

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

クロッシングによる選択を用いた
仮想現実向けの1次元キーボード

藤田 俊

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

2021年3月

概要

従来のレイキャストにてキーが選択される QWERTY キーボードは、仮想現実における文字入力にてしばしば採用されているものの、一般に大きな面積を要求する。本研究では、レイキャストによるクロッシングを活用した 1 次元キーボードである CrossBoard を開発した。CrossBoard では、各キーを 1 次元に並べているため使用する面積が少なく、キーはクロッシングにて選択される。本研究では、CrossBoard のキー選択の特性およびキーボードの最適な大きさに関する調査を行った。実験の結果、キー選択にはキーボードの視覚設計の影響が確認され、また、実験参加者ごとにキー選択の正確さには差があることが示された。また、実験参加者が使いやすいと感じたキーボードの大きさの平均は 61.07 cm であった。これらの結果をもとに単語予測機能を備えた CrossBoard を実装した。単語予測機能を備えた CrossBoard の性能を評価するために、従来の QWERTY キーボードとの比較実験を行った。実験では、1 ブロックにて英文 10 文の入力をそれぞれの手法毎に、練習 1 ブロック、本番 4 ブロックの合計 5 ブロック行った。実験の結果、単語予測機能を備えた CrossBoard は本番ブロックにて平均 12.86 WPM を達成し、最も入力が速く入力できた参加者は実験中の最終ブロックにて平均 16.58 WPM まで到達した。これらの入力速度は通常の QWERTY 配列の仮想現実向けのキーボードに比べて有意に遅い入力速度だったものの、CrossBoard は、従来の QWERTY キーボードに比べて表示に要する面積が 26% であるにもかかわらず、67.3% の入力速度であることがわかった。

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	仮想現実向け HMD による仮想現実	1
1.2	仮想現実における文字入力	1
1.3	現在普及している文字入力手法とその問題点	2
1.4	目的およびアプローチ	2
1.5	本論文の貢献	3
1.6	本論文の構成	4
第 2 章	関連研究	5
2.1	関連する文字入力手法	5
2.1.1	軌跡による文字入力	5
	一筆書き文字入力	5
	複数の軌跡による文字入力	6
	本研究の位置付け	6
2.1.2	曖昧キーボード	6
	離散的な曖昧キーボード	6
	連続的な曖昧キーボード	7
	本研究の位置付け	8
2.1.3	仮想現実に適応できる文字入力手法	8
	物理キーボードによる文字入力	8
	手の動きによる文字入力	8
	コントローラによる文字入力	9
	頭部の向きによる手法	10
	実世界で採用されているキーボードの比較	10
	音声による文字入力	11
2.2	クロッシングによる選択	11
第 3 章	CrossBoard：クロッシングによる選択を用いた仮想現実向けの 1 次元キーボード	12
3.1	設計	12
3.2	操作方法	13
3.2.1	単語入力	13

3.2.2	単語削除	14
第 4 章	実験 1：キーボードの大きさが空間モデルと主観評価に与える影響	15
4.1	実験の動機	15
4.2	設計	15
4.3	実験参加者	16
4.4	使用機器および実装	17
4.5	手順	17
4.6	結果および考察	18
4.6.1	キーの選択位置	18
	外れ値の処理	18
	ずれ	18
	ばらつき	20
4.6.2	作業負荷	21
4.6.3	主観評価	21
	好みの大きさの階級	21
	使いやすい大きさ	21
	コメント	22
4.7	議論	22
4.7.1	空間モデル	22
4.7.2	最適なキーボードの大きさ	22
第 5 章	単語推測機能を備えた CrossBoard の実装	28
5.1	単語推測機能	28
5.2	候補単語の選択機能	29
第 6 章	実験 2：ポインティングによる選択を用いた QWERTY キーボードとの比較	31
6.1	設計	31
6.2	実験参加者	32
6.3	使用機器	32
6.4	手順	32
6.5	評価指標	33
6.6	結果および考察	33
6.6.1	入力速度	33
6.6.2	エラー率	35
6.6.3	SUS	35
6.6.4	NASA-TLX	36
6.6.5	主観評価	37
	キーボードの大きさ	37

コメント	37
第 7 章 今後の課題	40
7.1 的確な空間モデルの適応	40
7.1.1 ユーザの操作に応じた空間モデルの適応	40
7.1.2 GUI の変更による空間モデルの改善	40
7.2 他のキー配列の検討	41
7.3 熟練者における性能評価	42
7.4 他のレイキャスト手法の評価	42
7.5 仮想現実以外への応用	42
7.5.1 拡張現実向け HMD / スマートテレビにおける文字入力	43
7.5.2 ショートカットへの応用	43
7.6 大文字 / 小文字の変更, 約物および数字の入力	44
第 8 章 結論	46
謝辞	47
参考文献	48
付 録 A 実験に用いた同意書およびアンケート	55
A.1 実験に用いた同意書	56
A.2 事前アンケート	60
A.3 NASA-TLX	61
A.4 実験 1 の事後アンケート	62
A.5 SUS	64
A.6 実験 2 の事後アンケート	65
付 録 B 実験 1 : 実験参加者の属性およびアンケートの回答	67
付 録 C 単語推測に用いた空間モデル	71
付 録 D 実験 2 : 実験参加者の属性およびアンケートの回答	73

図目次

1.1	入力フォームとキーボードが離れた位置にある時のユーザの視界（上）および姿勢（下）。a：ユーザが入力フォームを見ている時の視界および姿勢。b：ユーザがキーボードを見ている時の視界および姿勢。文字入力をする際にユーザはそれぞれの状態を行き来することになる。	3
1.2	紙とレーザーポインタを用いたプロトタイプにて“this”と入力する様子。青色の線はポインタの軌跡、ピンク色の線はレーザの軌跡である。	4
2.1	実世界で採用されているキーボード。a：テンキーを備えたキーボード。b：パソコンのキー配列を再現したキーボード。c：大きさを削減したキーボード。	10
3.1	CrossBoard を用いた単語入力の手順。ここでは“this”を入力している。a：ユーザはまずコントローラのトリガボタンを引く。b：ユーザはクロッシングにて‘t’, ‘h’, ‘i’, ‘s’の順にキーを選択する。c：ユーザはトリガボタンを離す。トリガを離すことで単語の予測変換が行われる。	13
3.2	単語の削除。a：ユーザはトリガボタンを引いたまま削除したい範囲をカーソルにて3往復以上擦る。b：ユーザがトリガを離すと、擦られた範囲の単語が削除される。	14
4.1	実験1において比較対象のキーボードの大きさ。左：Small 条件。中央：Medium 条件。右：Large 条件。	15
4.2	実験のセットアップ。	16
4.3	各条件における各文字ごとの実験参加者が選択した位置。上：Small 条件，中：Medium 条件，下：Large 条件。	19
4.4	キーボードの大きさごとの各キーの選択位置のずれ。縦軸正方向はキーボード右方向へのずれを意味する。	20
4.5	実験参加者ごとの各キーの選択位置のずれ。縦軸正方向はキーボード右方向へのずれを意味する。	24
4.6	P2を除いたときのキーボードの大きさごとの各キーの選択位置のずれ。縦軸正方向はキーボード右方向へのずれを意味する。	24
4.7	大きさ条件ごとの各キーの選択位置のばらつき。縦軸正方向はキーボード右方向へのずれを意味する。	25

4.8	実験参加者ごとの各キーの選択位置のばらつき．縦軸正方向はキーボード右方向へのずれを意味する．	25
4.9	実験参加者ごとの各キーボードの大きさにおけるキーの選択位置の標準偏差．	26
4.10	大きさ条件ごとの NASA-TLX の各下位尺度および作業負荷．MD：知的・知覚的要求，PD：身体的要求，TD：タイムプレッシャー，OP：作業成績，EF：努力，EF：フラストレーション，WL：作業負荷（下位尺度の平均）．	27
4.11	ユーザが使いやすいと感じたキーボードの大きさ．上：ユーザーが手描きしたものを重ねて表示したもの（塗りつぶし訂正などは削除した）．下：大きさの平均および標準偏差を描き出したもの．	27
5.1	予測単語機能を備えた CrossBoard にて “dine” と入力する様子．a：‘d’，‘i’，‘n’，‘e’ と入力し終わった様子．b：候補単語から “dine” を選ぶ様子．c：“dine” が入力された様子．	30
6.1	実験 2 において比較対象のキーボード．左：本手法（CrossBoard）．右：ポインティングによるキー選択を用いた QWERTY キーボード（2D Keyboard）．	31
6.2	ブロック間における手法ごとの文字入力速度．	34
6.3	実験参加者間における手法ごとの文字入力速度．	34
6.4	ブロック間における手法ごとの未修正エラー率．	35
6.5	実験参加者ごとの SUS の得点．	36
6.6	条件ごとの NASA-TLX の各下位尺度および作業負荷．MD：知的・知覚的要求，PD：身体的要求，TD：タイムプレッシャー，OP：作業成績，EF：努力，EF：フラストレーション，WL：作業負荷（下位尺度の平均）．	37
6.7	参加者ごとの作業負荷．	38
7.1	GUI の変更による空間モデルの調整．左：エリアカーソルを導入した CrossBoard．右：クロッシングした地点に入力を許容する幅を表示するようにした CrossBoard．	41
7.2	比較対象のレイキャスト手法．a：Gun テクニック．b：Wand テクニック．	42
7.3	CrossBoard のスマートテレビへの応用．CrossBoard を利用することで他のコンテンツの表示領域を確保している．	43
7.4	CrossBoard によるショートカット入力の様子．a：選択したい平面にカーソルを合わせる．b：トリガボタンを引くと CrossBoard が表示される．c：CrossBoard に実行したいコマンドを入力する．ここでは “Del”（削除）と入力している．d：トリガボタンを離すとコマンドが実行される．ここでは平面の削除が行われている．	45

表 目 次

4.1 キーボードの大きさに対する実験参加者の好み	21
B.1 実験 1 における各実験参加者の属性	68
B.2 実験 1 における NASA-TLX のアンケート結果	69
B.3 実験 1 における実験後アンケート結果	70
C.1 単語推測に用いた空間モデル	72
D.1 実験 2 における各実験参加者の属性	74
D.2 実験 2 における NASA-TLX のアンケート結果	75
D.3 実験 2 における SUS のアンケートの結果	76

第1章 はじめに

本章において、研究の背景として本研究が対象とする仮想現実向けの Head-Mounted Display (HMD) による仮想現実について述べる。次に仮想現実における文字入力とその問題点について述べたのち、本研究の目的およびアプローチについて述べる。最後に本論文の貢献および本論文の構成について述べる。

1.1 仮想現実向け HMD による仮想現実

仮想現実とは、現実には実際にはないものを、あたかも現実にあるかのようにユーザに感じさせるためのシステムあるいはそのシステムを実現するための技術を指す。近年普及している仮想現実に関連するデバイスのひとつに、仮想現実向け HMD がある。仮想現実向け HMD とは、ユーザの視界を物理的に遮蔽し、代替となる視覚情報をユーザに提示するデバイスである。仮想現実向け HMD は、HMD 本体の位置および角度を検出することで、ユーザの頭部の位置および角度に合わせた景色を表示し、ユーザにあたかも現実とは異なる空間（仮想空間）にいるように感じさせる。また、現在市販されている仮想現実向け HMD の多くは、HMD 本体と同時に位置および姿勢を検出可能なコントローラを提供しており、ユーザはコントローラを仮想手として用いて、仮想空間内の物体とのインタラクション（例えば、掴む、投げるなど）を行う。このような仮想空間内において直接触れて選択することが困難な、ユーザから離れた物体の選択にはコントローラを始点としたレイキャストが採用されることが多く [LSKP03]、仮想空間内の GUI 要素の選択においても用いられる。

1.2 仮想現実における文字入力

現在、仮想空間内における文字入力は、仮想デスクトップ環境の操作¹、キーワードによる検索（例えば、動画サイトあるいはアプリケーションストアにおける検索）、ユーザ名およびパズフレーズの入力など様々な状況にて行われる。また、仮想現実向け HMD の普及によって仮想空間内にて過ごす時間が増えていくと、スマートフォンおよびタブレットのような、現実世界の端末にて可能な操作を仮想空間内にて行えるようにしていくことが期待される。例えば、自身のスマートフォンに届いた友人からのテキストメッセージを閲覧し返信するために、仮想現実向け HMD を外し、スマートフォンを操作したのちに、再度仮想現実向け HMD

¹例えば、Oculus における仮想デスクトップ <https://support.oculus.com/166993604065478/>

を装着するのはユーザにとって面倒である．このように，現実と仮想空間の行き来を減らすために，仮想空間内にて行える作業はこれから拡大していくことが期待される．そのため，仮想空間内にて行える作業の増加によって，仮想空間内における文字入力を行う機会も同時に増加していくと考えられる．

1.3 現在普及している文字入力手法とその問題点

現在普及している仮想空間内における文字入力手法として，QWERTY 配列のキーボードを仮想空間に表示して操作する手法がある．QWERTY 配列を用いたキーボードについては，コントローラからのレイキャストによる操作 [SFZK18,BK19a]，コントローラをキーにぶつける事による操作，[SFZK18,BK19b,BK19a] あるいは頭部の向きによる操作 [SFZK18, YGY⁺17] など様々な操作方法が提案されている．

しかしながら，これらの文字入力手法は以下のような課題を持つ．

- コンテンツを遮蔽してしまう．
- GUI を占有してしまう．

コンテンツを遮蔽してしまう状況の具体例として，仮想空間にて映像（例えば，360 度映像，2 眼の立体映像，あるいは 2 次元の映像）を見ている最中に，テキストチャットの返信を行う場合に，キーボードが映像を隠してしまうようなことがある．また，Web ブラウザを使用中にあるページの内容を見ながら，検索単語を入力したいような状況において，ページの内容がキーボードによって遮られることがある．GUI を占有してしまう状況の具体例として，文字入力に対して候補単語（例えば，検索単語）あるいは画像（例えば，動画のサムネイル）を表示したい場合に，キーボードが表示の妨げとなることがある．

このような問題への素朴な解決策として，キーボードを小さくするあるいはキーボードの位置を他のコンテンツを遮蔽しない位置に変更することが考えられる．しかし，キーボードを小さくした場合は，キー選択の失敗が増えるため [THY⁺19] 入力性能の低下を招き，操作するユーザのフラストレーションを増大させる可能性がある．また，キーボードの位置を変更した場合についても，現在市販されている仮想現実向け HMD には垂直方向の視野角に制限があるため，入力フォームとキーボードが離れているとき，ユーザはそれぞれを同時に視界に収めきれないことがある [YFZ⁺18]．この場合，ユーザは入力した文の確認とキーボードを見ながら入力するために頭部を交互に動かす必要があり，疲労や不快感が発生する可能性がある（図 1.1）[YGY⁺17]．それゆえ，キーボードの表示する位置を変更することは，遮蔽による問題を解決しても，新たな問題を引き起こすことがある．

1.4 目的およびアプローチ

本研究の目的は，1.3 節にて挙げた問題の改善である．そのため本研究では，クロッシングによる選択を用いた 1 次元キーボードである CrossBoard を提案する．図 1.2 に CrossBoard のプロ

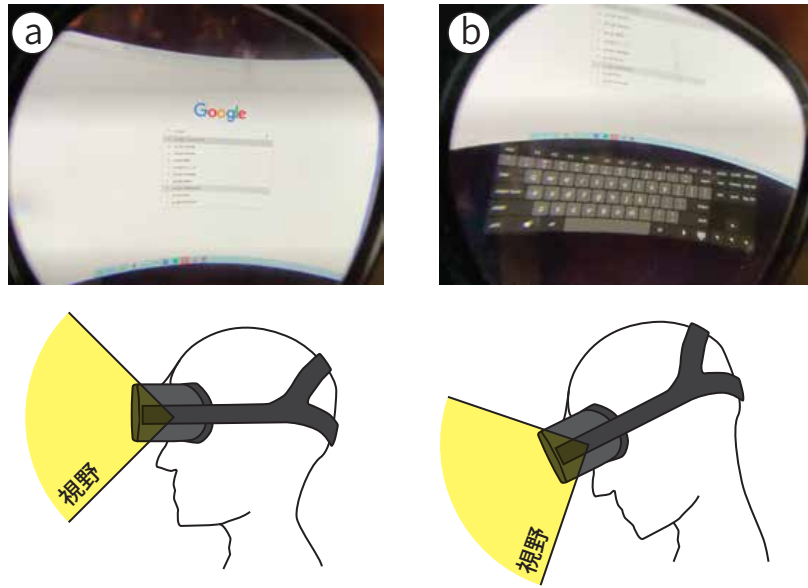


図 1.1: 入力フォームとキーボードが離れた位置にある時のユーザの視界（上）および姿勢（下）. a: ユーザが入力フォームを見ている時の視界および姿勢. b: ユーザがキーボードを見ている時の視界および姿勢. 文字入力をする際にユーザはそれぞれの状態を行き来することになる.

トタイプにて文字入力を行う様子を示す. CrossBoard は QWERTY キーボードの各キーを一次元に並べたキーボードであり, ユーザは各キーをレイキャストによるクロッシング [THY⁺19] にて選択する. CrossBoard において各キーは横一列に並んでいるため, キーボードの垂直方向の大きさが通常の QWERTY キーボードより抑えられている. また, キーボード自体の面積も小さいため, 入力フォームの近くにキーボードを表示しても他のコンテンツを遮蔽する量は少なくなる. 各キーの選択は, 単語予測機能により補完されるため, ユーザは不正確なキー選択を行っても意図した単語の入力が行える.

1.5 本論文の貢献

本研究の貢献を以下に示す.

- クロッシングによる選択を用いた文字入力手法の提案および実装.
- CrossBoard におけるキーボードの最適な大きさの調査.
- CrossBoard と既存手法の比較による性能評価.

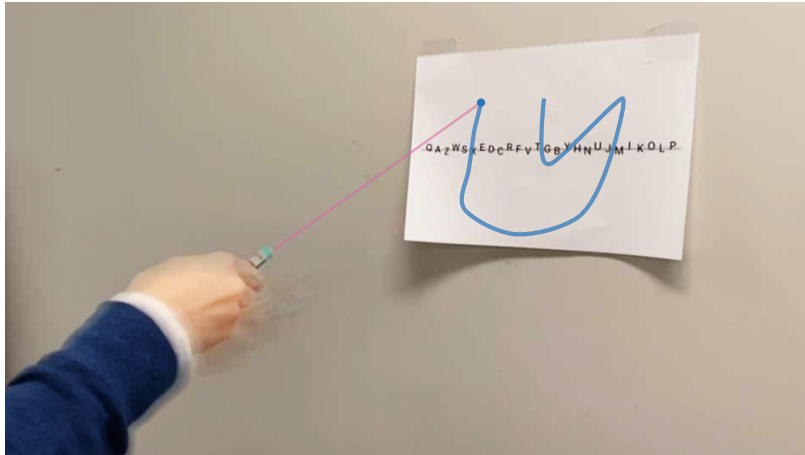


図 1.2: 紙とレーザーポインタを用いたプロトタイプにて“this”と入力する様子．青色の線はポインタの軌跡，ピンク色の線はレーザーの軌跡である．

1.6 本論文の構成

第 1 章では，本論文の背景，目的，およびアプローチを述べる．第 2 章では，関連研究を紹介したのち，それらに対する本研究の位置付けを明らかにする．第 3 章では，CrossBoard について述べる．第 4 章では，CrossBoard においてキーボードの大きさがキーの選択位置の平均および分散，ユーザの作業負荷および主観評価に与える影響を調査した実験について述べる．第 5 章では，CrossBoard の実装，特に単語推測機能について述べた上で，第 6 章では実装した CrossBoard の評価実験について述べる．第 7 章では，研究に関する議論を示し，第 8 章では，本研究のまとめを述べる．

第2章 関連研究

本章では、CrossBoardに関連する文字入力手法およびクロッシングに関して述べる。

2.1 関連する文字入力手法

様々なデバイスおよび利用用途に適応するために、これまでに多くの文字入力手法が提案されてきた。本節では、CrossBoardと操作方法が類似する手法として、2.1.1節にて軌跡による文字入力手法、2.1.2節にて曖昧キーボードについて述べる。その後、2.1.3節にて仮想現実における文字入力手法について述べる。

2.1.1 軌跡による文字入力

軌跡による文字入力手法は、1つの軌跡に1つの文字あるいは単語が対応する一筆書き文字入力と、複数の軌跡が1つの文字あるいは単語に対応する複数の軌跡による文字入力に2分できる。本節では、この2種類の文字入力手法およびこれらの手法に対する本研究の位置付けを述べる。

一筆書き文字入力

一筆書き文字入力において、1文字に対して1つの描いた軌跡が対応する手法が存在する。Graffiti [MZ97]はアルファベットの形状を模した一筆書き可能な軌跡によって文字入力可能なPDA向けのソフトウェアである。Unistrokes [GR93]はより単純化されたアルファベットの形状の軌跡のセットである。EdgeWrite [WMK03]は、運動障害者向けの一筆書き文字入力手法であり、軌跡の形状ではなくペンがどの角にぶつかったかに基づいて文字を識別する。これらの手法は元々PDA向けのものだが、様々な端末への実装が存在する[株式21]。これらのような、2次元的な軌跡を用いた手法に対して、スマートグラスの側面の1次元タッチセンサによる1次元的な一筆書きを用いた手法[YSZ⁺16]がある。また、アルファベット以外への応用として、Ushidaら[USH14]は点字の形に基づく一筆書き文字入力手法を提案している。これらの手法は軌跡を字形に基づいて設計したものであり、ユーザは文字の形をヒントにして文字入力を行う。

これに対して、1単語に対して1つの軌跡が対応する単語単位の文字入力手法が存在する。Perlin [Per98]は、正方形の入力領域を8つに分割し、領域間を行き来することによっ

て文字を入力する手法である Quikwriting を提案している。Cirrin [MA98] は環状に配置したキーをペン型デバイスにて次々となぞることにより、単語単位の入力が可能な手法である。QuikWriting および Cirrin は軌跡がキーボードのどこを通過したのかに基づいて文字入力が行われる。SHARK² [KZ04] では軌跡の形状に基づく単語単位の入力を実現している。SHARK² [KZ04] はジェスチャキーボードと呼ばれ、スマートウォッチ [GOZ16] および VR [GJY⁺19,YS18,YST19,CWG⁺19] など、さまざまなデバイスへの応用が行われている。これらの手法ではユーザは入力したい文字をキーボードから探し、次々となぞることで入力を行う。

複数の軌跡による文字入力

1つの文字あるいは単語を入力するために複数のストロークを要する手法は一筆書き文字入力に比べると少ない。Graffiti 2 [Thom04] は、Graffiti の一部の字形を2画にて描くようにした手法であり、1文字に対して最大2つの軌跡が対応することがある。Bi ら [BCO⁺12] は、タブレット上の左右に分割された QWERTY キーボードに対して両手の親指を用いて、ジェスチャ入力を行う手法を提案している。この手法では左/右手の親指にて軌跡を描くため、1つの単語に対して1つ以上の軌跡が対応する。分割されたキーボードは通常のタブレット向けソフトウェアキーボードに比べて小型であり、通常のタブレットにてジェスチャ入力を行うよりも少ない指の動きによって入力できる。

本研究の位置付け

CrossBoard は、単語単位の入力が可能な一筆書き文字入力手法である。軌跡はコントローラからのレイキャストにて操作されるカーソルにて描かれ、カーソルがキーを横切ることによって文字の入力が行われる。このとき文字入力には軌跡の形は影響せず、軌跡がキーボードを横切った位置とその順序のみが影響する。

2.1.2 曖昧キーボード

曖昧キーボードは、入力/表示方法に制約のある文脈において様々な手法が提案されている。本節では曖昧キーボードについて、Walmsley ら [WST14] と同様に離散的な曖昧キーボードと連続的な曖昧キーボードに分類する。

離散的な曖昧キーボード

離散的な曖昧キーボードとは、1つのキーに対して複数の文字を割り当てたキーボードである。Tegic Communication (現, Nuance Communications) が開発した T9 [GKK98] では、携帯電話の9つのキーパッドによる英語入力を実現している。MacKenzie ら [MF10] は、スキャ

ニングキーボード¹の各キーに複数の文字を割り当てた SAK (Scanning Ambiguous Keyboard) を提案した。1Line Keyboard [LGYT11] は、タブレットにおけるソフトウェアキーボードの表示面積を削減するために、QWERTY 配列に基づくキーの統合を行った手法である。離散的な曖昧キーボードは、入力あるいは表示方法に制限のあるスマートウォッチにおいてもいくつかの手法が提案されている。Yi ら [YYX⁺17] は、円形のアルファベット配列をもつ複数のカーソルを備えた文字入力手法として COMPASS を提案している。COMPASS には、ユーザが文字を入力したのちに、次に入力しそうな文字の近くまでシステムがカーソルを動かす機能およびユーザが次に打ちそうなキーをハイライトする機能が実装されている。Gong ら [GXG⁺18] は、スマートウォッチの画面外周部に 6 つのキーを配置し各キーを手首の動きにて入力する手法である WrisText を提案している。WrisText では、ユーザが動かしやすい手首の方向を調査したのちに、その方向に合わせたキー配列を提案している。

連続的な曖昧キーボード

連続的な曖昧キーボードとは、ユーザーの不正確なキー選択を吸収するために、各キーが入力される確率を Walmsley ら [WST14] は、傾きによるサイトフリーな文字入力手法として Rotext を提案した。Walmsley ら [WST14] は、1 次元曖昧キーボード向けの配列として ENBUD 配列を提案した。実験では、キーボードの視覚的フィードバックを徐々に減らす練習セッションののち、サイトフリー条件の最終セッションの実験において ENBUD 配列における入力速度は QWERTY 配列における入力速度より速く、有意差があることを報告した。しかし、視覚フィードバックのある練習セッションにおいて、QWERTY 配列条件は ENBUD 配列よりも入力速度が速く有意差があった。このような 1 次元キーボードは、傾き以外にもタッチ [Whi21]、ならびに押下圧 [ZYW⁺18] によるものが存在している。

連続的な曖昧キーボードを実現する際に重要になるのは、ユーザがどの程度キー選択を曖昧に行うかを知ることにある。ユーザが各キーを選択する際にどこを選択しているのかを推測するモデルは空間モデルと呼ばれており、これは連続的な曖昧キーボードの実現に必要な要素の 1 つである。空間モデルは、キーボードの操作方法 [Zhee19, XCZ⁺20, FWW11] や見た目 [ZLBZ18, ZYW⁺18] に応じて変化するため、様々な条件下における調査がなされている。タッチスクリーンにおけるソフトウェアキーボードの見た目が空間モデルに与える影響は、テーブルトップディスプレイに対する 10 本指によるタイピング [FWW11] およびスマートフォンに対する 2 本の親指によるタイピング [ZLBZ18] にて調査されている。Zhu ら [ZLBZ18] は、調査した空間モデルを用いて、ソフトウェアキーボードを表示せずとも文字入力できる手法を開発している。Xu ら [Zhee19, XCZ⁺20] は、指先の小さなタップによって文字入力を行う手法を提案している。Zhong ら [ZYW⁺18] は、押下圧に応じて移動するカーソルによるキー選択において、キーを選択するカーソルの大きさによってエラーモデルがどのように変化するかを調査している。

¹ スキャニングキーボードとは、1 つのボタンのみで文字入力可能な手法である。スキャニングキーボードでは一つのキーがハイライトされており、ハイライトされるキーは時々刻々と変化する。ユーザが入力したいキーがハイライトされている時にボタンを押すと、所望の文字が入力できる。

本研究の位置付け

CrossBoard は不正確なキー選択による文字入力 of 補正を伴う文字入力手法である。各キーの選択はレイキャストによるカーソルのクロッシングによって行われている。また本研究では、キーボードの大きさによってエラーモデルがどのように変化するかを調査する。CrossBoard は [WST14,ZYW⁺18] をはじめとする 1 次元キーボードを仮想現実向けに応用した手法である。CrossBoard は [CWG⁺19] と同様に一筆書き文字入力 of 一種である。ユーザは片手のコントローラにて文字入力を行う。

2.1.3 仮想現実に適応できる文字入力手法

本節では、今までに提案されてきた仮想現実における文字入力手法について述べる。また、仮想現実への応用が容易に可能な手法（例えば、大型ディスプレイ向けの手法）についても本節にて紹介する。

物理キーボードによる文字入力

仮想現実にて文字入力を行う手法としてパーソナルコンピュータ向けのキーボード（以降、物理キーボード）を仮想現実向け HMD を被ったまま入力する手法がある。Walker ら [WLVK17] は、単語入力の補正機能およびどのキーを入力したかのフィードバックを付与した物理キーボードによる文字入力手法を評価しており、平均 43.7 WPM の速度で入力できたことを報告している。この入力速度は実世界における物理キーボードの入力速度と遜色ないものである。Knierim ら [KSF⁺18] は、仮想手を表示することによる文字入力速度への影響を評価しており、熟練したタイピストは仮想手の表示により実世界における物理キーボードの入力と同等のパフォーマンスを発揮できることを示している。

これらの手法はユーザが物理キーボードの置かれたデスクにて作業しているような状況に適しているものの、物理キーボードから離れた場所にて操作している場合にキーボードのある位置まで移動する必要がある。これに対して Pham ら [PS19] は、物理キーボードを身体に固定することで立位のまま文字入力を可能とする手法として HawKey を提案している。

手の動きによる文字入力

手の動きによる文字入力手法は、空中におけるハンドジェスチャによる手法が複数存在する。空中表示されたキーボードを指にて入力する手法 [SFZK18,DBWK19] は、空中におけるハンドジェスチャによる文字入力手法の中でも代表的な手法である。Markussen ら [MJH14] は、指をつまむ動作を用いたジェスチャキーボードとして Vulture を提案した。川口ら [川口19] は、片手の掌をタッチパネルと見立てたフリック入力手法を提案している。Fashimpaur ら [FKL20] の PinchType は、[LGYT11] のキー割り当てを採用し、各キーの入力を親指と他の指とのピンチにて行う手法である。

一方、机などの平面に対する、手の動きによる文字入力も調査されている。Dudley らは [DBWK19] は、空中および平面上における両手の人差し指によるタイピングと全ての指を用いたタイピングに関するパフォーマンスを測定している。Dudley らの実験では、空中条件の 2 本指のキーボードが Richardson ら [RDW20] は、習熟したタイピストによる手の動きを調査し、トラッキングされた手の動き [HLW⁺18] からタイピングを行う手法を開発している。

ただし、手の動きによる文字入力手法の性能には、入力する文章や練習条件だけでなく手の動きの追跡を行うモーショントラッキングの精度が大きく影響する。それゆえ、各手法の性能は実験機材および使用したアルゴリズム等を十分加味した上で評価する必要がある。

コントローラによる文字入力

各キーを選択することによって文字入力を行う手法について、キーの選択手法間の比較研究が行われている。トラッキングされたコントローラによる文字入力手法は、ポインティング [SFZK18,BK19a] とタッピング [SFZK18,BK19b,BK19a] に大別される。ポインティングによる文字入力手法は、コントローラからのレイキャストによって空間に固定されたキーボードのキーを選択する手法であり、平均 15–16 WPM [SFZK18,BK19a] 程度の入力速度であることが報告されている。これらの研究は QWERTY 配列を対象としたものだが、他の配列における文字入力性能について大型ディスプレイにおける評価実験がなされている。Shoemaker ら [SFDB09] は、大型ディスプレイにおいて QWERTY 配列の性能が円形キーボードなどに比べて高いことを報告している。タッピングによる文字入力手法は、コントローラから固定された位置にある当たり判定領域を用いて、空間に固定されたキーボードのキーを選択する手法である。タッピングによる文字入力手法の性能は、キーボードの位置および当たり判定領域の位置によって変化する。床面からみて垂直に固定されたキーボードに対してコントローラの先端をぶつける手法（[SFZK18] の Controller Tapping 手法）は平均 12.69 WPM、床面に対して斜めに固定されたキーボードをコントローラから伸びた仮想的なスティックの先端にて叩くことにより入力する手法（[BK19b,BK19a] の Drum-like キーボード）は平均 21–24 WPM であったことが報告されている。

コントローラのジョイスティックあるいはタッチパッドを用いた文字入力手法として、キーを 1 つ 1 つ移動できる手法（[SFZK18] の Discrete Cursor 手法）とカーソルを自由に移動できる手法（[SFZK18] の Continuous Cursor 手法）が調査されており、それぞれ平均 5.31 WPM, 8.35 WPM 程度であることが報告されている。Yu ら [YFZ⁺18] は、2 つのジョイスティックの入力の組み合わせを用いた、仮想現実における GUI 占有面積の小さい文字入力手法として PizzaText を提案しており、初心者および習熟者におけるパフォーマンスをそれぞれ平均 8.59 WPM, 15.85 WPM と報告している。

仮想現実における軌跡による文字入力手法も存在する。Yanagihara ら [YS18] は、 $3 \times 3 \times 3$ の立方体上のキーボードに対する 3 次元的な軌跡を用いて入力を行う文字入力手法として Cubic Keyboard を提案している。Yanagihara ら [YST19] は、湾曲した QWERTY キーボードに対するジェスチャ入力手法を提案している。Chen ら [CWG⁺19] は、コントローラからのレイキャストによるジェスチャキーボードを入力する手法を提案している。

頭部の向きによる手法

頭部の向きによってカーソルを移動させ、クリックをコントローラにて行う手法（[SFZK18]の Head Pointing 手法）は、10.20 WPM であると報告されており、比較的疲労が少ない手法であることが報告されている。Yu ら [YGY⁺17] は、単語予測機能を実装した条件下にて、コントローラによるクリック、頭部の向きの Dwell によるクリック、そしてジェスチャ入力による文字入力手法を比較しており、それぞれの文字入力性能について 15.58 WPM, 10.59 WPM, 19.04 WPM と報告している。ジェスチャ入力による文字入力手法については改善したアルゴリズムを用いて再実験を行っており、平均 24.73 WPM に到達したことを報告している。

実世界で採用されているキーボードの比較

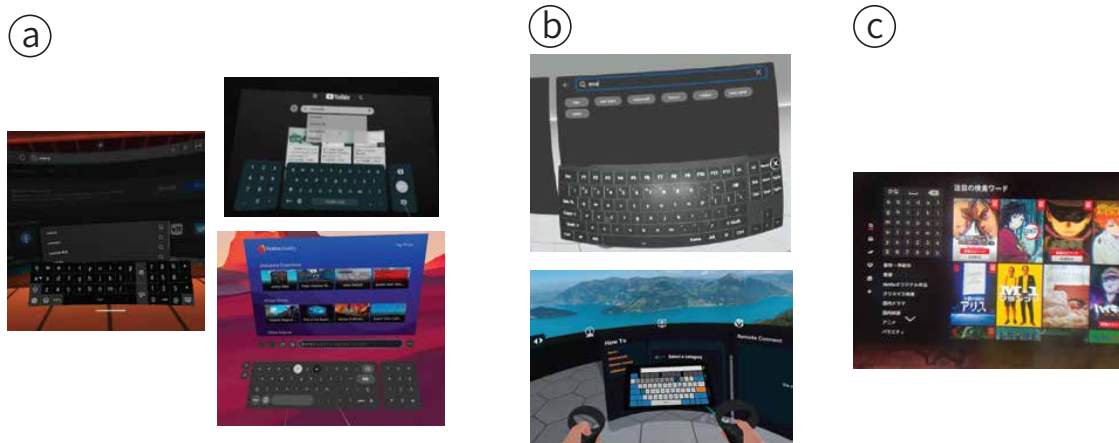


図 2.1: 実世界で採用されているキーボード．a：テンキーを備えたキーボード．b：パソコンのキー配列を再現したキーボード．c：大きさを削減したキーボード．

実際のアプリケーションにおいては、レイキャストによるキー選択手法が利用されているものの、そのレイアウトは多様である（図 2.1）。頻繁に見られる設計の一つが、テンキーを配置したキーボード（図 2.1a）である。通常の物理キーボードに見られる文字配列の上列に数字キーを配置する設計と異なり、数字キーのみを左右いずれかにまとめて配置している。これは入力文とキーボードを交互に見る、ユーザの垂直方向の視線の移動量を抑えるための工夫だと考えられる。一方でパソコン向けのキーボードの配列をそのまま採用するケースもある（図 2.1b）。これは、バーチャルデスクトップ機能のような仮想空間にてパソコンの操作をそのまま行いたい場合によく採用されている。また、大きさを制限したキーボードも存在する（図 2.1c）。これは、スマートテレビを模した GUI を維持した上で、検索結果として表示されているサムネイルの表示領域を確保するために大きさの制限が行われている。このように仮想現実におけるキーボードは、ユースケースに合わせた実装がなされてきたことがわかる。

音声による文字入力

Bowman ら [BRP02] は、仮想現実における音声入力手法について 65.99 CPM (≈ 13.2 WPM) と報告している。ただし、この研究では当時の音声認識技術の限界から、Wizard of Oz 法による実験であり、またファイル名などの入力を想定して 1 文字ずつアルファベットを読み上げることによる入力だった。

より自然な発話による、そして音声認識技術を用いた研究は仮想現実では行われていないものの、Ruan ら [RWL⁺18] は、スマートフォンにおける音声文字入力を評価しており 153 WPM と報告している。また、Ruan ら [RWL⁺18] は、音声入力においては入力した文章にはミスが残りやすいということも報告している。

2.2 クロッシングによる選択

クロッシングとは、2つの大きさのある境界線を通過する操作のことであり、ターゲット選択手法の一つである。一般的なターゲット選択手法の一つであるポインティングでは、大きさのあるターゲットにポインタを合わせクリックすることで選択を行うが、クロッシングではターゲットの境界をポインタをクリックした状態のまま通過することで選択を行う。Accot ら [AZ02] は、クロッシングによる選択について、ターゲットの境界線の向きについて垂直か水平かの 2 条件、ターゲット毎にクリックし直してクロッシングするかクリックしたままクロッシングするか の 2 条件を掛け合わせた 4 条件に分類した。Accot ら [AZ02] は、スタイルスにおいてこの 4 条件におけるクロッシングによる選択と通常のパインティングによる選択に要する時間を調査し、ポインティングによる選択に比べて、クロッシングによる選択に要する時間が短い場合があることを示した。Tu ら [THY⁺19] は、仮想現実におけるコントローラによる GUI 操作においてクロッシングによる選択に要する時間が、通常のパインティングによる選択と同程度かあるいは短いことを示しており、また、水平なターゲットに対してクリックしたままクロッシングすることによる選択に要する時間が、通常のパインティングによる選択に要する時間に対して有意に短いことを示している。

CrossBoard におけるクロッシングによるキー選択は、Tu ら [THY⁺19] の研究における水平なターゲットに対してクリックしたままクロッシングする条件に該当する。このことから、レイキャストによるカーソルによって操作を行う 1 次元キーボードにおいて、クロッシングによるキー選択を採用するのは選択時間の観点から妥当だと考えられる。

第3章 CrossBoard：クロッシングによる選択を用いた仮想現実向けの1次元キーボード

本節では、CrossBoard の設計および操作方法を述べる。

3.1 設計

CrossBoard は、キーボードの表示面積を通常の QWERTY キーボードよりも小さくすることを目的とした手法である。CrossBoard における、キーボード配列、キー選択手法、および入力デバイスについて以下に挙げる設計をした。

キーボード配列 学習コストを低減するために QWERTY 配列を“QAZ-OLP”の順序に並び替えたもの（図 3.1）を採用した。これは、Rotext [WST14] にて、視覚フィードバックのある条件下において QWERTY 配列のパフォーマンスが、ユーザにとって未知の配列に比べて有意に良かったためである。

キー選択手法 レイキャストによる高速な選択手法 [AZ02, THY⁺19] としてクロッシングを採用した。レイキャストによる入力コントローラを用いた操作においてよく使われており、入力デバイスの傾きによる入力手法 [WST14, GJY⁺19] にを用いた場合に比べて、他の GUI の操作との一貫性を持たせることができる。また、一般的な 2 次元のターゲットに対するポインティングに比べて入力しやすさに寄与するターゲットの大きさの次元が 1 次元のため、キーボードのレイアウトの縮小に貢献している。

入力デバイス キー選択には片手のコントローラを用いる。この設計は先行研究における仮想現実向けキーボード [SFZK18, BK19a] としては一般的ではないものの、ジェスチャキーボードにおいて両手入力を採用しても入力性能は向上せず、また片手入力に比べて知的・知覚的負荷が増加する [BCO⁺12] ことが知られていたため採用した¹。

¹ [BCO⁺12] では身体的負荷が低減したことを報告しているが、知的・知覚的負荷の増大の影響が大きいと考えて片手入力を採用した。

3.2 操作方法

本節では，CrossBoard の操作方法を述べる．

3.2.1 単語入力

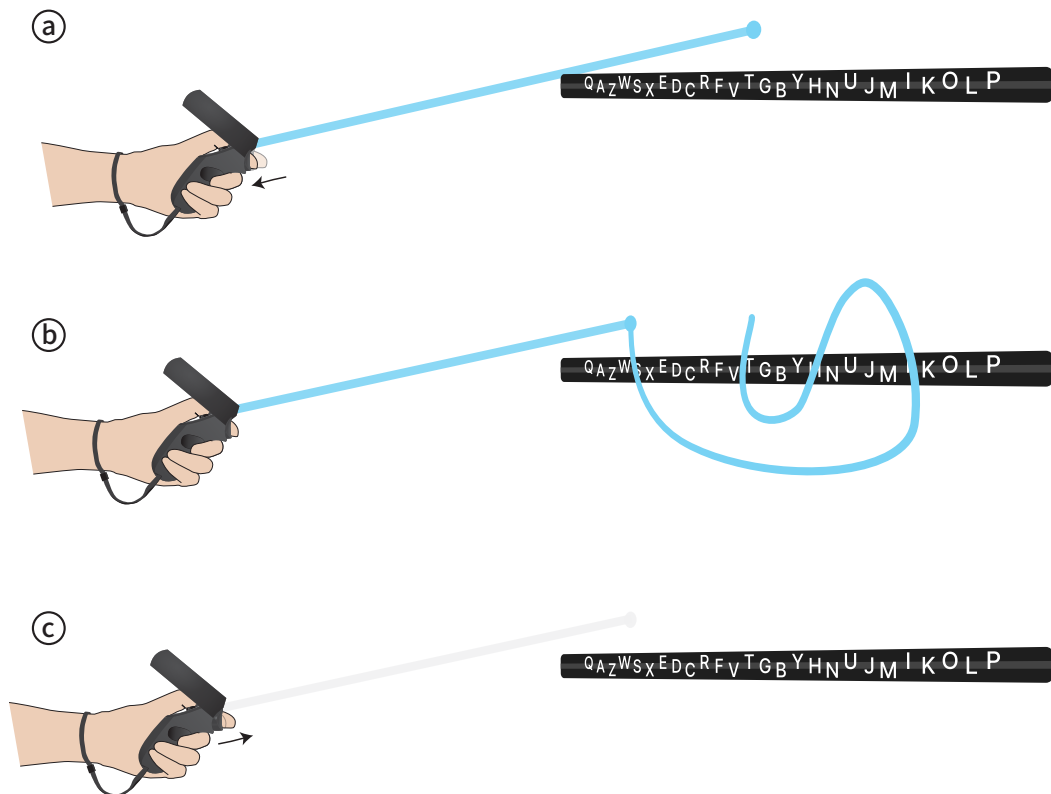


図 3.1: CrossBoard を用いた単語入力の手順．ここでは “this” を入力している． a：ユーザはまずコントローラのトリガボタンを引く． b：ユーザはクロッシングにて ‘t’，‘h’，‘i’，‘s’ の順にキーを選択する． c：ユーザはトリガボタンを離す．トリガを離すことで単語の予測変換が行われる．

単語入力の手順を図 3.1 に示す．ユーザは単語を入力する際，まずコントローラのトリガボタンを引く（図 3.1a）．トリガボタンを押している間に，入力したい文字キーにカーソルをクロッシングさせることで，文字入力を行う（図 3.1b）．カーソルがキーを横切った時，ユーザには打鍵した音を模した音声，コントローラの振動，およびキーボード水平方向の線がフラッシュする視覚フィードバックが行われる．この時，ユーザは正確にキーを選択する必要

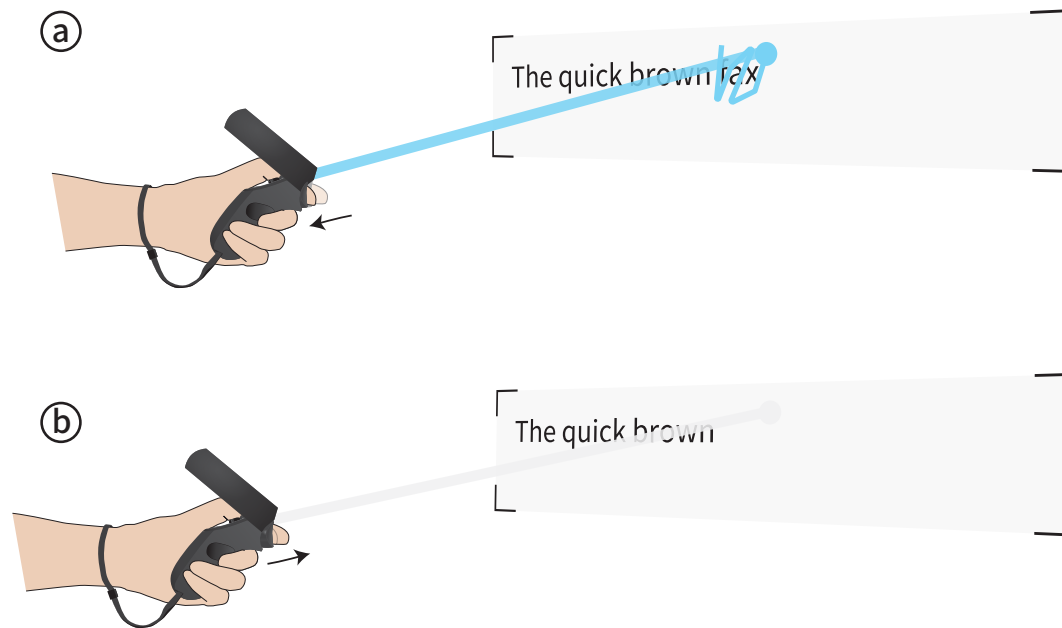


図 3.2: 単語の削除. a: ユーザはトリガボタンを引いたまま削除したい範囲をカーソルにて3往復以上擦る. b: ユーザがトリガを離すと、擦られた範囲の単語が削除される.

はなく、おおよその位置を選択して文字入力を行う. 単語を構成する文字を入力し終えたのちユーザがトリガボタンを離したとき、単語の予測変換が行われ、所望の単語が入力される (図 3.1c).

3.2.2 単語削除

単語の削除は、入力済みの単語を塗りつぶす操作 [FIM13] にて行われる (図 3.2). ユーザは削除したい単語の上にカーソルを合わせ、トリガボタンを引き、そのまま削除したい範囲をカーソルにて3往復以上擦る (図 3.2b). このとき擦られた範囲に応じて単語削除を行う範囲は変化する. ユーザがトリガを離すと、擦られた範囲の単語が削除される (図 3.2a). 広範囲にわたる単語の削除を行ったとき、単語の分かち書きは英文として自然な形に修正される.

第4章 実験1：キーボードの大きさが空間モデルと主観評価に与える影響

キーボードの大きさによるキー選択の精度および主観評価を比較するために実験を実施した。

4.1 実験の動機

CrossBoard における、キー選択がどの程度正確に行われるかはキーボードの大きさによって変化する可能性がある。また、CrossBoard におけるキーボードの大きさがユーザの好みおよび作業負荷にどのような影響があるのかについて議論する必要がある。そこで、キーボードの大きさによってユーザのキー選択の精度、ユーザの作業負荷およびキーボードの大きさに関する好みを調査した。

4.2 設計

本実験では、実際の文書入力を模したタスクを行うため、CrossBoard の Wizard of Oz を用いた文章転写タスクを行った。実験に用いたキーボードでは、キー選択時に入力欄には入力単語の代わりに「・」が入力されるため、実験参加者は自身がどのキーを選択したのかを知ることができないようになっている。ただし、入力単語の削除が可能であり、実験参加者が誤ったキー選択を行ったと感じた場合は単語単位の再入力が可能である。

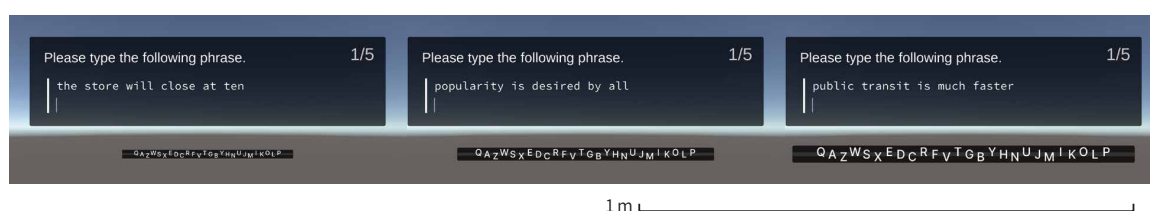


図 4.1: 実験 1 において比較対象のキーボードの大きさ。左：Small 条件。中央：Medium 条件。右：Large 条件。

実験では、キーボードの大きさについて 34.62 cm (Small 条件), 51.92 cm (Medium 条件), 69.23 cm (Large 条件) の 3 条件を比較した (図 4.1)。Small 条件の大きさは Oculus Quest にてキーの文字を読むことができる最小の大きさとして実験的に決定された。Large 条件の最大

の大きさは視野角の±20度程度を占める大きさとして決定された。視野角の±20度程度を最大の大きさの基準としたのは、15度から20度以上離れた点への視線移動は疲労や不快感を発生させる可能性があるため[YHD⁺14]、これ以上の大きさに関する検証を積極的に行う必要がないと考えたためである。また、Medium条件はSmall条件およびMedium条件の間の大きさになるように決定した。各条件において、各キーの文字の相対的な大きさおよび位置関係は同一になっている。またキーボードの上部に表示されるユーザが入力した文を表示するウィンドウ（入力ウィンドウ）の大きさは各条件間で同一である。キーレイアウトは、実際のQWERTYキーボードの配置に合わせてキーの位置を上下にずらしたレイアウトを採用しており、また、キーボードの両端には端のキーの選択を容易にするため、空白領域をそれぞれキー2つ分設けている。キーボードおよび入力ウィンドウは同一の平面に存在し、その平面から実験参加者の頭部までの距離は、1mとし¹、視線の正面は入力ウィンドウとキーボードの間となるようにした（図4.2）。

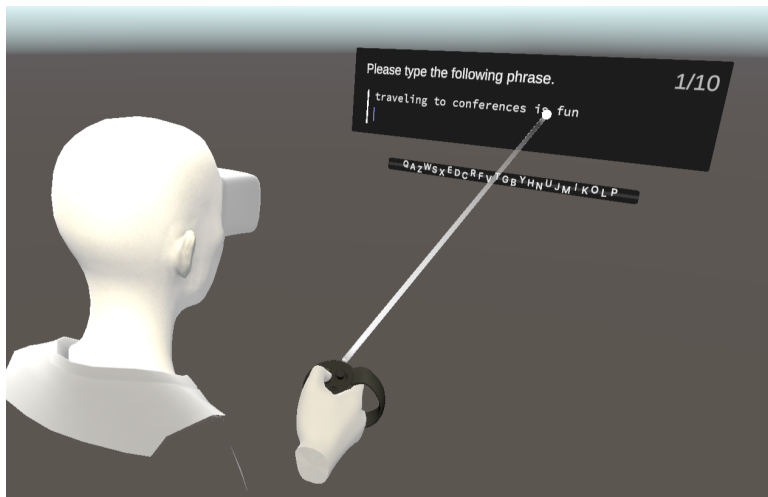


図 4.2: 実験のセットアップ。

4.3 実験参加者

筑波大学所属の大学生および大学院生の15名（年齢21–24歳： $M = 22.80$, $SD = 1.08$, 身長161–182cm： $M = 171.5$, $SD = 6.32$, 男性12名, 右利き12名, 眼鏡あり6名）を実験参加者とした。実験参加者全員が普段からQWERTYキーボードを使用している。また、P15については英語を第2言語として、日本語を第3言語としており、ジェスチャキーボードを普段から使用している。実験前に1–7段階のリッカート尺度（高いほど「ある」、低いほど「ない」）

¹<https://developer.oculus.com/learn/bp-vision/> では、ユーザが長時間注視する可能性のあるGUIでは1mが快適であるとしているため。

にて質問したところ、仮想現実向け HMD の使用経験については平均 1.80 ($SD = 1.082$)、英文を読み写すことへの自信については平均 4.60 ($SD = 1.352$) であった。

4.4 使用機器および実装

仮想現実向け HMD として Oculus Quest (片目につき 2880×1600 pixel, 72 Hz) を使用した。実験アプリケーションの実装には Unity を用いた。実験アプリケーションは Oculus Quest 単体で動作するものであり、キーボードをはじめとする UI の表示を鮮明にするため、UI 要素にはコンポジットレイヤ²を使用しており、レンダリングには 4 倍のスーパーサンプリングを用いた。タスクにおいて可能な操作は、単語単位の文字入力および削除と次の文の提示に移る機能のみであり、キャラットの移動は行えない実装だった。

4.5 手順

実験を開始する前に実験参加者には、実験の同意書 (付録 A.1) および事前アンケート (付録 A.2) に回答してもらった。実験参加者には、単語推測を行うキーボードを実装するための調査という実験の意図を説明し、文字入力について、特定の文字にこだわることなく素早く正確に入力するように指示した。このとき、ユーザが意図して間違えた文字入力以外は入力文字列の修正を行わないように指示した。

実験前に、Oculus Quest の瞳孔間距離の調整を行った。また、眼鏡をつけていた参加者による実験では、Oculus Quest に付属の眼鏡用スペーサを装着した。

キーボードの大きさ条件についてラテン方格にてカウンタバランスをとった。各条件にて入力する文章を MacKenzie ら [MS03] の英文の文章セットから実験参加者毎にランダム抽出した。各条件ごとに練習ブロックにて 10 文と本番ブロックで 40 文を 4 回のブロックに分けて入力した。実験中は動揺病³の症状が起きた場合は速やかに休憩を挟むように指示した。また、タスクによる疲労については、ブロック間に最大 5 分間の休憩を任意で取れるようにした。練習セッションも含め、実験を通じて 15 名 $\times$ 3 条件 $\times$ 50 文 = 2250 文を収集した。

各セッション終了後に、10 階級のリッカート尺度による 1 対比較を省略した NASA-TLX (付録 A.3) にて作業負荷を測定し、全セッション終了後に、ユーザの好みのキーボードの大きさと入力しやすいキーボードの大きさを、それぞれ階級とフリーハンドによる記入にて収集した (付録 A.4)。

実験の所要時間は、事務手続きも含め約 120 分であった。実験終了後、実験参加者は謝金として 1720 円を受けとった。

²<https://developer.oculus.com/documentation/unity/unity-ovroverlay/>

³いわゆる、VR 酔い。

4.6 結果および考察

本節では、実験結果の報告およびそれに付随する考察について述べる。また、統計処理前のアンケートの情報を付録 B に示す。

4.6.1 キーの選択位置

ここでは、ユーザのキー選択がどのように行われていたかについて議論する。以降、キーの選択位置に関して論じる際の長さの単位として Key を用いる。Key は各大きさ条件における 1 つのキーが占める幅である。1 Key は、Small 条件において 1.154 cm、Medium 条件において 1.731 cm、Large 条件において 2.308 cm となる。

外れ値の処理

それぞれの条件下における文字入力について、実験参加者に提示した文字ごとにキーボードのどの位置を選択したかを図 4.3 に示す。それぞれの条件において、単語の綴りを勘違いすることにより発生した外れ値（例えば、‘a’を‘o’と‘u’に、‘e’を‘u’に、‘r’を‘l’に間違えるなど）が観察された。そのため、綴りの勘違いによる誤入力を外れ値とするため、キーの中心から 4 キー以上外れた入力を外れ値とみなした。

ずれ

ここで、各キーの選択位置が各キーの中心からどれだけ離れていたのかをずれと呼ぶ。キーボードの大きさ条件ごとの各キーの選択位置のずれの平均を図 4.4 に示す。独立変数をキーおよびキーボードの大きさ、従属変数をキーの選択位置として反復測定二元配置分散分析を行ったところ、キーによる有意な主効果が存在し、キーボードの大きさによる有意な主効果はなく、また有意な交互作用が存在した（キー $F_{25,342} = 3.429, p < .001$ 、キーボードの大きさ $F_{2,40} = 1.420, p = .254$ 、交互作用 $F_{50,51063} = 2.848, p < .001$ ）。図 4.4 を確認すると全体的にずれは右下がりの傾向にあることがわかり、キーの選択はキーボードの中心方向にずれる傾向にあったことがわかる。また、キーボード中央部（R から N キー）について、3 キー周期のキー選択位置のずれの変化と、端のキー（Q および P キー）における全体の右下がりの傾向から逸脱する傾向が確認された。これは、キーボード中央部についてはキーボードのキーレイアウトの変化と一致しており、キーの縦列については中列のキーがある方向にキー選択のずれが発生することがわかる。端のキー選択のズレについてはキーボードの左右両端の空白領域方向へずれたものである。このことから、キーボードの視覚設計が、ユーザのキーの選択位置に影響を与えたことが示唆される。

図 4.5 より視覚設計の影響が、参加者によって異なることがわかる。P2 は他の実験参加者と比べて視覚設計の影響を大きく受けており、1 Key を超えるずれがキーボードのレイアウトと一致するように発生している。P2 は「今のキーボードの形だと、QWERTY のタテ 3 文字づつ

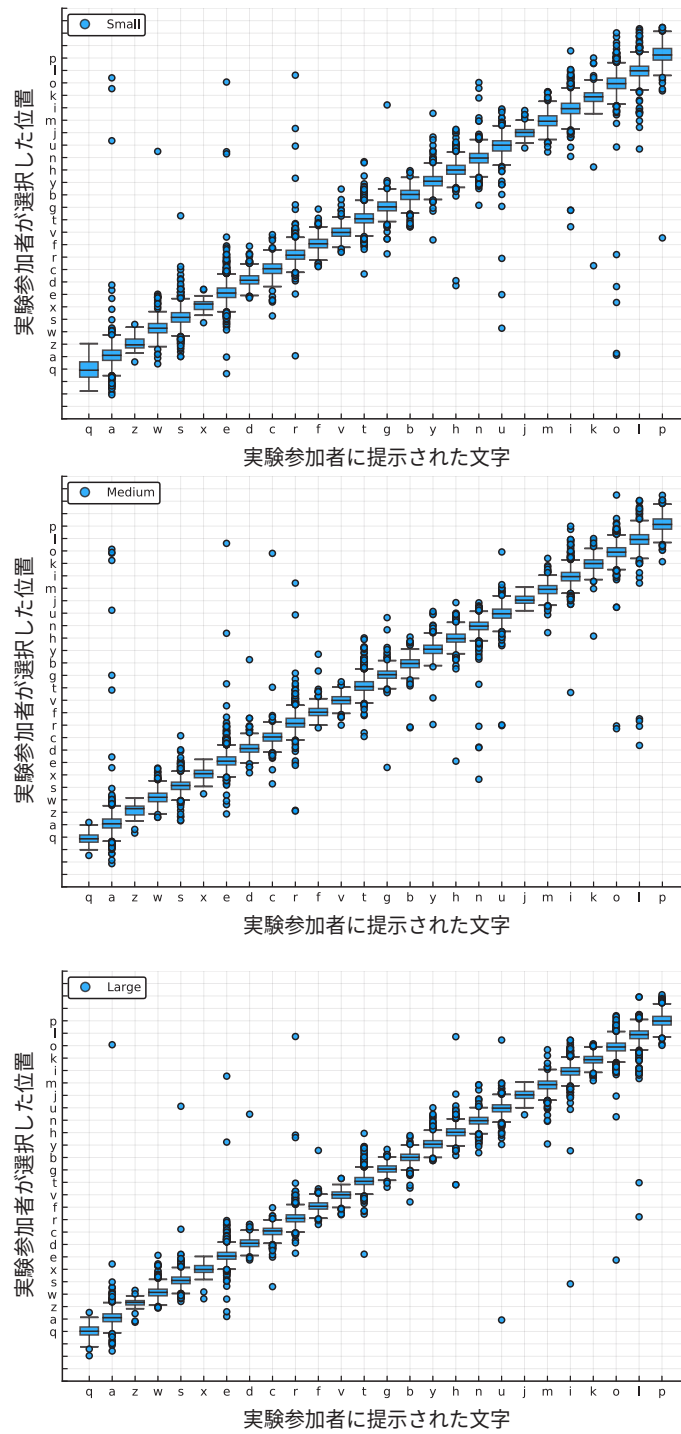


図 4.3: 各条件における各文字ごとの実験参加者が選択した位置. 上: Small 条件, 中: Medium 条件, 下: Large 条件.

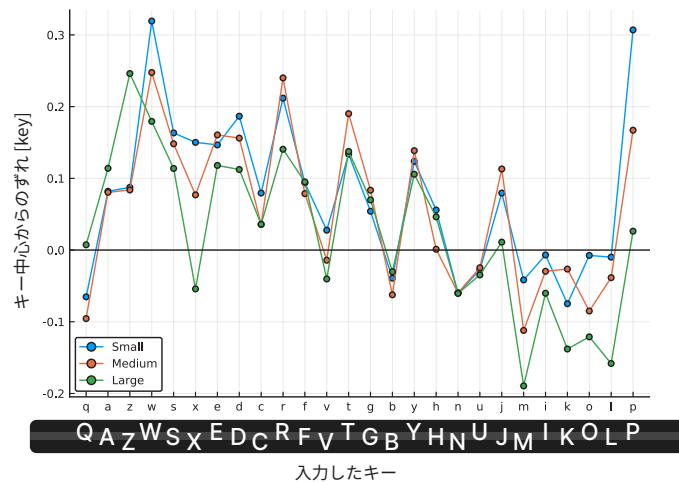


図 4.4: キーボードの大きさごとの各キーの選択位置のずれ。縦軸正方向はキーボード右方向へのずれを意味する。

で区切られている印象で実験中もそれを元に入力を行った」と報告しているため、QWERTY配列の行の中心のキーに分布が偏るような選択をしたことが考えられる。

ただし注意すべきなのは、程度は違うもののこの傾向がP2を除いても発生していることである。図 4.6 に P2 を除いたキー選択位置のずれを示す。このように全体的なずれの傾向においても、P2 より極端ではないもののキーボードの視覚設計の影響が発生していることが確認できた。

ばらつき

ここで、各キーの選択位置のずれを基準⁴とした、キー選択の標準偏差をばらつきと呼ぶ。キーボードの大きさについてばらつきにどのような差があるのかを調べるために、キーボードの大きさごとの各キーの選択位置のばらつきを図 4.7 に示す。独立変数をキーおよびキーボードの大きさ、従属変数を各キーごとのキー選択の標準偏差として反復測定二元配置分散分析を行ったところ、キーおよびキーボードの大きさについて主効果が存在した (Greenhouse-Geisser の補正を用いたもの、キー $F_{25,299.27} = 5.249, p < .001$, キーボードの大きさ $F_{2,28.31} = 26.40, p < .001$)。このことから、キーボードが大きくなるにつれて相対的にキー選択のばらつきが小さくなっていること、キーによって選択精度が異なることがわかる。

実験参加者ごとの各キーの選択位置のばらつきを図 4.8 に、実験参加者とキーボードの大きさ間についてキーの選択位置のばらつきを図 4.9 に示す。キーボードの大きさとキーの選択位置についてピアソンの無相関検定を行ったところ、有意な負の相関が示された ($r = -0.306, t = -2.11, p < .05$)。また、図 4.8 から、実験参加者ごとの選択精度の差の影響がキーボードの大きさよりも大きいことがわかる。実験参加者によってキー選択のばらつきに差がある原因と

⁴キーによって平均が異なることが示されたため、各キーごとのばらつきを評価する必要がある。

して、「特定の文字にこだわることなく素早く正確に入力するように」という教示に対して各実験参加者が受ける影響に差があり、選択の素早さと正確さの優先度に差があった可能性が考えられる。

4.6.2 作業負荷

NASA-TLX の各下位尺度 (MD, PD, TD, OP, EF, および FR) および平均作業負荷 (WL) の箱ひげ図を図 4.10 に示す。それぞれの尺度について参加者内の分散分析を行ったところ、MD, EF, FR, および WL について有意な主効果が示された。主効果が確認された各尺度について、Holm 法による事後検定を行ったところ、検定を行ったすべての尺度において Small-Medium および Small-Large 間に有意な差が確認された (詳細は図 4.10 を参照)。このことから、Medium および Large 条件の作業負荷は Small 条件に比べて低い傾向にあることが確認された。

4.6.3 主観評価

本節では、実験参加者の主観評価に関して報告する。

好みの大きさの階級

表 4.1: キーボードの大きさに対する実験参加者の好み

	階級		
	1 位	2 位	3 位
Small	0	2	13
Medium	6	9	0
Large	9	4	2

各条件のキーボードに対する実験参加者の好みを表 4.1 に示す。フリードマン検定を行ったところ、手法間の好みについて有意差はなかった ($\chi^2(2) = 0.25, p = 0.883$)。全体的な傾向として、Large および Medium が好まれ、Small が最も好まれない手法であるという傾向が観察された。

使いやすい大きさ

各条件のキーボードについて実験参加者に使いやすいキーボードの大きさを手書きさせた結果を図 4.11 に示す。ただし、図 4.11 において、参加者が塗りつぶしにて削除した部分については削除している。参加者が使いやすいと感じたキーボードの大きさの平均は 61.07 cm ($SD = 6.892$ cm) であり、これは Medium 条件と Large 条件の間の大きさにあたる。この大きさは図 4.11 上と比較してわかる通り、実験参加者が頻繁に選択していた区間にもあたる。

コメント

最も多く寄せられたのは **Small** 条件の選択が難しいあるいはずれてしまうというコメント (P10–11, P14–15) である。 **Small** 条件の改善策として、文字の大きさを大きくすると文字の探しやすさが改善される (P7) というコメントが寄せられた。 また、 **Large** 条件について大きな動きが要求されたため最も疲れた (P1) というコメントもあった。

キー配列については、「文字が斜めに配置してあるのは見やすくてよかった」 (P7) という意見が存在したものの、「L と I や F と T など間違いやすい」、「K と J がどこにあるかわからないことが多かった」 (P8)、「文字を探す時間が多くを占めた」 (P9) など否定的な参加者もいた。文字が斜めな配列よりもアルファベット配列の方が打ちやすいのではないか (P9) という意見もあった。

身体的な疲労としては、首の疲れ (P12) や足の疲れ (P4–5) が報告された。これらは **CrossBoard** の手法自体ではなく **HMD** の重さや、起立した状態でのタスクによって生じたものと考えられる。また、ヒジをおきたい (P4) という間接的に腕の疲労を訴える報告も存在した。関連する報告として、右手で操作するときにキーボードの左側の文字の入力が難しい (P11) といったものもあったが、P11 からは疲労に関するコメントはなかった。

その他の意見については、知らない単語の入力が難しい、あるいは知っている単語の入力が簡単 (P5, P8)、左手も使ってみたかった (P13; P13 の利き手は右手)、慣れにより打ちやすくなった (P14)、“good implementation method, easy to use” (P15)、手が上下にわずかに動くときに文字が連続して意図せず入力されてしまうことがあった (P11)、などが報告された。

4.7 議論

本節では、実験から明らかになったことについて述べる。

4.7.1 空間モデル

実験結果より、キーおよびキーボードの大きさによってキーの選択位置のずれおよびばらつきが変化することが確認された。また、キーの選択位置のばらつきについて実験参加者ごとの特性の差が存在することが確認できた。以降の実験では、キー選択の特性について実験参加者間の特性の差を考慮せず、平均的な空間モデルを採用するが、このような実験参加者間の特性の差が単語予測の精度に影響を与える可能性がある。

4.7.2 最適なキーボードの大きさ

実験から、**Medium** および **Large** 条件における作業負荷が **Small** 条件に比べて低く、実験参加者にとって **Large** 条件が最も好みの大きさであることが、有意差はないものの示された。また、実験参加者の多くが **Medium** 条件と **Large** 条件の間の大きさのキーボードが使いやすいと感じたことが報告している。このことから、参加者が好んだキーボードの大きさの平均で

ある 61.07 cm を以降の実験では採用する。ただし、今回参加者が報告した好みの大きさには、実験にて提示したキーボードの大きさが影響している可能性が考えられる。また、参加者が報告した大きさにはある程度ばらつきがあるため、参加者が好んだ大きさの平均がすべてのユーザにとって使いやすい大きさとは限らないことにも注意が必要である。

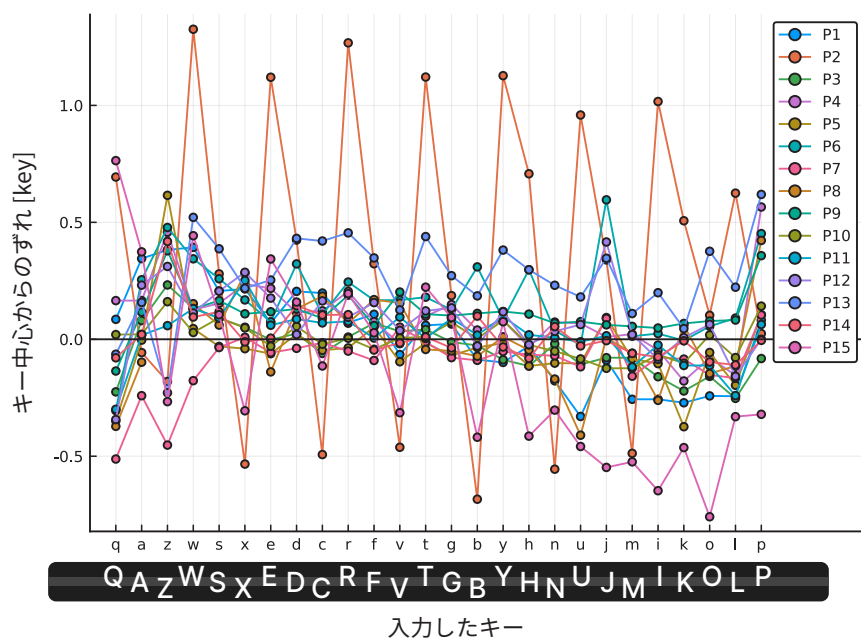


図 4.5: 実験参加者ごとの各キーの選択位置のずれ。縦軸正方向はキーボード右方向へのずれを意味する。

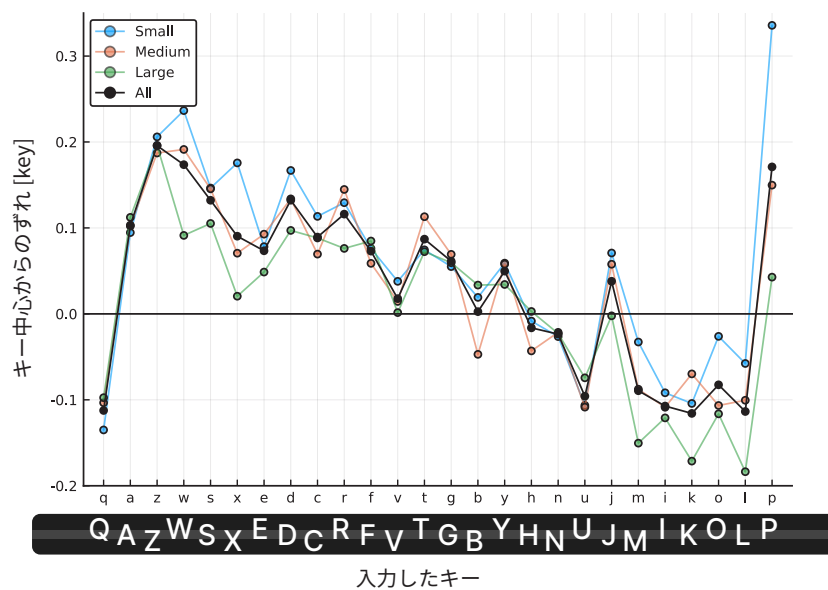


図 4.6: P2 を除いたときのキーボードの大きさごとの各キーの選択位置のずれ。縦軸正方向はキーボード右方向へのずれを意味する。

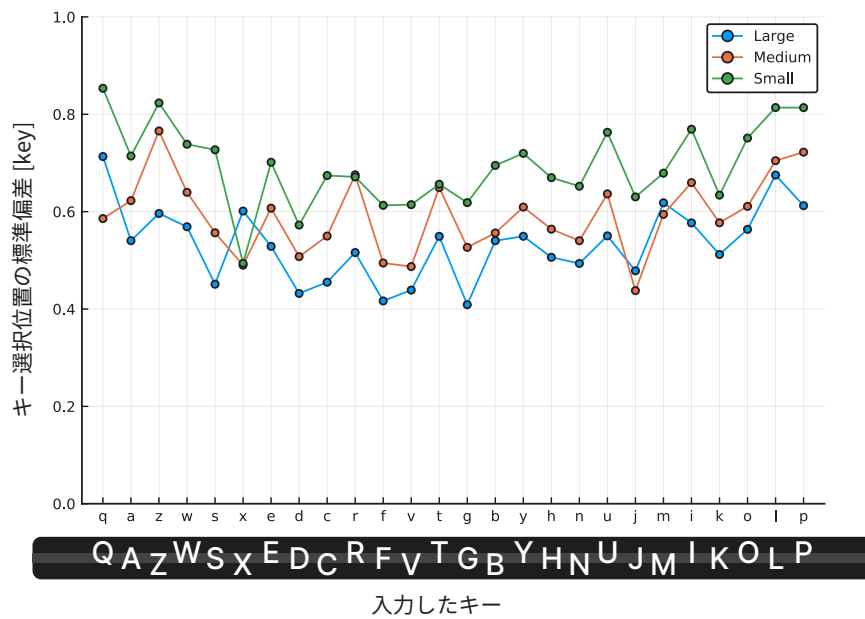


図 4.7: 大きさ条件ごとの各キーの選択位置のばらつき。縦軸正方向はキーボード右方向へのずれを意味する。

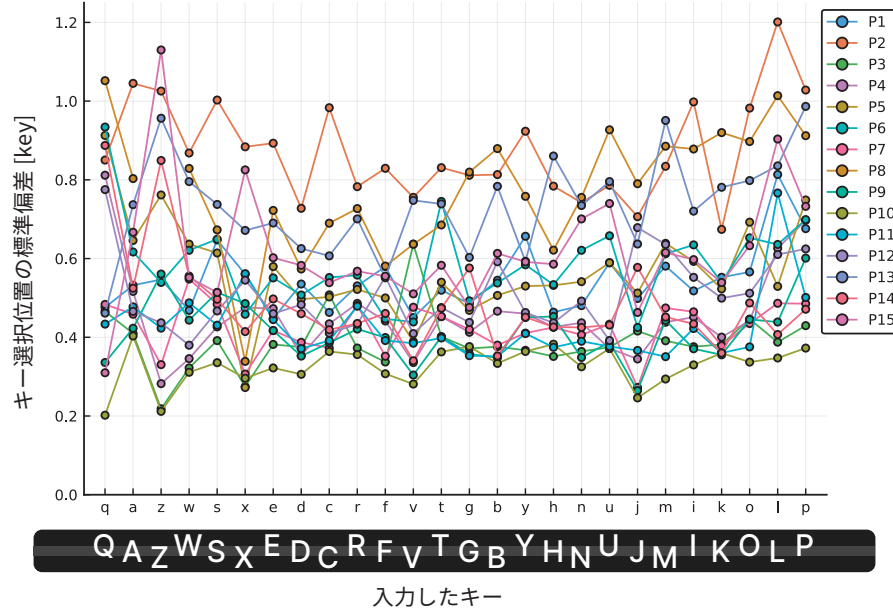


図 4.8: 実験参加者ごとの各キーの選択位置のばらつき。縦軸正方向はキーボード右方向へのずれを意味する。

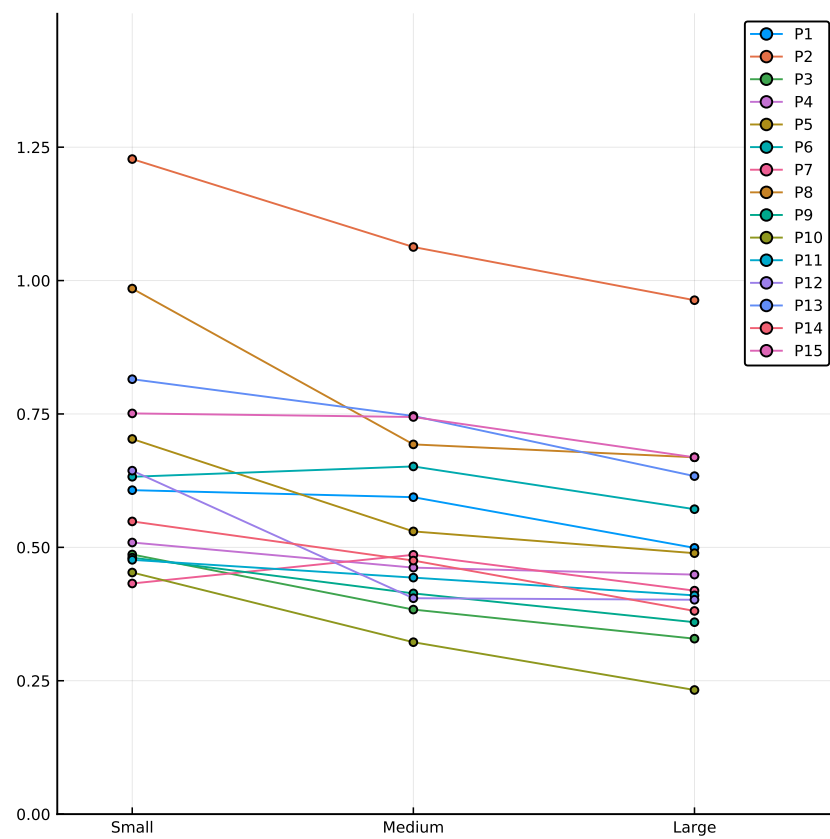


図 4.9: 実験参加者ごとの各キーボードの大きさにおけるキーの選択位置の標準偏差.

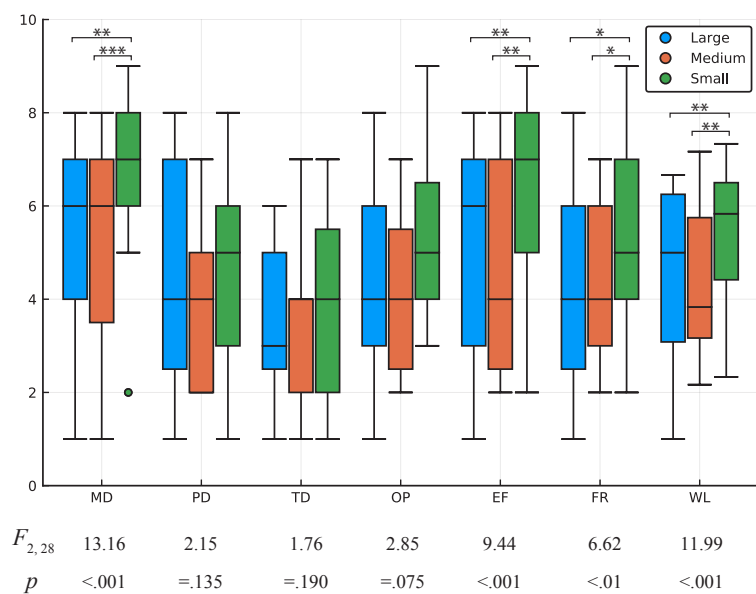


図 4.10: 大きさ条件ごとの NASA-TLX の各下位尺度および作業負荷. MD：知的・知覚的要求, PD：身体的要求, TD：タイムプレッシャー, OP：作業成績, EF：努力, EF：フラストレーション, WL：作業負荷（下位尺度の平均）.

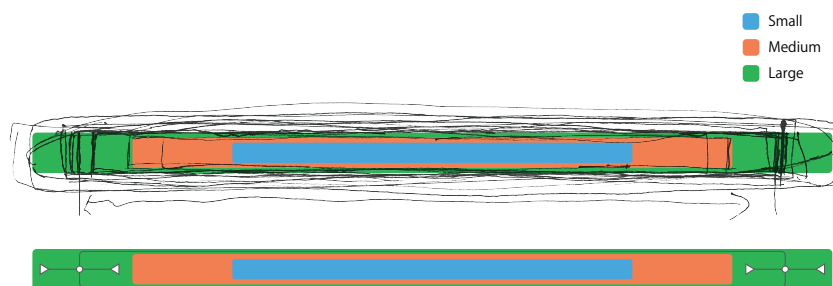


図 4.11: ユーザが使いやすいと感じたキーボードの大きさ. 上：ユーザーが手描きしたものを重ねて表示したもの（塗りつぶし訂正などは削除した）. 下：大きさの平均および標準偏差を描き出したもの.

第5章 単語推測機能を備えた CrossBoard の実装

本章では、単語推測機能を備えた CrossBoard の実装について、単語推測機能および推測した単語の選択機能の実装について述べる。

5.1 単語推測機能

CrossBoard における各キーの選択はおおよその位置にて行われるため、ユーザが入力しようとした単語の予測機能が必要となる。CrossBoard では [YYX⁺17, GXG⁺18, ZYW⁺18] にて採用されている手法を参考に単語予測を行う。候補単語 $w = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$ (l_i は文字, 候補単語の長さ m は $n \leq m$ を満たす) とした時, クロッシングした座標列 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ に対して, 候補単語 w が入力された確率はベイズの定理から以下のように記述できる。

$$p(w|X) = \frac{p(w) \cdot p(X|w)}{p(X)} \quad (5.1)$$

ここで, $p(w)$ は単語 w が出現する確率 (言語モデル), $p(X|w)$ は単語 w が入力されたときクロッシングした座標列 X が出現する確率である。 $p(X|w)$ について, それぞれのキー選択について独立を仮定すると以下のようになる。

$$p(X|w) = \prod_{i=1}^n p(x_i|l_i) \quad (5.2)$$

$p(x_i|l_i)$ は, キー l_i を選択した時の選択位置の確率分布である。ここで, X は候補単語を計算する時一定のため, $p(X)$ は一定である。そのため, 候補単語は以下の式から求まる。

$$w_{\text{predicted}} = \arg \max_{w \in L} \left(p(w) \cdot \prod_{i=1}^n p(x_i|l_i) \right) \quad (5.3)$$

しかしこの式では $p(w)$ が大きく, かつ文字数が長い単語が誤って表示されやすいという問題がある。そこで, 入力された文字数 n に比べて長い候補単語に対するペナルティを加えた以下の式を採用した。

$$w_{\text{predicted}} = \arg \max_{w \in L} \left(p(w) \cdot \prod_{i=1}^n p(x_i|l_i) \cdot \alpha^{m-n} \right) \quad (5.4)$$

ここで α^{m-n} (ただし, $0 \leq \alpha < 1$) は, ユーザのキー入力が少ない時に出現確率が高く, 文字数の多い単語の尤度を抑えるペナルティである.

式 5.4 にて, 使用する各種パラメータについて以下の通りに設定した.

$p(w)$ 言語モデルとして, ANC (American National Corpus) [Ame21] から出現頻度の高い 70000 単語¹を使用した.

$p(x_i|l_i)$ 空間モデルは正規分布の確率密度関数にて表現した. 各キーごとの平均および標準偏差を実験 1 の結果から各キーごとに線形近似して求めたものを用いた. 使用した空間モデルを表 C.1 に示す.

α 実験的に値の調整を行い $\alpha = 0.6$ に設定した.

5.2 候補単語の選択機能

単語予測機能を実装した CrossBoard における文字入力の様子を図 5.1 に示す. 実験 1 にて使用したキーボードの上部に候補単語リストを表示する領域を追加した. 候補単語は左から第一・第二・第三・第四候補となっており, 左に表示されている単語ほど尤度が高いものである. 第一候補の予測単語は自動的に入力欄に書き込まれ, ユーザがそのまま次の単語入力を行った場合, 第一候補の単語が自動的に入力される. 第一候補の予測単語が意図しない単語の場合, ユーザは予測単語リストから意図した単語を探し選択することにより意図した単語の入力ができる (図 5.1b, c).

¹事前にアルファベット以外が含まれる単語を取り除く処理をした.

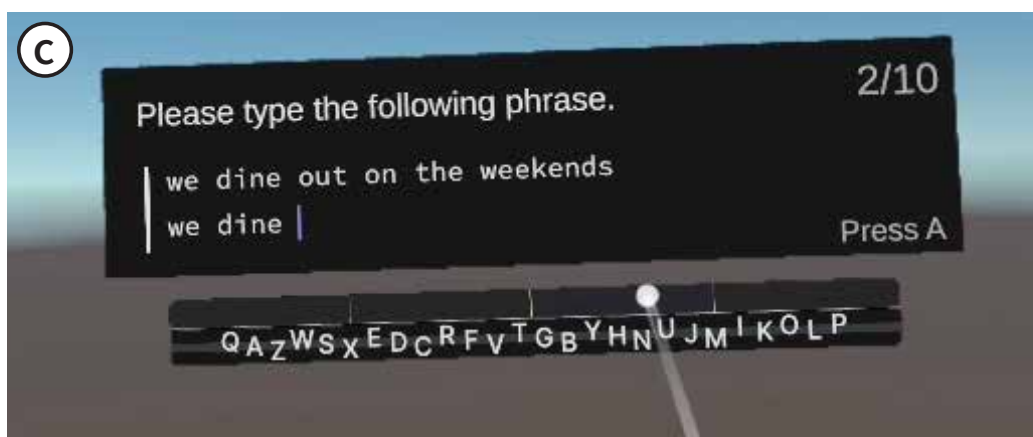
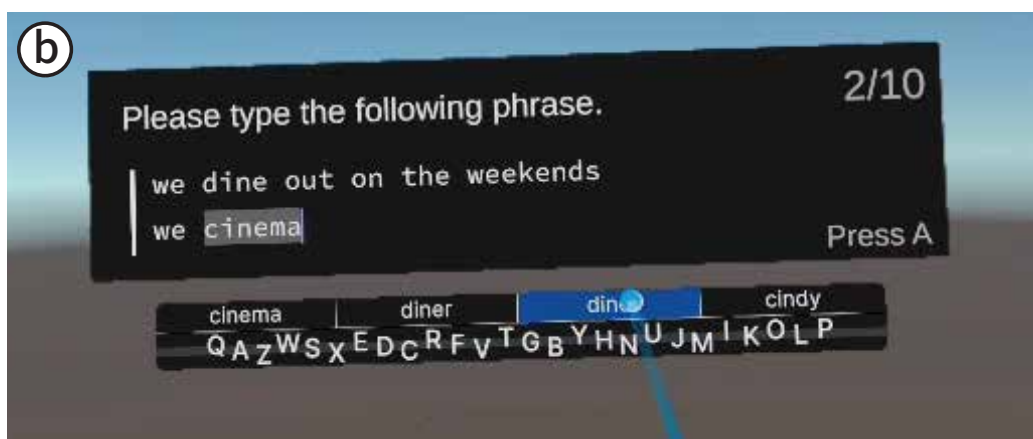
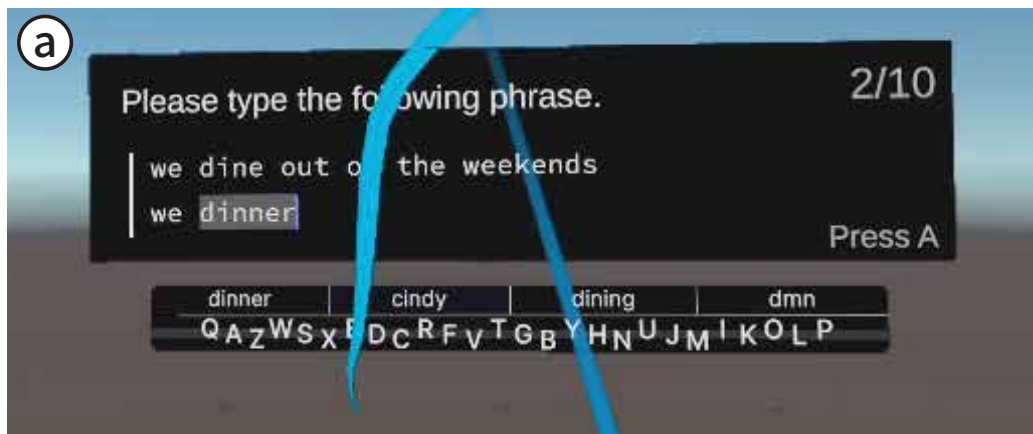


図 5.1: 予測単語機能を備えた CrossBoard にて “dine” と入力する様子. a: ‘d’, ‘i’, ‘n’, ‘e’ と入力し終わった様子. b: 候補単語から “dine” を選ぶ様子. c: “dine” が入力された様子.

第6章 実験2：ポインティングによる選択を用いた QWERTY キーボードとの比較

本手法とポインティングによるキー選択を用いた QWERTY キーボードとの比較実験を行った。

6.1 設計

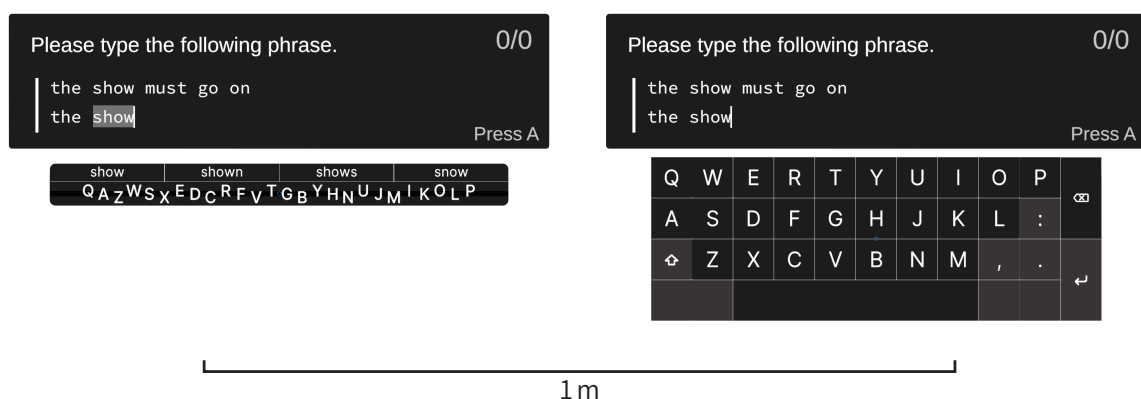


図 6.1: 実験 2 において比較対象のキーボード。左：本手法（CrossBoard）。右：ポインティングによるキー選択を用いた QWERTY キーボード（2D Keyboard）。

実験では本手法（CrossBoard）とポインティングによるキー選択を用いた QWERTY キーボード（2D Keyboard）について文字転写タスクを行った。図 6.1 にそれぞれのキーボードを示す。キーボードの大きさは CrossBoard について $61.07 \times 5.57 = 340.16 \text{ cm}^2$ ，2D Keyboard について $60.00 \times 21.82 = 1309.09 \text{ cm}^2$ としており，CrossBoard は 2D Keyboard の約 26% 程度の面積となっている。2D Keyboard は，Oculus Quest の標準キーボード¹のレイアウトを模したものである²。2D Keyboard は，両手のコントローラにそれぞれ対応するカーソルにて操作を行う。カーソルをキーに合わせてコントローラのトリガボタンを押すと，キーに対応した文字が入力される。キーボードの入力中において，最後に操作したコントローラに対応する

¹バージョン 23 時点。

²ただし，Oculus の標準キーボードは湾曲したキーボードとなっているが，今回の実装では平らなキーボードとした。

カーソルのみが GUI との相互作用を行う。³最後に操作されたカーソルがキー間を跨ぐときもしくはキーがクリックされた時、ユーザには音とコントローラの振動によるフィードバックが提示される。また、キーの上に最後に操作されたカーソルがある場合には、キーの色を変化させるようにした。この最後に操作されたカーソルにまつわる振る舞いは Oculus Quest の標準キーボードの実装を真似たものである⁴。

6.2 実験参加者

インタラクティブプログラミング研究室所属の大学生および大学院生の 8 名（年齢 22–25 歳： $M = 23.25$, $SD = 1.16$, 身長 156–185 cm： $M = 171.5$, $SD = 9.40$, 男性 7 名, 右利き 7 名, 眼鏡あり 4 名）を実験参加者とした。実験参加者全員が普段から QWERTY キーボードを使用している。実験前に 1–7 段階のリッカート尺度（高いほど「ある」、低いほど「ない」）にて質問したところ、仮想現実向け HMD の使用経験については平均 2.00 ($SD = 1.77$)、英文を読み写すことへの自信については平均 5.13 ($SD = 1.55$) であった。

6.3 使用機器

使用機器については実験 1 と同一である。

6.4 手順

実験を開始する前に実験参加者には、実験の同意書（付録 A.1）および事前アンケート（付録 A.2）に回答してもらった。実験参加者には、可能な限り素早く正確に文字入力するように指示した。

実験前に、Oculus Quest の瞳孔間距離の調整を行った。また、眼鏡をつけていた参加者による実験では、Oculus Quest に付属の眼鏡用スペーサを装着した。

キーボードの各条件については参加者ごとに順序を変えてカウンタバランスをとった。各条件にて入力する文章を MacKenzie ら [MS03] の英文の文章セットからランダム抽出した 50 文を用いた。各条件ごとに練習ブロックにて 10 文と本番ブロックで 40 文を 4 回のブロックに分けて入力した。実験中は動揺病の症状が起きた場合は速やかに休憩を挟むように指示した。また、タスクによる疲労については、ブロック間に最大 5 分間の休憩を任意で取れるようにした。練習セッションも含め、実験を通じて 8 名 $\times$ 2 条件 $\times$ 50 文 = 800 文を収集した。

各セッション終了後に、SUS (System Usability Scale, 質問紙は付録 A.5 を参照) [Bro96] によってユーザビリティおよび 10 段階のリッカート尺度による 1 対比較を省略した NASA-TLX

³このような振る舞いをしているのは、Unity の標準的な UI の実装において複数のカーソルによる操作が想定されていないためであり、Oculus Quest の標準キーボードの振る舞いもこれと一致する。

⁴ただし、Oculus Quest の標準キーボードではユーザに対するフィードバックとして振動は存在しなかった。これは CrossBoard 条件において、キーを押した時に振動フィードバックを与えていたため付け加えたものである。

(付録 A.3) にて作業負荷を測定したのち、各条件のキーボードの大きさが適切であったかと手法に関するコメントを求めるアンケート (付録 A.6) を実施した。実験の所要時間は、約 90 分であった。

6.5 評価指標

評価指標として、単語入力速度 (WPM : Words Per Minute) および未修正エラー率 (UER : Uncorrected Error Rate) を用いた。

WPM ⁵は、文字入力に関する指標であり、ユーザが転写した文字数 $|S_{transcribed}|$ 、入力に要した時間 T としたとき、以下の式から計算される。

$$WPM = \frac{|S_{transcribed}| - 1}{T} \times \frac{1}{5} \times 60 \quad (6.1)$$

ここで、 $|S_{transcribed}|$ から 1 文字分引くのは、ユーザが 1 文字目を打つのに要した時間が計測できないためである。 $\frac{1}{5}$ は、文字あたりの入力速度を単語あたりの入力速度に変換するために使われる定数である。

UER は、最終的に入力された文字列のエラー率に関する指標であり、提示された文字列 $S_{presented}$ とユーザが転写した文字列 $S_{transcribed}$ のレーベンシュタイン距離 $LD(\cdot, \cdot)$ から計算できる。

$$UER = \frac{LD(S_{presented}, S_{transcribed})}{\max(|S_{presented}|, |S_{transcribed}|)} \times 100\% \quad (6.2)$$

ここで $\max(\cdot, \cdot)$ は、2 つの引数のうち大きな値を返す関数である。

6.6 結果および考察

本節では、実験結果およびその考察について述べる。また、統計処理前のアンケートの情報を付録 D に示す。

6.6.1 入力速度

練習ブロックを除くブロックにおける各手法における文ごとの平均文字入力速度は、Cross-Board について 12.86 WPM ($SD = 4.16$)、2D Keyboard について 19.11 WPM ($SD = 4.23$) であった。ブロック間における手法ごとの文字入力速度を図 6.2 に示す。独立変数を手法およびブロック、従属変数を入力速度として反復測定二元配置分散分析を行ったところ、手法およびブロック間について主効果が存在した (手法 $F_{1,7} = 81.01, p < .001$, ブロック

⁵ WPM の単位としては、立体の WPM を用いる。

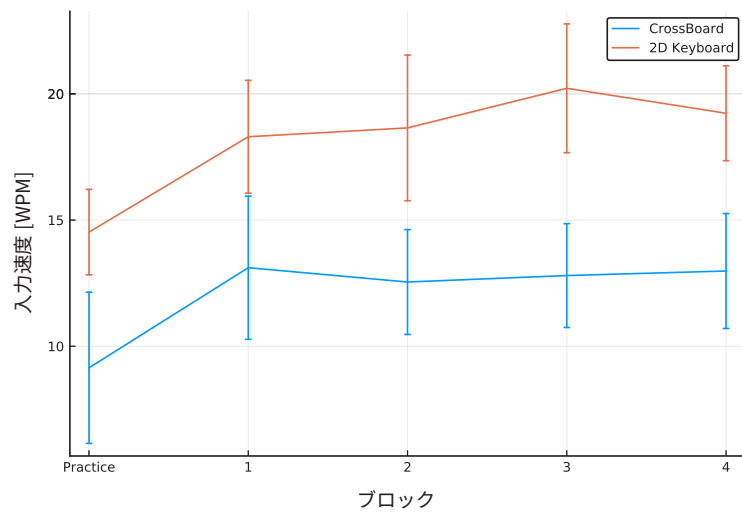


図 6.2: ブロック間における手法ごとの文字入力速度.

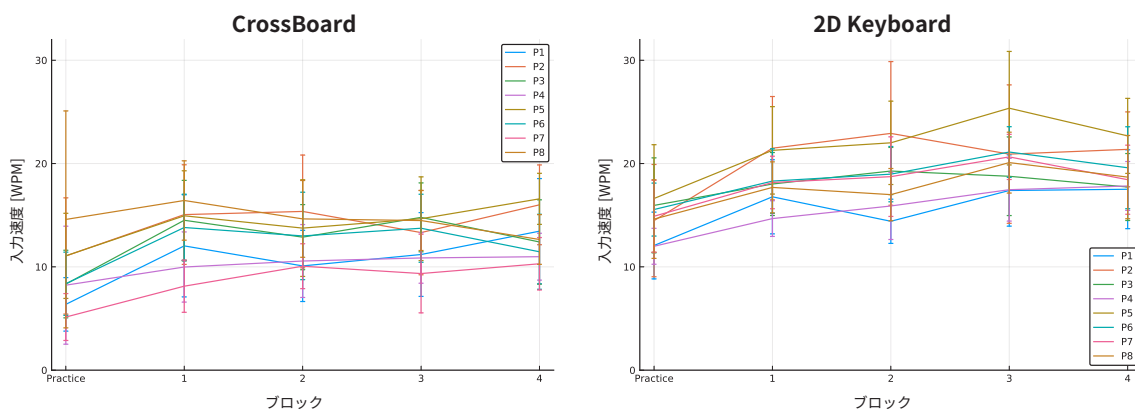


図 6.3: 実験参加者間における手法ごとの文字入力速度.

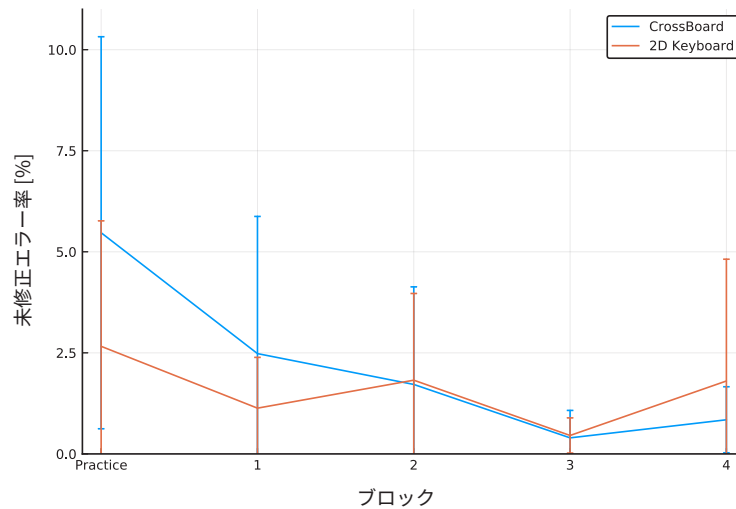


図 6.4: ブロック間における手法ごとの未修正エラー率.

$F_{4,28} = 32.58, p < .001$). CrossBoard は, 通常のキーボードの 67.3% の入力速度を 26% の面積のキーボードにて実現できていると考えられる.

実験参加者ごとに見たときの文字入力速度を図 6.3 に示す. 実験参加者ごとに見た場合, 両手法について P5 が最も文字入力速度が高く CrossBoard では第 4 ブロックにおいて平均 16.58 WPM, 2D Keyboard では第 3 ブロックにおいて平均 25.36 WPM を記録している.

6.6.2 エラー率

練習ブロックを除くブロックにおける各手法における文ごとの未修正エラー率は, CrossBoard について 1.37% ($SD = 7.48$), 2D Keyboard について 1.30% ($SD = 6.70$) であった. ブロック間における手法ごとの未修正エラー率を図 6.4 に示す. 独立変数を手法およびブロック, 従属変数を入力速度として反復測定二元配置分散分析を行ったところ, ブロック間について主効果が存在した (ブロック $F_{4,31.54} = 3.53, p < .05$) であった. ブロック間における未修正エラー率の低減は確認されたものの, 手法間の未修正エラー率について差があるとはいえなかった.

6.6.3 SUS

SUS の得点はそれぞれ, CrossBoard は平均 60.94 ($SD = 22.08$), 2D Keyboard は平均 83.13 ($SD = 5.79$) であった. 各手法の得点は Bangor らの Letter Grade Scale [BKM09] (A から F までの評価, A が最もよい) に読み替えると, CrossBoard は D 評価, 2D Keyboard は B 評価に該当する. 手法間のスコアについてウェルチの t 検定を行ったところ, 有意な差が示された ($t_{7.96} = 2.75, p < .05$).

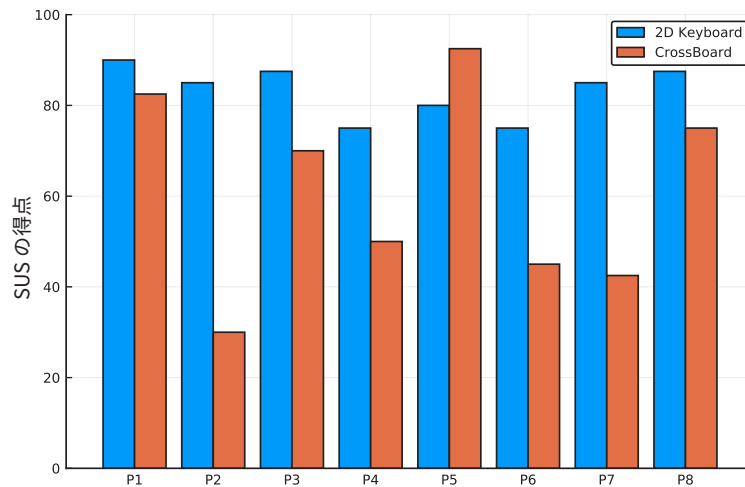


図 6.5: 実験参加者ごとの SUS の得点.

SUS の得点について、CrossBoard の分散が大きいことから参加者ごとの得点を確認して議論を行う (図 6.5). 得点を確認すると、P5 以外の参加者は CrossBoard の得点を 2D Keyboard より低く評価していることがわかる. P5 は実験参加者の中でも CrossBoard における文字入力 が素早かった (図 6.3) ことが確認でき、比較的快適に CrossBoard を使用できていた可能性が 考えられる. 点数が低かった参加者に着目すると、P2, P4, P6-7 は、CrossBoard を 60 点未満 (letter grade scale における F 評価) として評価しており、これらの参加者にとって CrossBoard が使いづらかったことが示唆される. 一方、2D Keyboard は P4 を除く参加者全てが 80 点以上をつけており、点数のばらつきが非常に小さいことがわかる.

このように CrossBoard のユーザビリティについては 2D Keyboard に比べて参加者による差 が大きく、また多くの場合使いづらいことが確認された.

6.6.4 NASA-TLX

NASA-TLX の各下位尺度 (MD, PD, TD, OP, EF, および FR) および平均作業負荷 (WL) の箱ひげ図を図 6.6 に示す. それぞれの尺度について対応のある t 検定を行ったところ、MD について有意な差が示された ($t_7 = 4.07, p < .01$). また、PD を除くすべての尺度について CrossBoard の負荷が高い傾向が確認された.

各参加者ごとの平均作業負荷について図 6.7 に示す. P8 を除くすべての参加者において CrossBoard の作業負荷が高いことがわかる. また、P7 については 2D Keyboard にくらべて CrossBoard の作業負荷が非常に高いことが確認できる. P7 については、CrossBoard における 文字入力が比較的遅く (図 6.3) また実験中も CrossBoard の操作に難儀する様子が確認され たことから、高い作業負荷がかかったと考えられる.

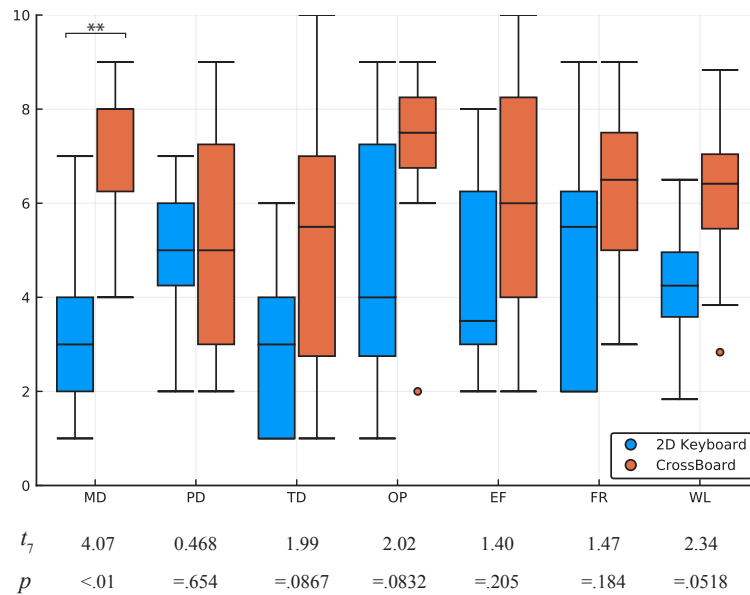


図 6.6: 条件ごとの NASA-TLX の各下位尺度および作業負荷. MD：知的・知覚的要求, PD：身体的要求, TD：タイムプレッシャー, OP：作業成績, EF：努力, EF：フラストレーション, WL：作業負荷（下位尺度の平均）.

6.6.5 主観評価

本節では、参加者の主観評価について述べる.

キーボードの大きさ

実験で使ったキーボードの大きさについて、CrossBoard について「小さすぎた」を選択した 1 名 (P3) を除く 7 名が大きさが適切であったことを報告している. 小さすぎたと報告した参加者にフリーハンドにて適切な大きさを描いてもらったところ、70.5cm を適切な大きさとして報告した. この大きさは実験 1 における Large 条件におけるキーボードよりも少し大きなものである. P3 は、「**L**」を入力したかったのに **P** に触れてしまうのが連続したため」キーボードの大きさを大きくして欲しいと報告している. また、キーボードの大きさについて、適切であったと回答したユーザについて「キーがもう少し大きくてもいいと思った」(P2), 「文字間の間隔がもっと欲しい」(P7) といった意見があった. 2D Keyboard については全員が大きさについて適切であったと報告している.

コメント

CrossBoard を慎重にタイプしようとした参加者において、手の震えによってカーソルがキーボード境界付近を複数跨いでしまうことによるミスタイプが確認された (P7). この際、ミス

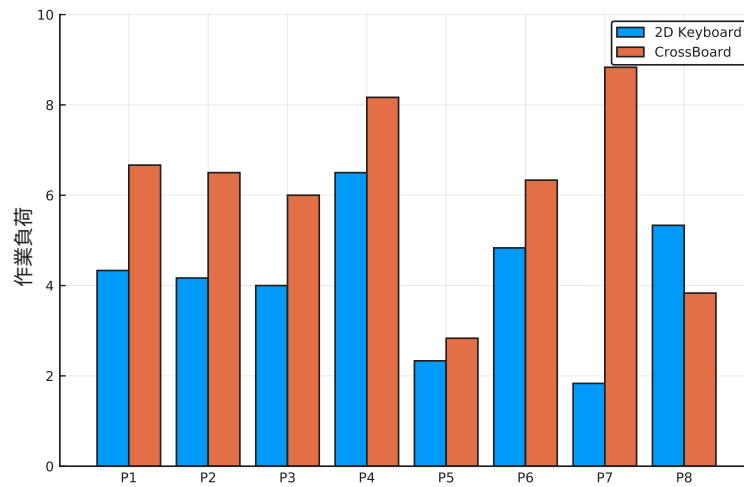


図 6.7: 参加者ごとの作業負荷.

タイプが発生したことに対してより慎重にタイプしようとすることによって、ますますタイプミスが誘発される様子が確認された。このような問題については、クロッシングの判定についてフィルタ [CRV12] をかけた値を用いることでミスタイプを防止できていると考えている。また、P7 は同時に手首が痛くなったことを報告している。このような現象が、P7 における CrossBoard の作業負荷が高かった原因の 1 つとして考えられる。

単語予測機能に関するコメントとして最も多かったのは、入力した文字数と一致しない文字数が表示されるため、入力中にどこまで入力したかを忘れるというコメントである (P1, P4, P7)。このことから、第一候補の単語は入力した文字数と同一の文字数の単語にすべきだと考えられる。その他にも、キー入力が少しでも外れると適切に単語予測が効かないため、ずっとキーを見て入力する必要があったことから、よりずれたキーを選択した場合でもうまく動くようにしてほしいというコメントがあった (P2)。このような理由から候補単語を見る余裕がなく、既に候補単語として表示されているのに入力し続けていることがあると感じたという報告も存在する (P2, P4)。これに関しては今回使用した空間モデルが、単語予測機能を実装していない Wizard of Oz による文章入力によって収集したものであり、単語予測の結果を見ながら入力することがなかったためだと考えられる。このことから、空間モデルの収集タスクを見直す必要があると考えられる。これらの単語予測に関するコメントは、CrossBoard の SUS の得点が比較的低い参加者によるものであり、これらを改善することでユーザビリティの改善が行えると考えている。

また、類似するコメントとしてトリガボタンを離すと候補単語の選択のみしかできなくなるため、意図した単語が候補単語にない場合に単語を消して入力し直す必要があったことが報告されている (P6)。このような振る舞いは、他の実験参加者にも多く見られたため、候補単語についてより多くの候補単語表示機能を実装すべきだと考えている。

その他の CrossBoard に関するコメントとしては、「消去する際に思っていないところが消

されてしまう（多分こする箇所が他の単語にまでかぶっていた）ことがあった」（P1）, 「キー配列になれることが最後までできなかった」（P2）, 「トレーニングによって高速な入力が可能になりそう」（P3）などが報告された。

2D Keyboard については、誤入力に関するコメントが頻繁に報告された（P1-2, P4, P6-8）。改善策としてキー間に間隔を開けることで誤入力が減るのではないかという意見（P2, P4）や、単語予測機能を求める意見（P2）があった。この誤入力の原因は、トリガボタンを引いた際に生じるコントローラのブレだと報告されており（P8）、この誤入力が発生したときにすぐに気づくことが難しいという報告もあった（P7）。また、片方のカーソルのみが有効となる実装が操作しづらいということについても報告されている（P7）。

第7章 今後の課題

本節では、本研究の今後の課題について述べる。

7.1 的確な空間モデルの適応

本研究において、ユーザによって空間モデルが異なることが明らかになった。本節では、この問題を解消するためのアプローチとして、ユーザごとの特性の差を吸収する方針と、ユーザごとの特性の差を削減する方針を紹介する。なおこの二つのアプローチは排他的ではなく、同時に実行可能なものである。

7.1.1 ユーザの操作に応じた空間モデルの適応

本研究における空間モデルは、各キーごとに平均および分散の値を決定しただけのものであり、ユーザの操作特性（例えば、キー選択時のカーソルの速度、そのユーザの過去のキー選択位置の平均および分散）などを考慮したものではない。そのため、キー選択時の操作特性に応じて空間モデルを変更したり、ユーザごとに空間モデルを変更したりすることでユーザごとに的確な空間モデルを適応できると考えている。

7.1.2 GUIの変更による空間モデルの改善

ユーザによって空間モデルが異なることの原因として、ユーザに対してキー選択をどの程度正確に行えば良いかのヒントが「特定の文字にこだわることなく素早く正確に入力する」という曖昧な教示のみだったことが原因だと考えられる。そこで、GUIを変更することで、ユーザによる空間モデルのばらつきを軽減したり、空間モデルにおけるキー選択の分散の大きさを調整したりできると考えている。

GUIの変更案として現在以下の2案を検討している。まず、クロッシングによるキー選択にエリアカーソルを導入する案である（図7.1左）。CrossBoardによる文字入力を行おうとしたときに、カーソルが大きくなるようにした上で、ユーザは「カーソルにキーがぶつかるように」キー選択を行う。次に、クロッシングした地点にどの程度のエラーを許容するのかわかるガイドを表示する案である（図7.1右）。クロッシングしたときに、クロッシングした地点からどの程度外れて良いかわかる視覚的ヒントをフィードバックすることで、ユーザにどの程度のキー選択の精度を要求しているのかわかるようにする。

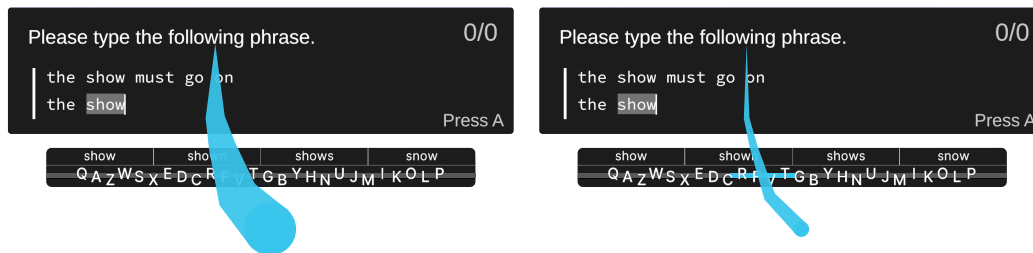


図 7.1: GUI の変更による空間モデルの調整. 左: エリアカーソルを導入した CrossBoard. 右: クロッシングした地点に入力を許容する幅を表示するようにした CrossBoard.

これらの手法を導入した場合、エリアカーソルあるいはガイドの大きさを変更することで、空間モデルを変化させることが可能となる．例えば、入力精度と入力速度のトレードオフから最適なエリアカーソルあるいはガイドの大きさを決定することで、CrossBoard の入力性能を改善できると考えている．

また、エリアカーソルあるいはガイドの大きさの調整を動的に行う手法も考えられる第一に考えられるのが、ユーザがエリアカーソルあるいはガイドの大きさを操作時に調整する手法である．仮想現実向け HMD のコントローラに搭載されるトリガボタンは、トリガの押し込み量を取得できる物が多い．トリガの押し込み量に応じてエリアカーソルあるいはガイドの大きさを変化させることで、ユーザが能動的に空間モデルを選択できる．これによって単語予測がうまくいかない単語をユーザが経験的に知っている場合において、適切な空間モデルを用いて文字入力が行える．第二に考えられるのが、システムがエリアカーソルあるいはガイドの大きさを自動的に調整する手法である．ユーザが一度単語入力に失敗した単語は、空間モデルにおける各キーの選択位置の標準偏差が大きく、単語予測に失敗しやすい可能性が考えられる．このような場合にエリアカーソルあるいはガイドの大きさを自動的に小さくすることで、単語予測を成功しやすくできる．

7.2 他のキー配列の検討

本研究では、ユーザが打ち慣れている QWERTY 配列を潰した配列を用いることで学習コストの低減を図ろうとしたが、ユーザによってキーの探しやすさには賛否があった．そのため、他の配列としてアルファベット配列 (ABC...XYZ のような配列) や ENBUD 配列 [WST14] による実験も行うべきであると考えている．また、これらの配列では CrossBoard にあった QWERTY 配列を模したキーの上下方向のズレを再現しなくて良いため、空間モデルについて変化が生じる可能性がある (第 4 章参照)．そのため、これらの配列における空間モデルの評価実験を再度行う必要がある．

7.3 熟練者における性能評価

本研究における CrossBoard の評価実験は、初心者における性能評価に限られており熟練者における性能評価は行われていない。そのため、より長期的な評価実験を実施することで、CrossBoard における性能の上限を確認できると考えている。

7.4 他のレイキャスト手法の評価

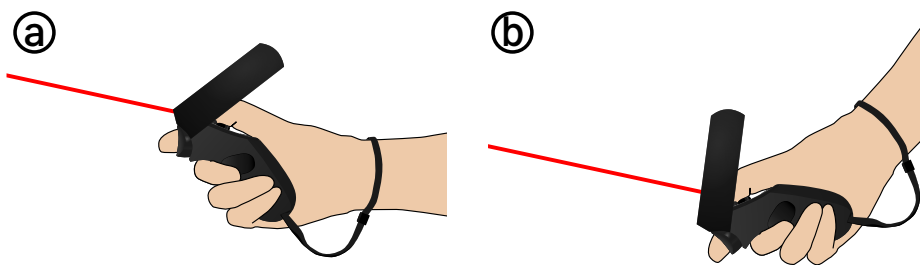


図 7.2: 比較対象のレイキャスト手法. a : Gun テクニック. b : Wand テクニック.

商用の機器およびアプリケーション内にてよく用いられるレイキャスト手法間の比較実験が必要であると考えている。図 7.2 に比較を予定しているレイキャスト手法を示す。Gun テクニックはコントローラを銃と見立てたときグリップからレイを銃口の方向に投影する手法であり、Wand テクニックはコントローラを杖と見立てたときグリップからレイを杖の先の方向に投影する手法である。それぞれの手法は特性の比較研究が仮想現実以外の文脈にて行われている [MBN⁺02] もの、ポインティングデバイスとスクリーン間の距離を固定した条件下における比較であり、頭部からスクリーンの距離を固定した条件下¹における比較ではない。Gun テクニックと Wand テクニックでは操作する際の手の位置が異なる可能性があるため、ポインティングデバイスとスクリーン間の距離を固定した条件下において頭部からのスクリーンの位置が変化する可能性がある。レイキャスト手法が異なることにより空間モデル、入力速度、ならびに作業負荷が変化する可能性があるため比較実験を考えている。

7.5 仮想現実以外への応用

本節では CrossBoard の仮想現実向けの文字入力手法以外への応用について議論する。

¹仮想現実における GUI の位置は、ある時点でのユーザの頭部の位置に基づいて決定されることが多い。

7.5.1 拡張現実向け HMD / スマートテレビにおける文字入力

スクリーン視野角が狭い傾向がある透過型の拡張現実向け HMD では、表示面積の少ない CrossBoard を利用する利益は多い。Magic Leap One および HoloLens 2 におけるスクリーン視野角は 50 から 52 度程度であり通常の仮想現実向け HMD のおよそ半分以下 [Kre19] である。このような拡張現実向け HMD において、表示面積の少ない CrossBoard は有用であると考えている。

またスマートテレビの検索画面では、入力単語に応じて候補となるコンテンツを表示する場合があるが、通常の QWERTY キーボードを採用した場合、表示面積の多くをキーボードが占める。このような状況において CrossBoard を採用することによって、候補となるコンテンツをより多く表示できると考えている（図 7.3）。

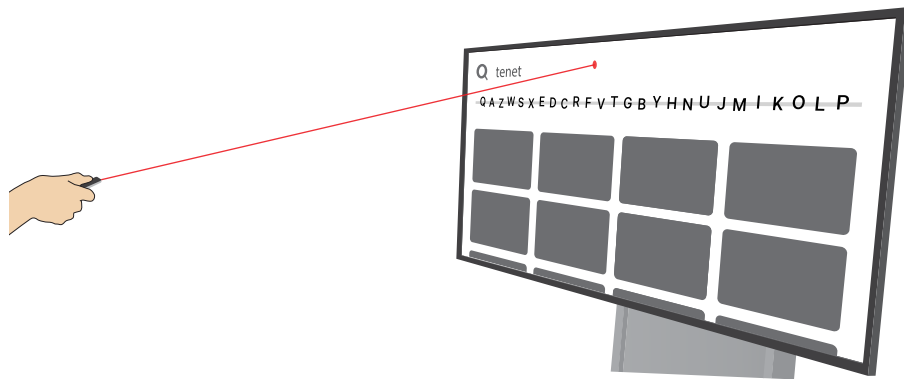


図 7.3: CrossBoard のスマートテレビへの応用。CrossBoard を利用することで他のコンテンツの表示領域を確保している。

7.5.2 ショートカットへの応用

エキスパート向けの仮想現実におけるアプリケーション（例えば、モデリングアプリ）が複雑化することで、ホットキーのようなショートカットが必要となっていく可能性がある。しかし、ホットキーを実装する程度のボタンを現在の仮想現実向けコントローラは搭載していない。

そこで HotKey の代わりに CrossBoard による HotStrokes [CZL⁺19] を実装することによってショートカット機能が実現できると考えている。CrossBoard による HotStrokes の操作を、モデリングアプリにおける平面の削除を例にして説明する（図 7.4）。まず、ユーザは削除したい平面にカーソルを合わせて（図 7.4a）、トリガボタンを引くと CrossBoard が表示される（図 7.4b）。トリガボタンを引いたまま、実行したい操作に対応するコマンド（ここでは、削除に対応するコマンドを “Del” とする）を入力し（図 7.4c）、トリガボタンを離すことで入力したコマンドが実行される（図 7.4d）。

7.6 大文字／小文字の変更，約物および数字の入力

本研究では，CrossBoard のアルファベットの太文字／小文字の変更のための機能（例えば，Shift, CapsLock キー），約物（例えば，ピリオド，カンマ，クエスチョンマークなど）および，数字の入力機能については実装していない．そのためこれらの文字について入力可能な機能を追加する必要がある．

また，大文字小文字変換および約物の入力については，単語予測機能の強化によってより効率的な入力が可能となる．例えば，英文入力における単語の自動キャピタライズ機能，文脈に合わせて候補単語中に約物を表示する機能を追加する必要がある．

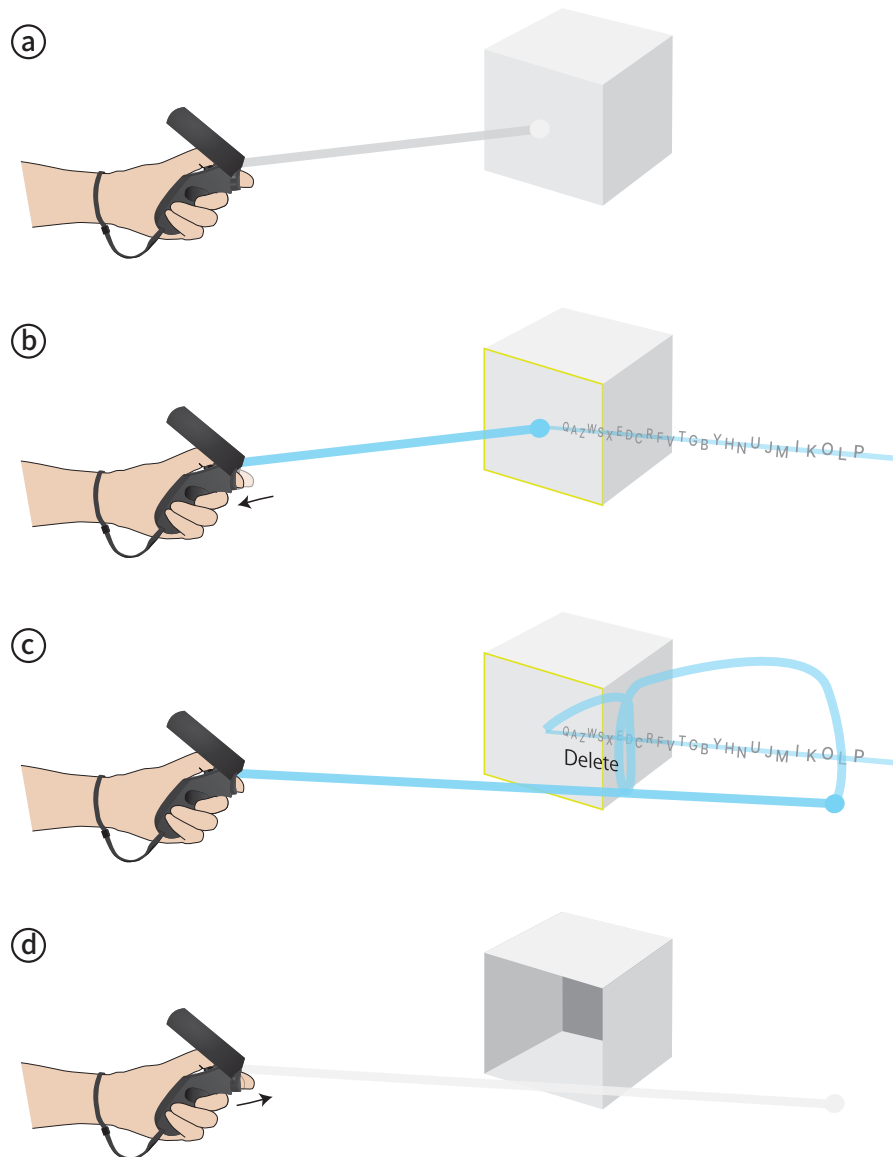


図 7.4: CrossBoard によるショートカット入力の様子. a: 選択したい平面にカーソルを合わせる. b: トリガボタンを引くと CrossBoard が表示される. c: CrossBoard に実行したいコマンドを入力する. ここでは“Del” (削除) と入力している. d: トリガボタンを離すとコマンドが実行される. ここでは平面の削除が行われている.

第8章 結論

本論文において、クロッシングによる選択を用いた1次元曖昧キーボードとして CrossBoard を示した。CrossBoard は、仮想現実向けの表示面積の小さい一次元キーボードの一種であり、ユーザは各キーをクロッシングにて選択することで文字入力を行う。また各キーの選択は、単語予測機能により補完されるため、ユーザは不正確なキー選択を行っても意図した単語の入力が行える。システムの実装にあたり、CrossBoard におけるキーボードの最適な大きさおよび単語予測に必要な空間モデルを調査を行った。実験では、空間モデルの特徴についてキーボードの視覚設計が空間モデルに影響を与えている可能性を示した。また、今回収集した空間モデルについて、参加者によるばらつきが大きいことを示した。またキーボードの最適な大きさとして、ユーザが使いやすいと感じたキーボードの大きさを収集し、その平均は 61.07 cm であった。この実験の結果を元に CrossBoard を実装し、通常の QWERTY キーボードと比較実験を行った。実験では、CrossBoard について 12.86 WPM、最も早い参加者は最終ブロックにて平均 16.58 WPM まで到達したものの、これらの入力速度は通常の QWERTY 配列の仮想現実向けのキーボードに比べて有意に遅い入力速度だった。CrossBoard における文字入力は、通常のキーボードの 26% の面積のキーボードにて、67.3% の入力速度を維持していることが明らかとなった。今後の課題として、今回収集した空間モデルがユーザにとって入力しづらいものになっていた可能性があるため、よりの確な空間モデルを適応するためにユーザの操作特性を考慮した空間モデルの調査および GUI の改善を進める必要がある。

謝辞

本研究は多くの方の相互作用によってなりたっています。指導教員である志築文太郎先生、高橋伸先生、川口一画先生には多くの指導と議論の機会をいただきました。心から感謝いたします。特に、志築文太郎先生には、研究の形成から実験結果の考察、論文執筆に関する多くのことを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皆さまには、ゼミにおける進捗報告ならびに発表練習、学生室での雑談から、様々な助言を頂きました。特に WAVE チームの皆様にはチームゼミにおける議論だけでなく、学生室などで相談に乗っていただき多くの意見を頂きました。深く感謝いたします。

最後に、私を支えてくださった友人といくつかの家族、大学院生活においてお世話になったすべての方々に感謝を申し上げます。

参考文献

- [Ame21] American National Corpus Project. Open American National Corpus | Open Data for Language Research and Education, 2021. <http://www.anc.org/>.
- [AZ02] Johnny Accot and Shumin Zhai. More Than Dotting the I's — Foundations for Crossing-Based Interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '02, pp. 73–80, Minneapolis, Minnesota, USA, 2002. ACM.
- [BCO⁺12] Xiaojun Bi, Ciprian Chelba, Tom Ouyang, Kurt Partridge, and Shumin Zhai. Bimanual Gesture Keyboard. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 137–146, Cambridge, Massachusetts, USA, 2012. ACM.
- [BK19a] Costas Boletsis and Stian Kongsvik. Controller-based Text-input Techniques for Virtual Reality: An Empirical Comparison. *International Journal of Virtual Reality*, Vol. 19, No. 3, pp. 2–15, October 2019.
- [BK19b] Costas Boletsis and Stian Kongsvik. Text Input in Virtual Reality: A Preliminary Evaluation of the Drum-Like VR Keyboard. *Technologies*, Vol. 7, No. 2, pp. 31:1–31–10, April 2019.
- [BKM09] Aaron Bangor, Philip Kortum, and James Miller. Determining What Individual SUS Scores Mean: Adding an Adjective Rating Scale. *Journal of Usability Studies*, Vol. 4, No. 3, pp. 115–123, May 2009.
- [Bro96] John Brooke. SUS - A Quick and Dirty Usability Scale. *Usability Evaluation in Industry*, pp. 189–194, June 1996.
- [BRP02] Doug A. Bowman, Christopher J. Rhoton, and Marcio S. Pinho. Text Input Techniques for Immersive Virtual Environments: An Empirical Comparison. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Vol. 46, No. 26, pp. 2154–2158, September 2002.
- [CRV12] Géry Casiez, Nicolas Roussel, and Daniel Vogel. 1 €Filter: A Simple Speed-based Low-pass Filter for Noisy Input in Interactive Systems. In *Proceedings of the 2012*

ACM Annual Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 2527–2530, Austin, Texas, USA, 2012. ACM.

- [CWG⁺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 '19, pp. LBW00233:1–LBW00233:6, Glasgow Scotland UK, May 2019. ACM.
- [CZL⁺19] Wenzhe Cui, Jingjie Zheng, Blaine Lewis, Daniel Vogel, and Xiaojun Bi. HotStrokes: Word-Gesture Shortcuts on a Trackpad. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 165:1–165:13, Glasgow, Scotland UK, 2019. ACM.
- [DBWK19] John Dudley, Hrvoje Benko, Daniel Wigdor, and Per Ola Kristensson. Performance Envelopes of Virtual Keyboard Text Input Strategies in Virtual Reality. In *Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, ISMAR 2019, pp. 289–300, Beijing, China, October 2019. IEEE. ISSN: 1554-7868.
- [FIM13] Vittorio Fucella, Poika Isokoski, and Benoit Martin. Gestures and Widgets: Performance in Text Editing on Multi-Touch Capable Mobile Devices. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, pp. 2785–2794, Paris, France, 2013. ACM.
- [FKL20] Jacqui Fashimpaur, Kenrick Kin, and Matt Longest. PinchType: Text Entry for Virtual and Augmented Reality using Comfortable Thumb to Fingertip Pinches. In *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, pp. LBW080:1–LBW080:7, Honolulu HI USA, April 2020. ACM.
- [FWW11] Leah Findlater, Jacob O. Wobbrock, and Daniel Wigdor. Typing on Flat Glass: Examining Ten-Finger Expert Typing Patterns on Touch Surfaces. In *Proceedings of the 2011 Annual Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pp. 2453–2462, Vancouver, British Columbia, Canada, 2011. ACM.
- [GJY⁺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, Glasgow, Scotland UK, 2019. ACM.
- [GKK98] Dale L. Grover, Martin T. King, and Clifford A. Kushler. Reduced keyboard disambiguating computer, 1998. US5818437 (A).
- [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, San Jose, California, USA, May 2016. ACM.
- [GR93] David Goldberg and Cate Richardson. Touch-typing with a Stylus. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '93, pp. 80–87, Amsterdam, The Netherlands, 1993. ACM.
- [GXG⁺18] Jun Gong, Zheer Xu, Qifan Guo, Teddy Seyed, Xiang ‘Anthony’ Chen, Xiaojun Bi, and Xing-Dong Yang. WrisText: One-handed Text Entry on Smartwatch using Wrist Gestures. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 181:1–181:14, Montreal Quebec, Canada, 2018. ACM.
- [HLW⁺18] Shangchen Han, Beibei Liu, Robert Wang, Yuting Ye, Christopher D. Twigg, and Kendrick Kin. Online Optical Marker-Based Hand Tracking with Deep Labels. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 37, No. 4, pp. 1–10, August 2018.
- [Kre19] Bernard C. Kress. Digital Optical Elements and Technologies (EDO19): Applications to AR/VR/MR. In Bernard C. Kress and Peter Schelkens, editors, *Digital Optical Technologies 2019*, Vol. 11062, pp. 1106222:1–1106222:13, Munich, Germany, July 2019. SPIE.
- [KSF⁺18] Pascal Knierim, Valentin Schwind, Anna Maria Feit, Florian Nieuwenhuizen, and Niels 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*, pp. 345:1–345:9, Montreal QC, Canada, 2018. ACM.
- [KZ04] Per-Ola Kristensson and Shumin Zhai. SHARK²: 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, Santa Fe, New Mexico, USA, 2004. ACM.
- [LGYT11] Frank Chun Yat Li, Richard T Guy, Koji Yatani, and Khai 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, Santa Barbara, California, USA, 2011. ACM.
- [LSKP03] SangYoon Lee, Jinseok Seo, Gerard J. Kim, and Chan-Mo Park. Evaluation of Pointing Techniques for Ray Casting Selection in Virtual Environments. In Zhigeng Pan and Jiaoying Shi, editors, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, pp. 38–44, Hangzhou, China, April 2003.
- [MA98] Jennifer Mankoff and Gregory D. Abowd. Cirrin: A Word-Level Unistroke Keyboard for Pen Input. In *Proceedings of the 11th Annual ACM Symposium on User Interface*

Software and Technology, UIST '98, pp. 213–214, San Francisco, California, United States, 1998. ACM.

- [MBN⁺02] Brad A. Myers, Rishi Bhatnagar, Jeffrey Nichols, Choon Hong Peck, Dave Kong, Robert Miller, and A. Chris Long. Interacting at a Distance: Measuring the Performance of Laser Pointers and Other Devices. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '02, pp. 33–40, Minneapolis, Minnesota, USA, 2002. ACM.
- [MF10] I. Scott Mackenzie and Torsten Felzer. SAK: Scanning Ambiguous Keyboard for Efficient One-Key Text Entry. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, Vol. 17, No. 3, pp. 1–39, July 2010.
- [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, Toronto, Ontario, Canada, 2014. ACM.
- [MS03] I Scott MacKenzie and R William Soukoreff. Phrase Sets for Evaluating Text Entry Techniques. In *CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 754–755, Ft. Lauderdale, Florida, USA, 2003. ACM.
- [MZ97] I Scott MacKenzie and Shawn X Zhang. The Immediate Usability of Graffiti. In *Proceedings of the Conference on Graphics Interface '97*, GI '97, pp. 129–137, Kelowna, British Columbia, Canada, 1997. Canadian Information Processing Society.
- [Per98] Ken Perlin. Quikwriting: Continuous Stylus-based Text Entry. In *Proceedings of the 11th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '98, pp. 215–216, San Francisco, California, USA, 1998. 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*, pp. 1–11, Parramatta NSW Australia, November 2019. ACM.
- [RDW20] Mark Richardson, Matt Durasoff, and Robert Wang. Decoding Surface Touch Typing from Hand-Tracking. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 686–696, Virtual Event USA, October 2020. ACM.
- [RWL⁺18] Sherry Ruan, Jacob O. Wobbrock, Kenny Liou, Andrew Ng, and James Landay. Comparing Speech and Keyboard Text Entry for Short Messages in Two Languages on Touchscreen Phones. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 1, No. 4, pp. 1–23, January 2018. arXiv: 1608.07323.

- [SFDB09] Garth Shoemaker, Leah Findlater, Jessica Q Dawson, and Kellogg S Booth. Mid-Air Text Input Techniques for Very Large Wall Displays. In *Proceedings of Graphics Interface 2009*, GI '09, pp. 231–238, Kelowna, British Columbia, Canada, 2009. Canadian Information Processing Society.
- [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, Montreal Quebec, Canada, 2018. ACM.
- [Thom04] ThomasKöltringer, Thomas Grechenig. Comparing the Immediate Usability of Graffiti 2 and Virtual Keyboard. In *Extended Abstracts of the 2004 Conference on Human Factors and Computing Systems*, CHI '04, pp. 1175–1178, Vienna, Austria, 2004. ACM.
- [THY⁺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, Glasgow, Scotland UK, 2019. ACM.
- [USH14] Keita Ushida, Yutaka Sekine, and Sadao Hasegawa. IPPITSU: A one-stroke text entry method for touch panels using Braille system. In *2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp. 374–375, Tokyo, Japan, October 2014. IEEE.
- [Whi21] Whirlscape. Minuum Keyboard | By Whirlscape, 2021. <http://minuum.com/>.
- [WLVK17] James Walker, Bochao Li, Keith Vertanen, and Scott Kuhl. Efficient Typing on a Visually Occluded Physical Keyboard. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 5457–5461, Denver Colorado USA, May 2017. ACM.
- [WMK03] Jacob O. Wobbrock, Brad A. Myers, and John A. Kembel. EdgeWrite: A Stylus-Based Text Entry Method Designed for High Accuracy and Stability of Motion. In *Proceedings of the 16th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '03, pp. 61–70, Vancouver, Canada, 2003. ACM.
- [WST14] William S. Walmsley, W. Xavier Snelgrove, and Khai N. Truong. Disambiguation of Imprecise Input with One-dimensional Rotational Text Entry. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, Vol. 21, No. 1, pp. 1–40, February 2014.
- [XCZ⁺20] Zheer Xu, Weihao Chen, Dongyang Zhao, Jiehui Luo, Te-Yen Wu, Jun Gong, Sicheng Yin, Jialun Zhai, and Xing-Dong Yang. BiTipText: Bimanual Eyes-Free Text Entry on a Fingertip Keyboard. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors*

in *Computing Systems*, Vol. CHI '20, pp. 1–13, Honolulu, Hawaii, USA, April 2020. ACM.

- [YFZ⁺18] Difeng Yu, Kaixuan Fan, Heng Zhang, Diego Monteiro, Wenge Xu, and Hai-Ning Liang. PizzaText: Text Entry for Virtual Reality Systems Using Dual Thumbsticks. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 24, No. 11, pp. 2927–2935, November 2018.
- [YGY⁺17] Chun Yu, Yizheng Gu, Zhican Yang, Xin Yi, Hengliang Luo, and Yuanchun Shi. Tap, Dwell or Gesture?: Exploring Head-Based Text Entry Techniques for HMDs. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 4479–4488, Denver, Colorado, USA, May 2017. ACM.
- [YHD⁺14] Richard Yao, Tom Heath, Aaron Davies, Tom Forsyth, Nate Michell, and Perry Hoberman. Oculus VR Best Practices Guide, July 2014. <https://brianschrank.com/vrgames/resources/OculusBestPractices.pdf>.
- [YS18] Naoki Yanagihara and Buntarou Shizuki. Cubic Keyboard for Virtual Reality. In *Proceedings of the Symposium on Spatial User Interaction*, SUI '18, pp. 170–170, Berlin, Germany, 2018. ACM.
- [YST19] Naoki Yanagihara, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. Text Entry Method for Immersive Virtual Environments Using Curved Keyboard. In *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '19, pp. 1–2, Parramatta, New South Wales, Australia, November 2019. ACM.
- [YSZ⁺16] Chun Yu, Ke Sun, Mingyuan Zhong, Xincheng Li, Peijun Zhao, and Yuanchun Shi. One-Dimensional Handwriting: Inputting Letters and Words on Smart Glasses. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 71–82, San Jose California USA, May 2016. ACM.
- [YYX⁺17] Xin Yi, Chun Yu, Weijie Xu, Xiaojun Bi, and Yuanchun Shi. COMPASS: Rotational Keyboard on Non-Touch Smartwatches. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 705–715, Denver, Colorado, USA, May 2017. ACM.
- [Zhee19] Zheer Xu, Pui Chung Wong, Jun Gong, Te-Yen Wu, Aditya Shekhar Nittala, Xiaojun Bi, JürgenSteimle, Hongbo Fu, Kening Zhu, Xing-Dong Yang. TipText: Eyes-Free Text Entry on a Fingertip Keyboard. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, pp. 883–899, New Orleans, Louisiana, USA, 2019. ACM.

- [ZLBZ18] Suwen Zhu, Tianyao Luo, Xiaojun Bi, and Shumin Zhai. Typing on an Invisible Keyboard. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 439:1–439:13, Montreal, Quebec, Canada, 2018. ACM.
- [ZYW⁺18] Mingyuan Zhong, Chun Yu, Qian Wang, Xuhai Xu, and Yuanchun Shi. ForceBoard: Subtle Text Entry Leveraging Pressure. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 528:1–528:10, Montreal QC, Canada, 2018. ACM.
- [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 論文集, pp. 676–682, 京都, 2019. ヒューマンインタフェース学会.
- [株式 21] 株式会社 ACCESS. Graffiti Pro for Android - Apps on Google Play, 2021. https://play.google.com/store/apps/details?id=com.access_company.graffiti_pro.

付 録 A 実験に用いた同意書およびアンケート

第 4 章および第 6 章の実験にて使用した実験同意書およびアンケートを以下に示す。なお、すべての書類は A4 用紙に印刷されて、実験に使用した。

A.1 実験に用いた同意書

同 意 書

筑波大学システム情報系長 殿

私は、「課題名：仮想現実における文字入力手法の評価」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。

令和 年 月 日

氏 名 (署名)

「課題名：仮想現実における文字入力手法の評価」の研究について、次の内容について
令和 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 筑波大学システム情報系

氏 名 志築文太郎 (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)

① 研究の概要について

仮想現実（VR）における文字入力手法は形成段階であり、コンピュータに付属する物理キーボードに比べ入力速度および精度に劣ることが示されている。しかし、VR において文字を入力する機会は、VR の普及によって増加する可能性は高い（例えばショートメッセージの返信など日常的な文字入力を VR 空間にいたまま行う）。我々は、VR における文字入力を実現するための新たな文字入力手法（提案手法）を開発している。提案手法は文字入力時のユーザの操作特性に基づき、文字入力的高速化を図ったものである。提案手法の形成および評価のための実験を行う。

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

研究対象者には、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、研究対象者が実験に参加した時間から報酬を算出し、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

提案手法の形成のためには、ユーザがキーボードを使用する際の特性の調査を行う必要があります。また提案手法の評価を行うために、既存手法との比較調査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研究対象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、研究対象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、心身上的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であっても、研究対象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、研究対象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。

また、コロナウイルス感染症対策のため、実験中に距離をとった状態にて実験を進めさせていただきます。マスクの着用、手指の消毒、および実験実施者との距離の確保等にご協力ください。

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、研究対象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解析用のデータに個人名が入ることはなく、個人名は別途管理します。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研究対象者のプライバシーは保全されます。

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：仮想現実における文字入力手法の評価」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。

☐ 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。

令和__年__月__日 氏名_____

A.2 事前アンケート

実験参加者属性アンケート

以下の項目に記入をお願いします。

参加者ID: _____

年齢: _____才

身長: _____cm

性別: _____

利き手

左 右

普段使っているキーボードのレイアウト

QWERTY(US)

QWERTY(JIS)

その他: _____

VR-HMDの使用経験

まったく使わない 1 2 3 4 5 6 7 よく使う

英文を読み写すことへの自信

自信がない 1 2 3 4 5 6 7 自信がある

メガネをつけている？

はい いいえ

コンタクトをつけている？

はい いいえ

瞳孔間距離

_____ mm

文責 藤田俊

A.3 NASA-TLX

NASA-TLX アンケート

参加者 ID: _____

実験条件: _____

直前に実施した作業に関して、以下の6項目について該当の箇所に○をつけてください。

知的・知覚的要求 どの程度の知的・知覚的活動（考える、決める、計算する、記憶する、見るなど）を必要としましたか。課題はやさしかったですか難しかったですか、単純でしたか複雑でしたか、正確さを求められるかおどろばよかったですか。

小さい 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 大きい

身体的要求 どの程度の身体的活動（押す、引く、回す、制御する、動き回るなど）を必要としましたか。作業はラクでしたかキツかったですか、ゆっくりできましたかキビキビやらなければなりませんでしたが、休み休みできましたか働きづめでしたか。

小さい 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 大きい

タイムプレッシャー 仕事のペースや課題に発生する頻度のために感じる時間的切迫感は何の程度でしたか。ペースはゆっくりとして余裕のあるものでしたか、それとも速くて余裕のないものでしたか。

弱い 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 強い

作業成績 作業指示者（あるいはあなた自身）によって設定された作業の目標をどの程度達成できたと思いますか。目標の達成に関して自分の作業成績にどの程度満足していますか。

良い 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 悪い

努力 作業成績のレベルを達成・維持するために、精神的・身体的にどの程度いっしょうけんめいに作業しなければなりませんでしたが。

少ない 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 多い

フラストレーション 作業中に、不安感、落胆、いらいら、ストレス、悩みなどをどの程度感じましたか。あるいは逆に、安心感、満足感、充足感、楽しさ、リラックスをどの程度感じましたか。

低い 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 高い

ご協力ありがとうございました。

A.4 実験1の事後アンケート

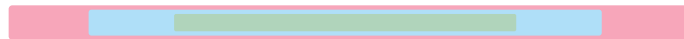
実験後アンケート

参加者ID: _____

実験中で使ったキーボードのうちどの大きさのものが使用しやすかったか順位をつけてください

Large: _____ Medium: _____ Small: _____

実験を通じてどの程度の大きさのキーボードが最も最適と感じますか？
おおよその大きさを下に描いてください（1/5スケール）

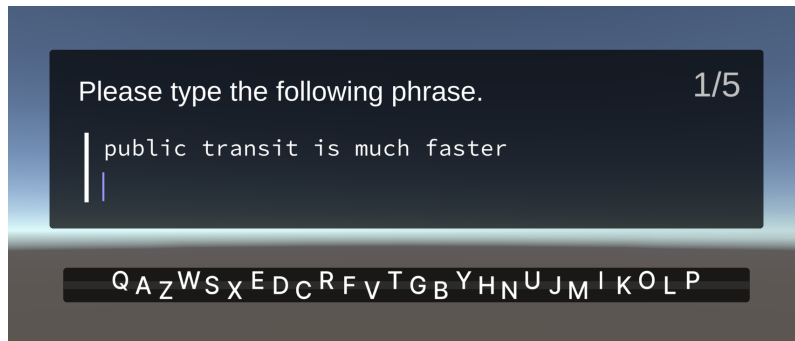


 Large  Medium  Small

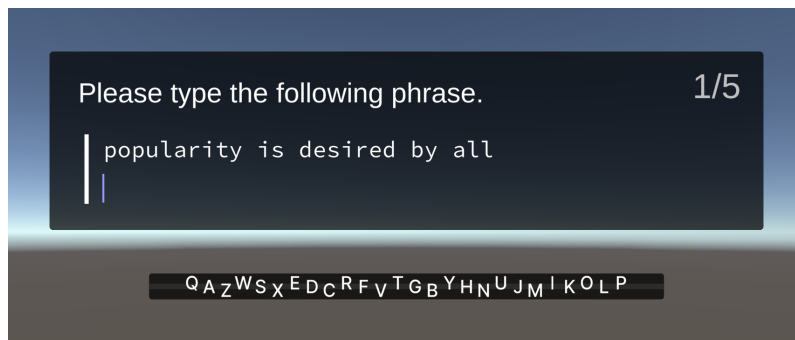
大きさおよび位置に関して具体的なコメントがありましたらご記入ください。

最後に実験全体について何かコメントがありましたらご記入ください

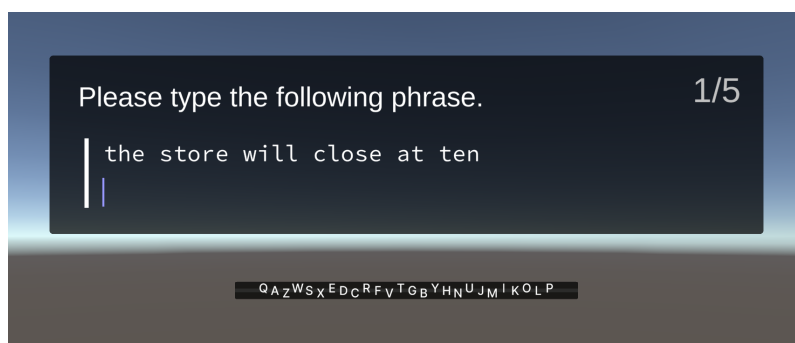
参考：キーボードの大きさ（1/5 スケール）



Large 条件（69.23 cm）



Medium 条件（51.92 cm）



Small 条件（34.62 cm）

A.5 SUS

SUS (System Usability Scale)

参加者ID _____

実験条件 _____

このシステムをしばしば使いたいと思う

そう思わない 1 2 3 4 5 そう思う

このシステムは不必要なほど複雑であると感じた

そう思わない 1 2 3 4 5 そう思う

このシステムは容易に使えると思った

そう思わない 1 2 3 4 5 そう思う

このシステムを使うのに技術的専門家のサポートを必要とするかもしれない

そう思わない 1 2 3 4 5 そう思う

このシステムにある様々な機能がよく纏まっていると感じた

そう思わない 1 2 3 4 5 そう思う

このシステムでは一貫性のないところが多くあると思った

そう思わない 1 2 3 4 5 そう思う

大抵のユーザはこのシステムの使用方法について素早く学べるだろう

そう思わない 1 2 3 4 5 そう思う

このシステムはとても扱いにくいと思った

そう思わない 1 2 3 4 5 そう思う

このシステムを使うのに自信があると感じた

そう思わない 1 2 3 4 5 そう思う

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

そう思わない 1 2 3 4 5 そう思う

A.6 実験2の事後アンケート

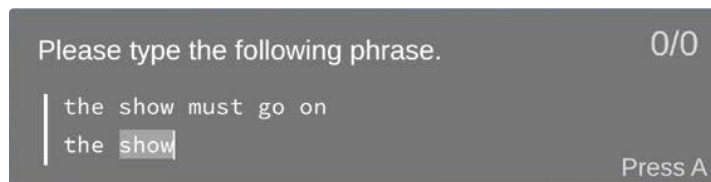
実験後アンケート

参加者ID: _____

実験で使ったキーボードの大きさは最適でしたか、それとも大きすぎたり小さすぎましたか？

はい いいえ (大きすぎた 小さすぎた)

(いいえの人のみ) おおよその大きさを下に描いてください (1/5スケール)



show	shown	shows	snow
Q A Z W S X E D C R F V T G B Y H N U J M I K O L P			

大きさおよび位置に関して具体的なコメントがありましたらご記入ください。

最後にこの手法について何かコメントがありましたらご記入ください

実験後アンケート

参加者ID: _____

実験で使ったキーボードの大きさは最適でしたか、それとも大きすぎたり小さすぎましたか？

はい いいえ (大きすぎた 小さすぎた)

(いいえの人のみ) おおよその大きさを下に描いてください (1/5スケール)

Please type the following phrase.

0/0

the show must go on

the show

Press A

Q	W	E	R	T	Y	U	I	O	P	
A	S	D	F	G	H	J	K	L	:	
	Z	X	C	V	B	N	M	,	.	

大きさおよび位置に関して具体的なコメントがありましたらご記入ください。

最後にこの手法について何かコメントがありましたらご記入ください

付 録 B 実験 1：実験参加者の属性およびアンケートの回答

実験 1 における，各実験参加者の属性を表 B.1，NASA-TLX のアンケート結果を表 B.2，実験後アンケートの結果を表 B.3 に示す．

表 B.1: 実験 1 における各実験参加者の属性

実験 参加者	年齢 [才]	身長 [cm]	性別	利き手	普段使用 している キーボード	仮想現実 向け HMD の 使用経験	英文を 読み写すこと への自信	眼鏡の 有無	コンタクト レンズ の装着	瞳孔間距離 [cm]	ジェスチャ キーボードを 普段使用 している
P1	21	162	女性	左手	QWERTY (JIS)	1	6	無	有	61	使用していない
P2	24	176	男性	右手	QWERTY (JIS)	1	3	無	無	61	使用していない
P3	21	182	男性	右手	QWERTY (JIS)	2	5	無	有	62	使用していない
P4	23	176	男性	右手	QWERTY (JIS)	2	6	無	無	60	使用していない
P5	23	172	男性	右手	QWERTY (JIS)	2	4	有	無	59	使用していない
P6	24	162.5	男性	左手	QWERTY (JIS)	1	7	有	無	58	使用していない
P7	24	173	男性	右手	QWERTY (JIS)	1	4	無	無	62	使用していない
P8	21	168	男性	左手	QWERTY (JIS)	1	3	無	有	57	使用していない
P9	23	161	女性	右手	QWERTY (US)	2	3	無	無	58	使用していない
P10	22	176	男性	右手	QWERTY (JIS)	1	4	無	無	65	使用していない
P11	23	170	男性	右手	QWERTY (JIS)	4	4	無	有	61	使用していない
P12	23	172	男性	右手	QWERTY (JIS)	1	4	有	無	59	使用していない
P13	23	162	女性	右手	QWERTY (JIS)	1	4	無	有	60	使用していない
P14	24	175	男性	右手	QWERTY (JIS)	3	5	無	有	59	使用していない
P15	23	171	男性	右手	QWERTY (US)	4	7	無	無	57	使用している

表 B.2: 実験 1 における NASA-TLX のアンケート結果

実験 参加者	Small 条件						Medium 条件						Large 条件					
	MD	PD	TD	OP	EF	FR	MD	PD	TD	OP	EF	FR	MD	PD	TD	OP	EF	FR
P1	8	6	4	7	9	5	7	6	4	5	7	7	6	8	4	4	8	6
P2	7	7	2	6	8	7	4	5	1	4	3	5	6	7	3	8	7	8
P3	8	6	6	9	8	7	8	7	7	7	8	6	7	8	6	6	7	6
P4	6	5	1	3	3	4	5	5	2	2	2	3	4	4	2	1	1	3
P5	8	8	4	5	8	9	7	6	4	7	7	6	8	8	4	7	7	6
P6	8	3	6	4	6	4	6	3	6	6	7	5	6	6	6	3	7	4
P7	5	5	4	7	6	4	3	2	3	5	4	2	3	2	4	4	3	3
P8	6	2	2	5	3	4	3	3	2	2	2	2	7	3	3	2	3	2
P9	7	6	7	7	8	7	7	5	5	4	8	7	7	7	6	6	8	6
P10	8	7	5	3	7	5	6	4	4	6	6	4	4	5	3	8	4	3
P11	7	4	5	6	7	6	4	4	4	4	3	3	4	4	3	3	3	2
P12	9	3	4	5	9	9	7	2	1	4	7	7	7	3	2	4	8	8
P13	2	1	2	4	4	2	1	2	2	3	2	3	2	1	1	3	3	2
P14	9	3	6	5	7	7	7	2	4	2	4	4	7	2	6	3	6	6
P15	2	2	2	3	2	3	2	2	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1

表 B.3: 実験 1 における実験後アンケート結果

実験 参加者	好みの大きさ			使いやすい 大きさ [cm]
	Small 条件	Medium 条件	Large 条件	
P1	3	1	2	52.00
P2	3	1	2	59.70
P3	3	1	2	58.40
P4	3	1	2	60.50
P5	3	2	1	63.00
P6	3	2	1	70.25
P7	3	2	1	61.50
P8	2	1	3	47.25
P9	3	2	1	61.00
P10	3	2	1	70.25
P11	3	2	1	64.50
P12	2	1	3	52.25
P13	3	2	1	61.40
P14	3	2	1	62.00
P15	3	2	1	72.00

付 録 C 単語推測に用いた空間モデル

単語推測に用いた空間モデルを表 C.1 に示す.

表 C.1: 単語推測に用いた空間モデル

キー	キー選択された位置の平均 [cm]	キー選択された位置の標準偏差 [cm]
q	-12.5320	0.6805
a	-11.3994	0.5798
z	-10.3189	0.6685
w	-9.2882	0.6042
s	-8.3713	0.5052
x	-7.4963	0.5567
e	-6.3659	0.5668
d	-5.3679	0.4669
c	-4.4611	0.5018
r	-3.3213	0.5800
f	-2.4105	0.4561
v	-1.5269	0.4671
t	-0.3449	0.5900
g	0.5733	0.4626
b	1.4584	0.5563
y	2.6180	0.5812
h	3.5310	0.5368
n	4.4399	0.5201
u	5.4691	0.5937
j	6.5498	0.4753
m	7.3466	0.6145
i	8.4537	0.6178
k	9.4036	0.5422
o	10.3989	0.5923
l	11.3920	0.6946
p	12.5927	0.6628

付 録D 実験2：実験参加者の属性およびアンケートの回答

実験2における、各実験参加者の属性を表D.1, NASA-TLXのアンケート結果を表D.2, SUSのアンケート結果を表D.3に示す.

表 D.1.1: 実験 2 における各実験参加者の属性

実験 参加者	年齢 [才]	身長 [cm]	性別	利き手	普段使用 している キーボード	仮想現実 向け HMD の 使用経験	英文を 読み写すこと への自信	眼鏡の 有無	コンタクト レンズ の装着	瞳孔間距離 [cm]
P1	22	185	男性	右手	QWERTY (US)	1	1	有	無	67
P2	25	162	男性	右手	QWERTY (JIS)	3	3	有	無	62
P3	24	171	男性	右手	QWERTY (US)	6	5	無	有	62
P4	24	175	男性	右手	QWERTY (JIS)	1	7	無	無	63
P5	22	172	男性	右手	QWERTY (US)	1	5	有	無	64
P6	24	170	男性	右手	QWERTY (JIS)	1	5	有	無	59
P7	22	156	女性	左手	QWERTY (JIS)	2	3	無	有	55
P8	23	181	男性	右手	QWERTY (JIS)	1	6	無	無	61

表 D.2: 実験 2 における NASA-TLX のアンケート結果

実験 参加者	CrossBoard						2D Keyboard					
	MD	PD	TD	OP	EF	FR	MD	PD	TD	OP	EF	FR
P1	8	3	10	7	6	6	4	2	3	8	3	6
P2	8	6	1	8	9	7	1	6	1	9	6	2
P3	7	4	7	7	6	5	3	5	4	3	4	5
P4	8	8	7	9	8	9	7	7	4	4	8	9
P5	4	3	3	2	2	3	2	5	1	1	3	2
P6	8	7	4	8	4	7	3	6	6	4	3	7
P7	9	9	7	9	10	9	2	2	1	2	2	2
P8	4	2	2	6	4	5	4	5	3	7	7	6

表 D.3: 実験 2 における SUS のアンケートの結果

実験 参加者	CrossBoard										2D Keyboard									
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10
P1	5	2	4	1	4	1	4	2	4	2	3	1	4	1	4	1	5	1	5	1
P2	2	4	3	5	3	3	3	4	2	5	5	1	5	1	3	1	4	2	4	2
P3	5	2	3	3	4	1	3	2	3	2	4	1	5	2	3	1	5	1	5	2
P4	2	3	2	2	4	1	2	1	1	4	4	2	4	1	5	2	5	4	3	2
P5	4	1	4	1	4	1	5	1	5	1	3	1	5	1	4	1	5	3	5	4
P6	2	3	3	3	3	3	2	4	3	2	2	2	4	1	3	2	5	2	4	1
P7	1	3	2	4	5	1	4	4	1	4	4	1	5	1	3	2	5	2	4	1
P8	4	2	4	2	4	1	4	2	3	2	4	1	5	1	4	1	4	1	4	2