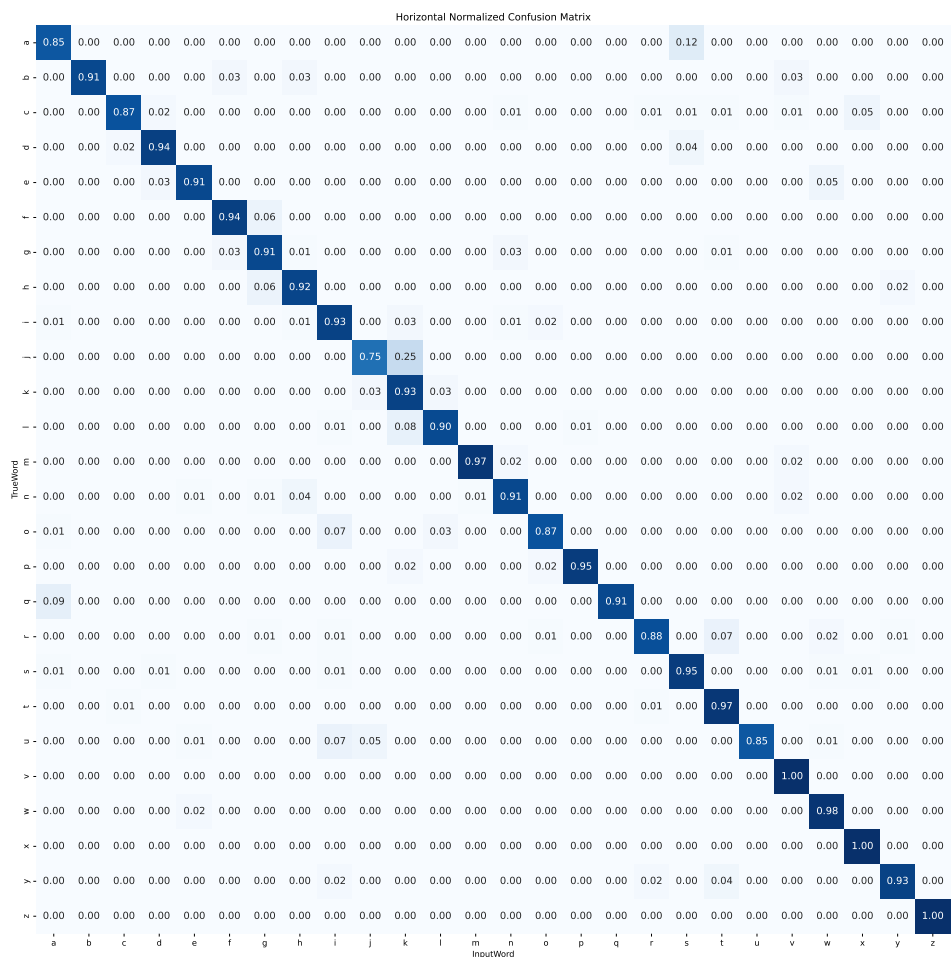


図7.3 Horizontal 手法の入力したい文字と入力された文字についての混同行列.

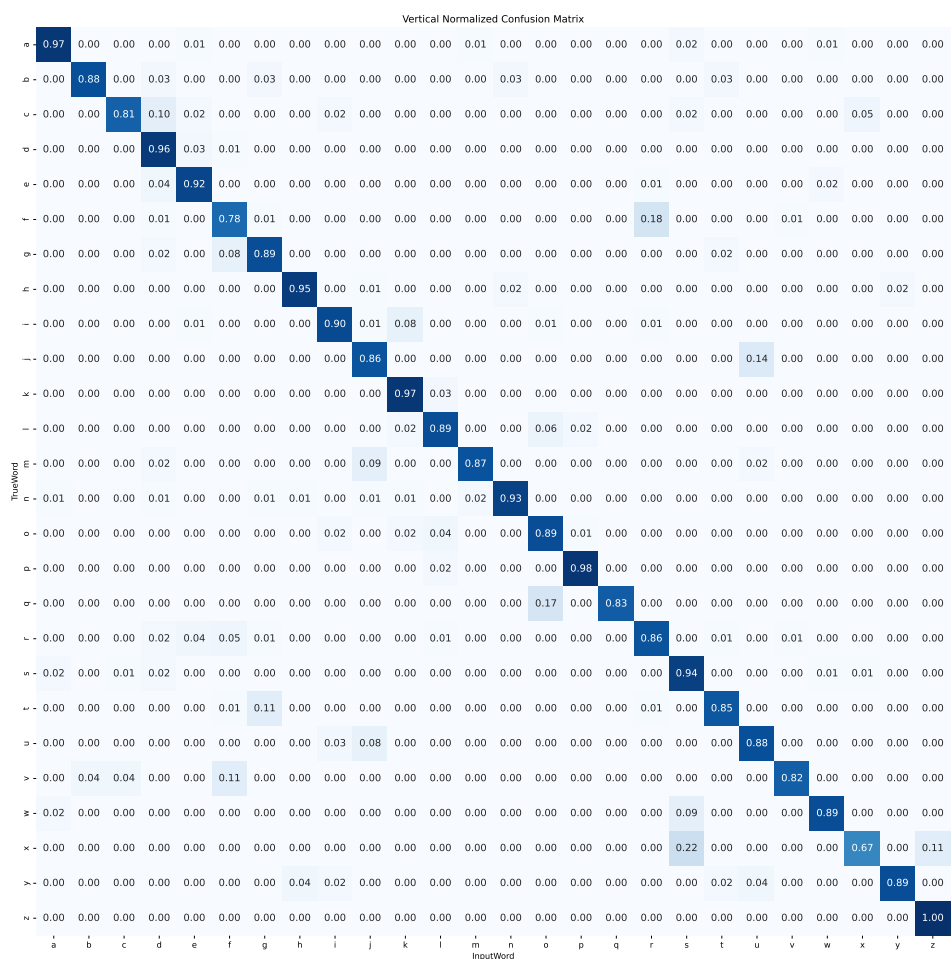


図7.4 Veritical 手法の入力したい文字と入力された文字についての混同行列.