

筑波大学大学院博士課程
理工情報生命学院
システム情報工学研究群修士論文

仮想キーボードの姿勢および形状が
入力性能および主観評価に与える影響の調査

富永 浩暉
修士（工学）
（情報理工学位プログラム）

指導教員 志築 文太郎

2022年3月

概要

Virtual Reality (VR) 環境における仮想キーボードの姿勢および形状には高い自由度がある。そこで、本研究ではまず仮想キーボードの位置および角度（仰俯角）が文字入力に与える影響を調査するための実験を行った。実験の結果、ユーザから見てキーボードを奥方向に傾けることにより入力速度および主観評価が向上する可能性があることが分かった。さらに、首の疲労に比べ腕の疲労が大きいことから、VR アプリケーションを設計する際にユーザの目線よりも低い位置に仮想キーボードを配置することにより、疲労を抑えられる可能性があることが分かった。

次に、ユーザの腕の疲労を抑えることを目的として、ユーザの使い慣れた QWERTY 配列を変化させることなく、手首の屈曲および伸展により操作される仮想キーボードを考案した。本仮想キーボードは、キーが上部および下部に分かれた構造になっており、QWERTY 配列の上段のキーが上部、中段および下段のキーが下部に配置された立体状の仮想キーボードである。ユーザは上部および下部の間の空間に手指を挿入し、人差し指を用いて QWERTY 配列の上段および中段のキーをタップし、親指を用いて下段のキーをタップすることにより文字を入力する。本キーボードでは、3次元インタラクションにおいてポインティング性能が最も低い奥方向のポインティングを無くし、ユーザの身体的負荷の一因となる手の移動量を削減できる。本キーボードの性能評価のために、入力に人差し指のみを用いた人差し指条件、人差し指および親指を用いた2本指条件にて、本キーボードと QWERTY 配列の仮想キーボードとの比較実験を行った。実験の結果、本キーボードは QWERTY キーボードと比べて手の移動量が小さいことが分かった。また、2本指条件は人差し指条件に比べて入力性能が低く、またユーザビリティが低いことが分かった。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	HMD を用いた VR 空間における文字入力	1
1.2	VR 空間における文字入力の課題	1
1.3	目的	3
1.3.1	VR 向け仮想キーボードの位置および角度が入力性能および主観的作業 負荷に与える影響の調査	3
1.3.2	手首の屈曲および伸展により操作される仮想キーボード	4
1.4	本論文の貢献	4
1.5	本論文の構成	5
第2章	関連研究	6
2.1	空中タップにより操作される仮想キーボードの入力性能およびユーザの主観評 価の調査	6
2.1.1	仮想キーボードの表示条件の違いによる比較	6
2.1.2	仮想キーボードの角度の違いによる比較	7
2.1.3	文字入力手法の違いによる比較	7
2.2	人間工学における文字入力に伴う疲労の調査	7
2.2.1	空中インタラクションの位置による疲労	8
2.2.2	キーボードの角度による疲労	8
2.3	奥方向のポインティングを削減した VR 向け文字入力手法	9
2.4	仮想キーボードの形状を変化させた文字入力手法	9
第3章	仮説	10
第4章	予備実験	11
4.1	実験環境および手順	11
4.2	結果	13
第5章	仮想キーボードの姿勢による影響の調査実験	14
5.1	実験参加者	14
5.2	実験内容	14
5.3	結果	16

5.3.1	入力性能	17
5.3.2	主観評価	18
5.3.3	アンケート結果	19
第 6 章	仮想キーボードの姿勢による影響に関する考察	23
6.1	入力性能	23
6.2	ユーザの主観評価	24
6.3	制限	24
第 7 章	手首の屈曲および伸展により操作される仮想キーボード	26
7.1	仮想キーボードの設計	26
7.2	操作方法	26
第 8 章	提案手法の評価実験	32
8.1	実験参加者	32
8.2	実験環境	32
8.3	実験内容	33
8.4	結果	34
8.4.1	入力性能	35
8.4.2	主観評価	37
8.4.3	手の移動量	37
第 9 章	提案手法の評価実験に関する考察	50
9.1	入力性能	50
9.2	主観評価	51
9.3	手の移動量	51
第 10 章	本研究のまとめ	53
	謝辞	54
	参考文献	55
付 録 A	実験の際に用いた各種書類	63
A.1	実験同意書	64
A.2	実験計画書	68
A.3	ビデオ画像の公開についての承諾書・承諾変更書	74
A.4	実験後アンケート（位置および角度の影響）	75
A.5	実験後アンケート（提案キーボード）	79

目次

1.1 ユーザが空中タップする様子. 左:正面, 右:下.	2
1.2 QWERTY キーボードにおける手の移動.	2
1.3 仮想キーボードの偏角 θ および姿勢角 ϕ	4
1.4 QWERTY 配列の上段のキーが上部, 中段および下段のキーが下部に配置された仮想キーボード.	5
4.1 空中タップを検出するために LeapMotion を取り付けた HTC VIVE.	12
4.2 実験の様子.	13
4.3 実験にて用いた仮想キーボード.	13
5.1 姿勢角 ϕ が異なる 3 つの仮想キーボード. 上: -15 度, 中: 0 度, 下: 15 度.	15
5.2 偏角 θ が 0 度の条件における実験の様子.	16
5.3 偏角 θ が 22.5 度の条件における実験の様子.	17
5.4 偏角 θ が 45 度の条件における実験の様子.	18
5.5 各偏角 θ および各姿勢角 ϕ の WPM (白い点は平均値を示す).	19
5.6 各偏角 θ および各姿勢角 ϕ の WWL (白い点は平均値を示す).	20
5.7 各偏角 θ および各姿勢角 ϕ の SUS スコア (白い点は平均値を示す).	21
5.8 各偏角 θ および各姿勢角 ϕ の疲労 (白い点は平均値を示す).	21
5.9 上腕および首の疲労を訴えた人数および偏角 θ の関係 (実線: 上腕, 点線: 首).	22
5.10 各姿勢角 ϕ のポジティブな感想およびネガティブな感想の数.	22
7.1 QWERTY 配列の上段のキーが上部, 中段および下段のキーが下部に配置された仮想キーボード.	27
7.2 人差し指提案キーボードの操作手順. A:ホームポジション, B:上段のキーのタップ, C:中段のキーのタップ, D:下段のキーのタップ.	28
7.3 上段のキー「I」をタップする様子. 上:正面, 下:斜め後ろ.	29
7.4 中段のキー「H」をタップする様子. 上:正面, 下:斜め後ろ.	30
7.5 下段のキー「C」をタップする様子. 上:正面, 下:斜め後ろ.	31
8.1 提案キーボードを用いた実験の様子.	33
8.2 実験にて用いた QWERTY キーボード.	34

8.3	実験にて比較した文字入力手法の操作手順. E:人差し指条件における提案キーボードの下段およびスペースキーのタップ. F:人差し指による QWERTY キーボードのタップ. G:2本指条件における QWERTY キーボードのタップ.	35
8.4	各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における WPM.	36
8.5	各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数を組み合わせた4条件における WPM.	37
8.6	各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における TER.	38
8.7	各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数を組み合わせた4条件における TER.	39
8.8	各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における WWL.	40
8.9	各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数を組み合わせた4条件における SUS スコア.	41
8.10	各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における右手の HMPW.	42
8.11	各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における右手 x 方向の HMPW.	43
8.12	各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数を組み合わせた4条件における右手 x 方向の HMPW.	44
8.13	各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数を組み合わせた4条件における右手 y 方向の HMPW.	44
8.14	各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数を組み合わせた4条件における右手 y 方向の HMPW.	45
8.15	各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における右手 z 方向の HMPW.	45
8.16	各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における左手の HMPW.	46
8.17	各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数を組み合わせた4条件における左手の HMPW.	46
8.18	各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における左手 x 方向の HMPW.	47
8.19	各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数を組み合わせた4条件における左手 x 方向の HMPW.	47
8.20	各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における左手 y 方向の HMPW.	48
8.21	各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数を組み合わせた4条件における左手 y 方向の HMPW.	48
8.22	各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における左手 z 方向の HMPW.	49
8.23	各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数を組み合わせた4条件における左手 z 方向の HMPW.	49

第1章 はじめに

Virtual Reality (以降, VR) とは, コンピュータにて生成された仮想的な映像および音声などをユーザである人間の感覚に提示することにより, 実際にはないものをまるで現実のものであるかのように感じさせる技術である [館 11]. VR に関する技術の中でも Head-Mounted Display (以降, HMD) を用いて視覚に働きかけるシステムが普及してきている. HMD とは, ユーザの視界を物理的に遮蔽し, 仮想的な視覚情報をユーザに提示するデバイスである. HMD は, ユーザの頭部の上下, 左右, および前後方向の動きならびに回転に応じた映像を表示し, 仮想空間における没入感をユーザに与える. HMD による VR 空間では, ユーザはコントローラもしくはユーザ自身の手指を用いることによる GUI (Graphical User Interface) の操作, および VR 空間内に表示された仮想キーボードへの文字入力を行う. 本章では, HMD を用いた VR 空間における文字入力およびその課題を述べたのち, 本研究の目的およびアプローチを述べる. 最後に本論文の貢献および本論文の構成を述べる.

1.1 HMD を用いた VR 空間における文字入力

HMD を用いた VR 空間における文字入力では, 主に仮想キーボードが用いられる. 仮想キーボードは実世界のキーボードの形状を模した QWERTY 配列のソフトウェアキーボードであり, 物理的制約に縛られずに位置および角度を調整できるという特徴がある. この特徴により, 実世界では机上に設置する必要のあるキーボードを空中に設置できる. 仮想キーボードを用いた文字入力には, コントローラを用いる手法およびユーザ自身の手指を用いる手法がある. コントローラを用いる手法には, コントローラから放出されたレイによる操作 [SFZK18, BK19a] およびコントローラにてキーをタップする操作 [SFZK18, BK19a, BK19b] など様々な手法が提案されている. しかし, これまでに VR 空間におけるコントローラを用いる手法は, ユーザ自身の手指を用いる手法に比べて自然なインタラクションを妨げることが報告されている [BOW⁺08]. したがって, 仮想キーボードによる文字入力手法には実世界同様の方法により入力できる手法であるユーザ自身の手指を用いる手法が適しているといえる.

1.2 VR 空間における文字入力の課題

空中タップを用いた文字入力手法 [福仲 19, 喜多 19, 細野 14, 大西 16] では, 指から放出されたレイを用いた文字入力手法 [SMCV⁺18, MSSH18] と異なり, ユーザが自身の手指を用いて仮想キーボードに触れる. そのため, 空中タップを用いた文字入力手法を使用する際, 仮

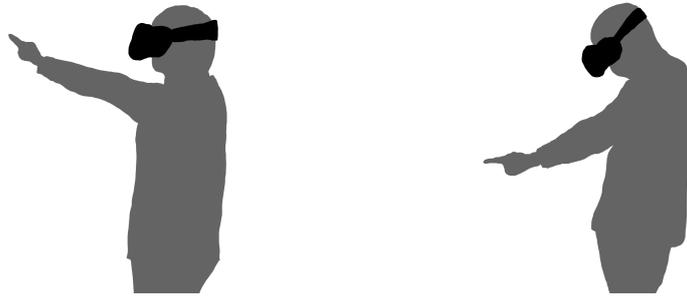


図 1.1: ユーザが空中タップする様子. 左: 正面, 右: 下.

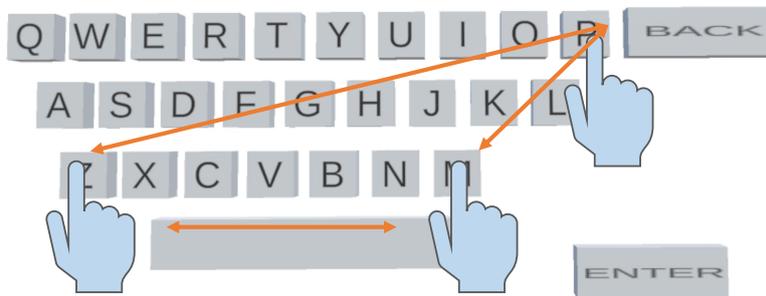


図 1.2: QWERTY キーボードにおける手の移動.

想キーボードの位置により操作するユーザの姿勢が変化し、また仮想キーボードの角度によりキーの見え方が変化する。特に、仮想キーボードがユーザの視線より下に表示される時、ユーザは背筋を曲げ、俯いた姿勢にて作業すると考えられる (図 1.1)。VR 空間を利用するために装着する HMD の重量は 450 g 以上あり (HTC VIVE : 468 g, Oculus Quest 2 : 503 g, Valve Index : 748 g, PlayStation VR : 610 g), 長時間俯いた姿勢にて作業をすることによる首の疲労への影響は無視できない。先行研究において、HMD を装着したユーザが目線より下方向の仮想キーボードを操作する際に、ユーザの首に疲労が生じることが報告されている [富永 21c, TFST21, 富永 21b, YCL⁺19, PKKH20]。また、空中タップを用いた文字入力では、ユーザが腕を上げてキーボードを操作する必要があるため、腕の疲労が生じうる (ゴリラアーム現象 [BJB09, HRGMI14, JSAR17])。これらの疲労要因が、仮想キーボードを用いた文字入力のユーザビリティの低下につながり、ひいては長時間の作業を妨げる [JSAR17]。そのため、仮想キーボードの位置は主観評価 (主観的作業負荷およびユーザビリティ) ならびに身体的疲労へ大きく影響を及ぼすといえる。一方、仮想キーボードの角度は、入力性能 (文字入力速度および入力時エラー率) に影響があることが報告されている [DM11]。したがって、主観評価および入力性能が共に高い水準を保つことができる仮想キーボードの位置および角度の解明が求められている。

また、VR 環境における仮想キーボードを用いた文字入力には 3 次元方向へのポインティングが用いられる。しかし、目線に対して奥方向のポインティング性能は、上下左右方向のポインティング性能に比べて低いことが報告されている [LXZ17]。さらに、VR アプリケーションに標準搭載されている QWERTY 配列の仮想キーボード（以下、QWERTY キーボード）では、キーボード面が目線に対して垂直であるために、ユーザが文字入力において手を上下左右に移動させる必要がある（図 1.2）。したがって、手の移動量に基づく身体的負荷 [MJH13] が増加する。一方、QWERTY キーボードの概形を保ちつつ、ユーザの手の移動量を小さくするために仮想キーボードを小さくすると、文字入力性能が低下することが報告されている [THY⁺19]。

1.3 目的

本研究の目的は、以下の 2 点である。

- VR 空間における文字入力の入力性能および主観評価の優れた仮想キーボードの表示姿勢を明らかにする。
- QWERTY キーボードの概形を保ちつつ、奥方向のポインティングおよびユーザの手の移動量を削減する。

これらの目的を果たすために、本研究では、まず VR 向け仮想キーボードの位置および角度が入力性能および主観的作業負荷に与える影響の調査を行った。次に、手首の屈曲および伸展により操作される仮想キーボードを開発し、一般的な QWERTY キーボードとの比較実験を行った。本節にて、それぞれの詳細を述べる。

1.3.1 VR 向け仮想キーボードの位置および角度が入力性能および主観的作業負荷に与える影響の調査

空中タップにより操作される仮想キーボードの位置および角度による影響を調査するため、実験参加者から見た仮想キーボードの位置（偏角 θ ）および角度（姿勢角 ϕ ）の変化に伴う入力性能およびユーザの主観評価の比較実験を行った。比較実験における仮想キーボードの偏角 θ および姿勢角 ϕ を図 1.3 に示す。なお仮想キーボードの位置は、実験参加者ごとに腕を伸ばした距離 r において、実験参加者の正面から下方向に一定の角度（偏角 θ ）だけ移動させた位置とした。本実験において、実験参加者の目線の高さに表示された仮想キーボードの偏角 θ を 0 度と定義し、実験参加者の視線に垂直な方向に表示された仮想キーボードの姿勢角 ϕ を 0 度と定義した。本実験では、仮想キーボードの偏角 θ および姿勢角 ϕ を変化させた条件にて実験を行い、実験データを解析することにより、仮想キーボードの位置および角度が空中タップにおける入力性能およびユーザの主観評価に与える影響を調査した。

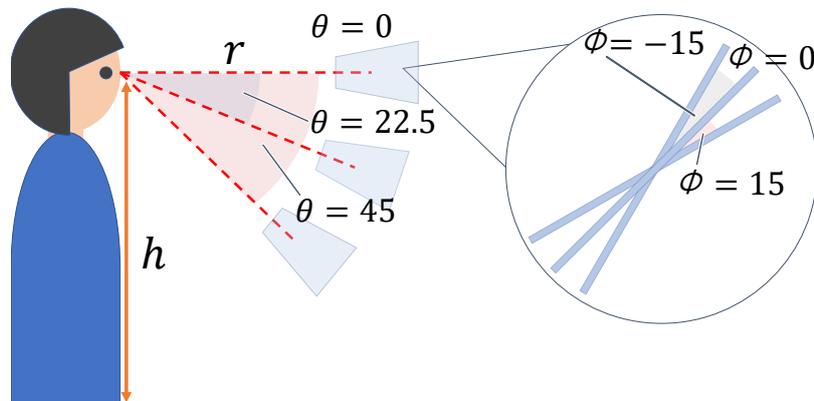


図 1.3: 仮想キーボードの偏角 θ および姿勢角 ϕ .

1.3.2 手首の屈曲および伸展により操作される仮想キーボード

QWERTY キーボードの概形を保ちつつ、奥方向のポインティングおよびユーザの手の移動量を削減するために、広く使われている QWERTY 配列において、手首の屈曲および伸展により操作される仮想キーボードを考案した [富永 21a]. 手首の屈曲および伸展により操作される仮想キーボードは、QWERTY 配列の上段のキーが上部、中段および下段のキーが下部に配置された立体状の仮想キーボードである (図 1.4). 本仮想キーボードを用いる際、ユーザはまず仮想キーボードの上部および下部の間の空間に手指を挿入する. 次に、ユーザは QWERTY 配列の上段および中段のキーを手首の屈曲および伸展により、下段のキーを親指によりタップすることにより文字を入力する. この設計により、3次元インタラクションにおいて手指によるポインティング性能が最も低い奥方向のポインティングを必要とせず、かつ、文字入力に伴う手の移動量を削減した QWERTY 配列のキーボードを実現した.

1.4 本論文の貢献

本研究の貢献は以下の通りである.

- 仮想キーボードの偏角 θ および姿勢角 ϕ を変化させた条件にて実験を行い、仮想キーボードの位置および角度が空中タップにおける入力性能およびユーザの主観評価に与える影響を示した.
- 実験の結果より、仮想キーボードの適切な位置および角度の設置指針を示した.
- QWERTY キーボードの概形を保ちつつ、奥方向のポインティングおよびユーザの手の移動量を削減可能な仮想キーボードの形状を示した.



図 1.4: QWERTY 配列の上段のキーが上部，中段および下段のキーが下部に配置された仮想キーボード。

1.5 本論文の構成

第 1 章において，本研究の背景および研究課題ならびに目的を述べた。第 2 章において，本研究に関連する研究および本研究の位置づけを述べる。第 3 章において，関連研究を踏まえた仮説を述べる。第 4 章において，VR 向け仮想キーボードの位置および角度が入力性能および主観的作業負荷に与える影響の調査の予備実験および結果に関して詳述する。第 5 章において，VR 向け仮想キーボードの位置および角度が入力性能および主観的作業負荷に与える影響の調査の実験および結果に関して詳述する。第 6 章において，第 5 章の実験結果に関する考察を述べる。第 7 章において，手首の屈曲および伸展により操作される仮想キーボードに関して詳述する。第 8 章において，手首の屈曲および伸展により操作される仮想キーボードの性能実験および結果に関して詳述する。第 9 章において，第 8 章の実験結果に関する考察を述べる。第 10 章において，本研究のまとめを述べる。

第2章 関連研究

空中タップにより操作される仮想キーボードの入力性能およびユーザの主観評価を調査する研究、人間工学において文字入力に伴う疲労を調査する研究、入力性能の向上および作業負荷の減少を目的としたVR向けの文字入力手法の研究が多く行われている。本章では、それらの研究と本研究との位置づけを述べる。

2.1 空中タップにより操作される仮想キーボードの入力性能およびユーザの主観評価の調査

空中タップにより操作されるQWERTYキーボードには、コントローラを持ち運ぶ必要がなく、通常のキーボードに近い入力ができるため学習コストが低いという利点がある[YCL⁺19]。しかし、空中タップには指が意図せずキーに触れることによる誤タップが多いことから[DBWK19, SFZK18]、ユーザビリティへ悪い影響があることが報告されている[SFZK18]。

これらの課題を踏まえ、空中タップにより操作される仮想キーボードの位置または角度の違いによる入力性能への影響の比較調査、ならびに文字入力手法の違いによる比較調査が行われてきた。

2.1.1 仮想キーボードの表示条件の違いによる比較

Frutos-Pascualら[FPGH⁺21]は、拡張現実向けHMDの文字入力において、仮想キーボードをユーザの正面に固定表示する、または手首の横および手首上に追従させる表示方法を比較し、仮想キーボードの表示条件が文字入力に与える影響を調査した。その結果、実験参加者の正面において地面に対して垂直に仮想キーボードを固定表示した場合に最も入力性能が高くなることが示された。Dudleyら[DBWK19]は、物理平面上のタップおよび空中タップによる文字入力手法の入力性能を調査した。その結果、空中タップによる文字入力手法の入力性能は物理平面上のタップによる文字入力手法に比べて低いことが示された。

これらの研究から、仮想キーボードを固定表示することにより、入力性能を最大化できると考えられる。しかし、これらの研究では空中に固定された仮想キーボードにおいて、最も高い入力性能を持つ仮想キーボードの位置は調査されていない。そこで、我々は仮想キーボードの偏角 θ および姿勢角 ϕ を変化させた条件にて実験を行い、仮想キーボードの角度の影響を調査した。

2.1.2 仮想キーボードの角度の違いによる比較

Dang ら [DM11] は、空中ジェスチャを用いたポインティングタスクにおけるウィジェットの角度による影響を調査した。その結果、ウィジェットが直立した状態（0度）である垂直面およびユーザから見て奥方向への傾きが45度である傾斜面の条件では、ウィジェットの傾きが90度である水平面の条件に比べて、ポインティング時間が短縮し、エラー率が低下することが明らかになった。Yang ら [YCL⁺19] は、空中タップを用いた仮想キーボードの文字入力におけるキーの突出距離および仮想キーボードの角度による影響を調査した。その結果、ユーザから60cm離れた位置にある仮想キーボードにおいては、キーの推奨突出距離が6cmであること、およびユーザが傾いた仮想キーボードを好むことが示された。一方で、Yang らは実験参加者が傾いた仮想キーボードの利用時に首の疲労を感じていたとも述べている。

これらの研究では、仮想キーボードの角度による影響が調査されているものの、その調査範囲は奥方向の角度条件のみに限定されている。そこで、我々はVR向け仮想キーボードの角度条件に前方向の条件を加えて比較実験を行い、文字入力に与える影響を調査した。

2.1.3 文字入力手法の違いによる比較

Markussen ら [MJH13] は、大型ディスプレイを対象として空中タップにより操作されるH4 [MSH11], MultiTap [BC02], およびQWERTYキーボードの入力性能を比較した。その結果、QWERTYキーボードにおける空中タップによる文字入力手法の入力性能が最も高いことが明らかになった。また、QWERTYキーボードを用いた文字入力手法は、実験参加者から最も好まれ、実験参加者の手の運動量が最も小さかった。Markussen らは、仮想キーボードの位置または角度を固定して実験しており、仮想キーボードの位置および角度が空中タップによる文字入力に与える影響を調査していない。しかし、仮想キーボードの位置および角度を変化させることにより、入力性能およびユーザの主観評価へ影響があると考えられる。そこで、我々はVR向け仮想キーボードの位置および角度条件を変化させて比較実験を行い、仮想キーボードの姿勢が文字入力に与える影響を調査した。

2.2 人間工学における文字入力に伴う疲労の調査

疲労とは、持続的な筋肉の活性化によって筋肉の最大出力および出力能力が低下することと定義される現象である [ES92]。特に、腕の疲労はユーザビリティを低下させ、長時間の空中インタラクションを妨げることが知られている [JSAR17]。疲労を人間の身体的特性および精神的特性に基づいて研究する学問である人間工学は、空中インタラクションの設計を行うために重要な役割を担っている [PKKH20, BPOW15, HRH12, HRGMI14]。本節では、人間工学の観点から、キーボードおよび空中タップによる文字入力に伴う疲労について調査した研究 [BPOW15, HRGMI14, JSAR17, ILY⁺21, SMB03] を取り上げる。

2.2.1 空中インタラクションの位置による疲労

Penumudi ら [PKKH20] は、VR 空間におけるオブジェクトの表示位置をユーザの目線の高さから上方向に 15 度、下方向に 15 度および 30 度に変化させ、筋骨格系への負荷を調査した。その結果、目線より下方向の条件において、肩の屈曲、首の屈曲モーメント、三角筋前部の筋活動が増大することが明らかとなった。同時に、目線より下方向の条件では、実験参加者が首および肩に不快感を訴えることが示された。また、Penumudi らは、VR 空間における空中インタラクション時の筋骨格系の不快感および傷害リスクを軽減するために、過度に低い位置でのオブジェクト表示を避けるべきであると述べている。

Bachynskyi ら [BPOW15] は、VR 向けアプリケーションにて行う空中インタラクションの位置に応じた、ユーザの筋肉の活性化部位を調査した。その結果、筋肉の活性化、速度、操作領域、およびポインティング精度の特性が異なる 11 種類のポインティング動作のクラスターを同定した。この結果から Bachynskyi らは、空中インタラクションにおける UI 設計の指針をいくつか述べている。特に仮想キーボードの設置位置については、筋肉の活性化の低さおよびポインティング精度の高さから、ユーザの腹部の高さに設置することが腕の筋肉の負担が小さいため好ましいと述べている。

Hincapié-Ramos ら [HRGMI14] は、カメラベースの骨格追跡システムを用いた空中インタラクションにおける疲労評価手法を開発した。この疲労評価手法を用いた実験の結果から Hincapié-Ramos らは、実験参加者の腹部の高さにおいて空中インタラクションを行う条件が最も持久力を要求されないことを示した。Jang ら [JSAR17] は、カメラベースの骨格追跡システムを用いて、休息时间を含む連続タスクにおける主観的な腕の累積疲労を評価できる手法を開発した。Jang らによる疲労評価実験の結果、肩の高さにおける空中インタラクションの疲労に比べて、腹部の高さにおける空中インタラクションの疲労の方が小さいことが明らかになった。

これらの研究では、空中インタラクションを腹部の高さにて行うことが好ましいと一貫して述べられている。しかし、これらの研究では、空中インタラクションにおける選択対象のオブジェクトの角度による操作性能への影響が考慮されていない。そこで、我々は仮想キーボードの姿勢角 ϕ を変化させた条件にて実験を行い、仮想キーボードの角度が空中タップによる疲労に与える影響を調査した。

2.2.2 キーボードの角度による疲労

Simoneau ら [SMB03] は、物理キーボードの設置角度の変化に伴う入力性能およびユーザによる主観評価を調査した。その結果、キーボードの角度が入力性能に影響を与えないこと、肘より高い位置にキーボードを配置することによりユーザの不快感が高まること、およびキーボードをユーザから見て奥方向に傾けることにより手首への負荷が軽減できることが明らかになった。この研究では物理キーボードの設置角度を変化させた実験が行われているが、VR 向け仮想キーボードにおいても同様に入力性能およびユーザの主観評価へ影響があると考えられるか調査する必要がある。そこで、我々は仮想キーボードを対象とした調査を行った。

2.3 奥方向のポインティングを削減した VR 向け文字入力手法

これまでに奥方向のポインティングを削減した VR 向け文字入力手法が提案されてきた。

藤田および志築 [藤田 21] は、レイキャストカーソルのクロッシングによる選択を用いた 1 次元キーボードによる文字入力手法を提案した。この手法では、QWERTY キーボードの各キーが一行に密集して並べられ、レイキャストカーソルがキーを横切ることにより文字入力が行われる。藤田らは、ユーザがキーの探索に時間を費やすこと、およびユーザは小さなキーボードより大きなキーボードを好むことを明らかにした。Chen ら [CWG⁺19] は、VR 環境におけるレイキャストおよびタッチパッドを用いた 2 種類のジェスチャ入力手法を提案した。それぞれの手法における入力性能は、16.4 WPM (Words Per Minute [AS09]) および 9.6 WPM であることが示された。しかし、これらの手法には、コントローラが必要であるという課題がある。

大西および渡辺 [大西 16] は、一筆書き用に簡略化された文字を指にて空中に描くことによる文字入力手法を提案した。大西らは、この手法について誤検出が多いことおよび入力に時間がかかることにより、実用的でないことを報告した。Markussen ら [MJH14] は、指をつまむジェスチャを起動トリガとして VR 環境におけるジェスチャ入力を行う手法を提案した。この手法およびタッチ入力を比較した結果、タッチ入力の入力速度の方が高いことが示された。しかし、これらの手法には、文字入力に伴うユーザの手の移動量が大きいという課題がある。

そこで、我々はコントローラを必要とせず、奥方向のポインティングおよび手の移動量を削減可能な仮想キーボードを考案した。

2.4 仮想キーボードの形状を変化させた文字入力手法

これまでに仮想キーボードの形状を変化させた VR 向け文字入力手法が提案されてきた。福仲ら [福仲 19] は、VR 向けフリック入力手法を提案した。この手法の入力速度は平均 20.0 WPM 以下であり QWERTY キーボードに比べて入力性能が低いことが示された。Boletsis らは、VR 向けコントローラを用いたドラムスティック型の文字入力手法を提案した [BK19b]。この手法の入力速度は 24.6 WPM であることが報告されており、Speicher らが調査した 6 つの VR 向け文字入力手法の入力速度 [SFZK18] と比べて高速な文字入力を実現した。Yanagihara らは、球面上にキーを配置したキーボードを提案した [YST19]。この手法の入力速度は 21.0 WPM と高速であり、平面の仮想キーボードに比べて視野占有率が低下することを示した。Yanagihara らは、キーを立方体状に配置した立体キーボードを提案した [YS18]。この手法の入力速度は 10.0 WPM を下回ったが、平面の仮想キーボードに比べて視野占有率が低下することを示した。

しかし、これらの文字入力手法においてユーザは 3 次元方向に手指を動かす必要があるため、手の移動量が大きいという課題がある。よって、文字入力に必要な手指の動作方向が制限される形状の仮想キーボードを設計すれば、文字入力に伴う手の移動量を削減できる可能性がある。そこで、これらの課題に対して手首の屈曲および伸展を文字入力に用いることにした。

第3章 仮説

これまでの研究から、空中タップにより操作される仮想キーボードでは、以下のことが示唆されている。

- (1) 腹部の高さに表示することによりユーザの腕の疲労が抑えられる。
- (2) ユーザの視線より下に表示することによりユーザの首の疲労が増加する。
- (3) 仮想キーボードの角度は入力性能への影響を与える。
- (4) 仮想キーボードの位置および角度によりユーザの主観評価へ影響を与える。

しかし、先行研究では仮想キーボードの位置または角度のどちらか一方の指標のみを評価するものが多く、仮想キーボードの位置および角度を組み合わせで評価した研究は少ない [FPGH⁺21]。また、仮想キーボードの角度を奥方向に傾けた場合における使い勝手の調査 [DM11, YCL⁺19] が行われているものの、手前方向へ傾けた場合の評価は調査されていない。しかし、仮想キーボードが手前方向へ傾くことにより、キーボードの見え方が変わるため、文字入力性能およびユーザの主観評価へ影響を与える可能性がある。これらを踏まえ、空中タップにより操作される仮想キーボードに対して以下の仮説を立てた。

H_1 : 仮想キーボードの位置および角度の相互作用により、高い入力性能を持ち、かつユーザの主観評価が高い仮想キーボードの位置および角度が存在する。

H_2 : 仮想キーボードを手前方向へ傾けることが、入力性能およびユーザの主観評価へ影響を与える。

したがって、仮想キーボードの位置および角度（本研究においては、偏角 θ および姿勢角 ϕ 、図 1.3）を組み合わせの場合における入力性能およびユーザの主観評価への影響を検証するために実験を行った。

第4章 予備実験

HMD を装着した状態かつ仮想キーボードの偏角 θ が大きな条件において継続して文字入力を行うことにより，ユーザの首へ HMD および頭部の自重による負荷がかかり，首の疲労および不快感を引き起こすことが知られている [PKKH20]．そこで，安全に実験を行える仮想キーボードの偏角 θ の範囲を決めるために予備実験を行った．

予備実験では，著者を含めた研究室の 22 歳–25 歳の大学生もしくは大学院生 8 名（平均 23.3 歳，標準偏差 1.20 歳）をボランティアの実験参加者とした．実験参加者のうち，2 名が眼鏡，2 名がコンタクトレンズを装着して実験に参加した．また，残りの 4 名は裸眼にて実験に参加した．実験参加者のうち，2 名は日常的に VR 向け HMD を使用しており，5 名は過去に HMD を使用した経験があり，1 名は HMD を使用した経験が一度もなかった．実験の所要時間は 1 人当たり 60 分であった．

4.1 実験環境および手順

予備実験において用いた HMD は HTC VIVE であり，コンピュータには ALIENWARE m15 (Intel® Core™ i7-8750H, 16 GB RAM, NVIDIA® GeForce® GTX 1060, Windows 10) を用いた．空中タップを検出するための機器には Leap Motion を使用した．Leap Motion は，図 4.1 のように HMD の前面に装着した．赤外線による Leap Motion の外乱の影響を防ぐために直射日光が当たらない環境にて実験を行った．また，Unity の環境において C# を用いて実験用アプリケーションを実装した．

図 4.2 に実験の様子を示す．実験参加者は，仮想キーボードの偏角 θ が異なる条件において，空中タップを用いた英文入力を行った．先行研究にて空中タップにおける仮想キーボードへの文字入力では，QWERTY 配列が好まれること [MJH13] から本予備実験では QWERTY キーボードを採用した．Bachynskyi ら [BPOW15] が提唱した文字入力に伴う疲労の少ない仮想キーボードの大きさ (70 cm × 21 cm 以内の領域)，および日本人の肩幅の大きさ [Hos84] を考慮して，仮想キーボードは横幅が 43.0 cm に収まるように設計した．正方形のキーが等間隔に並び，かつ誤タップが多発しないようにキーを配置した結果，キーは 3.75 cm × 3.75 cm，およびキー同士の間隔は 0.5 cm となった．なお，この時の仮想キーボードの大きさは 42.5 cm × 12.25 cm であった．キー間を埋めるように各キーの当たり判定を拡張したため，各キー平面の当たり判定は 4.25 cm × 4.25 cm となった．加えて，仮想キーボードのキーの形状は平面形状に比べて立体形状の方が入力性能が優れること [DA20a] から，キーを奥行きが 1.25 cm の直方体とし，その当たり判定は Yang らの仮想キーボードにおける推奨突出距離 [YCL⁺19] に倣



図 4.1: 空中タップを検出するために LeapMotion を取り付けた HTC VIVE.

い 6.25 cm とした。両手の人差し指のみを用いた場合の入力性能が最も高いと報告されている [DBWK19, FDG+21] ことから、本実験においては両手の人差し指による空中タップのみを有効な空中タップとした。なお、実験アプリケーションにおける課題文および実験参加者が入力した英文は、仮想キーボード上部に表示された (図 4.3)。また、実験開始前には、表示されている文章を実験参加者に音読してもらい、実験参加者が問題なく英文を読み取れることを確認した。実験参加者が仮想キーボードのキーをタップした際には、タップされたキーの色が赤くなり、かつクリック音が再生された。

仮想キーボードは実験参加者が腕を伸ばした位置に表示し、VR 空間の背景は無地の白色とした。実験参加者は、直立した状態において偏角 θ が 0 度, 30 度, 45 度, 60 度, 75 度, および 90 度の 6 条件のキーボードに対してそれぞれ 10 フレーズの英文を入力した。なお、英文は、長すぎず覚えやすいかつ文字の出現頻度が均一である MacKenzie らの英文セット [BMB12] から選出された。実験参加者はこの英文を、人差し指のみを用いて、出来る限り高速かつ正確に入力するように指示された。なお、実験参加者の立ち位置を固定し、かつ仮想キーボードの位置座標をワールド座標系にて固定することにより偏角 θ を一定に保った。実験参加者は、実験中に腕および首に許容できないほど大きな疲労が生じた場合には、実行中の条件における英文入力を中断するように指示された。



図 4.2: 実験の様子.

4.2 結果

予備実験において、偏角 θ が 60 度の条件にて実験参加者 6 名が、偏角 θ が 75 度および 90 度の条件にて全ての実験参加者が首に大きな疲労を訴え実験を中断した。実験終了後、6 名の実験参加者は偏角 θ が 60 度、75 度、および 90 度の 3 条件において、2 名の実験参加者は偏角 θ が 75 度および 90 度の 2 条件において、身体への疲労が許容できないほど大きいと回答した。また、全ての実験参加者は、偏角 θ が 0 度、30 度、および 45 度の 3 条件は実験を継続して遂行できる程度の疲労であったと回答した。以上の結果より、本研究では実験参加者が安全に実験を行える仮想キーボードの偏角 θ の範囲を 0 度から 45 度とした。



図 4.3: 実験にて用いた仮想キーボード.

第5章 仮想キーボードの姿勢による影響の調査 実験

VR向け仮想キーボードの偏角 θ および姿勢角 ϕ が入力性能およびユーザの主観評価に与える影響を調査するために実験を行った。

5.1 実験参加者

18歳–26歳の大学生もしくは大学院生18名（うち女性4名、左利き3名、平均21.5歳、標準偏差1.98歳）を実験参加者とした。なお、実験参加者のうち2名は、予備実験にも参加していた。実験参加者18名のうち、7名が眼鏡、5名がコンタクトレンズを装着して実験に参加した。また、残りの6名は裸眼にて実験に参加した。実験参加者のうち、1名は日常的にVR向けHMDを使用しており、10名は過去にHMDを使用した経験があり、7名はHMDを使用した経験が一度もなかった。実験の所要時間は1人当たり2時間であった。実験参加者は実験後に謝礼として1720円を受け取った。

5.2 実験内容

実験参加者は、仮想キーボードの偏角 θ および姿勢角 ϕ が異なる条件（図1.3）において、両手の人差し指を用いた空中タップによる英文入力を行った。なお、実験環境および仮想キーボードの実装は予備実験と同様とした。実験開始前に、実験参加者の目線の高さ h （ $M=162.0\text{ cm}$, $SD=7.14\text{ cm}$ ）および腕の長さ r （ $M=72.0\text{ cm}$, $SD=3.85\text{ cm}$ ）を計測した。仮想キーボードは実験参加者ごとに腕を伸ばした位置に設置された。

はじめに、実験参加者は仮想キーボードの操作に慣れるための練習セッションを約2分間行った。実験では、偏角 θ を0度（図5.2）、22.5度（図5.3）、および45度（図5.4）の3条件、姿勢角 ϕ を0度および ± 15 度の3条件とした。偏角 θ の3条件は、予備実験の結果から得られた実験参加者が安全に実験を行える偏角 θ の範囲である0度から45度の範囲から定めた。姿勢角 ϕ の3条件は、物理キーボードを用いた先行研究に倣って決定した[SMB03]（図5.1）。実験参加者は、これらを組み合わせた9条件において、条件ごとに10フレーズの英文を入力した。入力される英文には、予備実験と同様にMacKenzieらの英文セット[BMB12]を用いた。参加者ごとの条件の出現順はラテン方格にて決定し、実験タスクにおける実験参加者間のカウンタバランスをとった。なお、実験参加者の立ち位置を固定し、かつ仮想キーボードの位置座

Press the button to start the test!



Press the button to start the test!



Press the button to start the test!



図 5.1: 姿勢角 ϕ が異なる 3 つの仮想キーボード。上 : -15 度, 中 : 0 度, 下 : 15 度.



図 5.2: 偏角 θ が 0 度の条件における実験の様子。

標をワールド座標系にて固定することにより偏角 θ を一定に保った。実験参加者は、出来る限り高速かつ正確に英文入力を行うように指示され、入力した英文は任意のタイミングにて提出できた。実験参加者は各条件の終了時に疲労評価アンケート（入力時に感じた疲労の 10 段階評価および疲労部位）、NASA-TLX [HS88]、および System Usability Scale (SUS) [Bro96] スコアを計測するためのアンケート、ならびに自由記述にて感想を回答した（付録 A.4）。疲労評価アンケートには、人型の図に対して実験参加者が疲労を感じた部位に丸を記入する欄、実験参加者が実験中に感じた全身の疲労を 10 段階のリッカート尺度にて総合評価する欄、および感想を尋ねる自由記入欄を設けた。

5.3 結果

入力性能の評価指標には入力速度（WPM: Words Per Minute [AS09]）および入力エラー率（MSD エラー率: Minimum String Distance Error Rate [SM03]）を用いた。

以降に、NASA-TLX より得られた加重ワークロード（以降、WWL : Weighted Workload）、SUS スコア、WPM、および MSD エラー率を統計解析した結果、ならびに疲労評価および主な疲労部位を示す。WWL および SUS スコアの解析には各条件単位のデータを用い、WPM および MSD エラー率の解析には各英文単位のデータを用いた。解析にあたり、各評価指標における四分位範囲の 1.5 倍を上下限として外れ値を取り除いた。その結果、全体の 98% のデータが解析対象となった。データを HMD の経験者および未経験者に分類して対応のある t 検定を行ったところ、有意差は検出されなかった。したがって、以降の解析では独立変数を偏角 θ および姿勢角 ϕ のみとし、主効果および交互作用を調べるために偏角 θ および姿勢角 ϕ を



図 5.3: 偏角 θ が 22.5 度の条件における実験の様子.

因子とした反復測定二元配置分散分析を行った. 事後検定にはボンフェローニ補正を施した対応のある t 検定を用いた. また, 有意水準を 0.05 とした.

5.3.1 入力性能

各偏角 θ および各姿勢角 ϕ の WPM ($M=19.3$, $SD=3.72$) を図 5.5 に示す. WPM は文字入力速度に関する指標であり, WPM が大きいほど入力速度が大きいことを表す. 反復測定二元配置分散分析の結果, WPM に対して偏角 θ ($p = 7.43 \times 10^{-3} < 0.05$) および姿勢角 ϕ ($p = 1.34 \times 10^{-7} < 0.05$) の主効果が検出された. なお, 交互作用は検出されなかった. 事後検定の結果, 偏角 θ に対して 0 度 ($M=19.07$) と 22.5 度 ($M=19.81$) との間 ($p = 1.90 \times 10^{-3} < 0.05$) および 22.5 度 ($M=19.81$) と 45 度 ($M=19.06$) との間 ($p = 1.40 \times 10^{-3} < 0.05$) に有意差が検出された. この結果より, 偏角 θ が WPM に影響を与えることおよび偏角 θ が 22.5 度の時に最も入力速度が大きいことが分かった. また, 姿勢角 ϕ が -15 度 ($M=18.43$) と 0 度 ($M=19.42$) との間 ($p = 3.00 \times 10^{-4} < 0.05$) および -15 度 ($M=18.43$) と 15 度 ($M=20.09$) との間 ($p = 2.50 \times 10^{-10} < 0.05$) の組み合わせに有意差が検出された. しかし, 0 度 ($M=19.42$) と 15 度 ($M=20.09$) との間 ($p = 5.13 \times 10^{-2} > 0.05$) には有意差が検出されなかった. この結果より, 姿勢角 ϕ が WPM に影響を与えることおよび姿勢角 ϕ が -15 度の条件において最も入力速度が小さいことが分かった.

次に, MSD エラー率の解析結果を示す. MSD エラー率は提示された英文と提出された英文とがどの程度異なっているかを示しており, MSD エラー率が大きいほど誤った文字入力が直されず, 残ったまま提出されていることを表す. 各偏角 θ および各姿勢角 ϕ の MSD エラー



図 5.4: 偏角 θ が 45 度の条件における実験の様子。

率 ($M=0.77\%$, $SD=0.73\%$) において反復測定二元配置分散分析を行った結果, MSD エラー率に対して偏角 θ ($p = 5.16 \times 10^{-2} > 0.05$) および姿勢角 ϕ ($p = 0.29 > 0.05$) の主効果および交互作用は検出されなかった。

5.3.2 主観評価

各偏角 θ および各姿勢角 ϕ の WWL ($M=54.2$, $SD=13.3$) を図 5.6 に示す。なお, WWL が大きいほど主観的作業負荷が大きいことを表す。反復測定二元配置分散分析の結果, WWL に対して偏角 θ ($p = 1.51 \times 10^{-3} < 0.05$) の主効果が検出された。なお, 交互作用は検出されなかった。ただし, 姿勢角 ϕ ($p = 0.22 > 0.05$) の主効果および交互作用は検出されなかった。事後検定の結果, 偏角 θ が 0 度 ($M=58.32$) と 22.5 度 ($M=52.39$) との間 ($p = 2.20 \times 10^{-4} < 0.05$) および 0 度 ($M=58.32$) と 45 度 ($M=52.01$) との間 ($p = 9.60 \times 10^{-5} < 0.05$) に有意差が検出された。この結果より, 偏角 θ が WWL に影響を与えることおよび偏角 θ が 0 度の条件において最も主観的作業負荷が大きいことが分かった。

各偏角 θ および各姿勢角 ϕ の SUS スコア ($M=73.7$, $SD=12.2$) を図 5.7 に示す。なお, SUS スコアが大きいほどユーザビリティが高いことを表す。反復測定二元配置分散分析の結果, SUS スコアに対して偏角 θ ($p = 1.45 \times 10^{-3} < 0.05$) および姿勢角 ϕ ($p = 0.03 < 0.05$) の主効果が検出された。なお, 交互作用は検出されなかった。事後検定の結果, 偏角 θ が 0 度 ($M=70.88$) と 22.5 度 ($M=75.65$) との間 ($p = 3.20 \times 10^{-3} < 0.05$) および 0 度 ($M=70.88$) と 45 度 ($M=74.49$) との間 ($p = 2.24 \times 10^{-2} < 0.05$) に有意差が検出された。この結果より, 偏角 θ が SUS スコアに影響を与えることおよび偏角 θ が 0 度の条件において最もユーザ

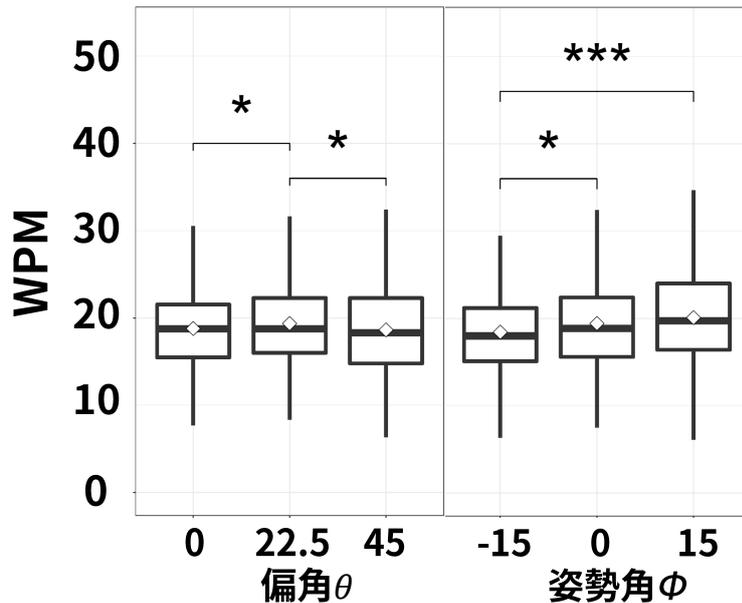


図 5.5: 各偏角 θ および各姿勢角 ϕ のWPM (白い点は平均値を示す)。

ビリティが低いことが分かった。また、姿勢角 ϕ が -15 度 ($M=71.57$) と 15 度 ($M=75.15$) との間 ($p = 4.70 \times 10^{-3} < 0.05$) に有意差が検出された。なお、交互作用は検出されなかった。この結果より、姿勢角 ϕ が -15 度の条件に比べて姿勢角 ϕ が 15 度の条件におけるユーザビリティが高いことが分かった。

5.3.3 アンケート結果

疲労評価アンケートの結果 ($M=4.11$, $SD=1.95$) を図 5.8 に示す。反復測定二元配置分散分析の結果、疲労評価アンケートの結果に対して偏角 θ ($p = 2.36 \times 10^{-11} < 0.05$) の主効果が検出された。ただし、姿勢角 ϕ ($p = 0.27 > 0.05$) の主効果および交互作用は検出されなかった。事後検定の結果、偏角 θ が 0 度 ($M=5.04$) と 22.5 度 ($M=3.72$) との間 ($p = 1.75 \times 10^{-3} < 0.05$) および 0 度 ($M=5.04$) と 45 度 ($M=3.63$) との間 ($p = 0.69 \times 10^{-3} < 0.05$) に有意差が検出された。この結果より、偏角 θ が 0 度の時の疲労は、偏角 θ が 22.5 度および 45 度の時に比べて大きいことが分かった。疲労評価アンケートの結果、上腕の疲労が合計 75 件、首の疲労が合計 55 件、肩の疲労が合計 36 件、前腕の疲労が合計 24 件、手の疲労が合計 19 件、目の疲労が合計 13 件、およびその他の部位の疲労が合計 10 件報告された。この結果より、我々は疲労の報告件数が多い上腕および首に着目し、仮想キーボードの偏角 θ および姿勢角 ϕ ごとの上腕および首の疲労報告件数の傾向を調査した。各偏角 θ および各姿勢角 ϕ に対する上腕および首の疲労を報告した人数を図 5.9 に示す。図 5.9 では、実線が上腕、点線が首の疲労を報告した実験参加者の人数を表している。上腕および首の疲労を報告した人数と偏角 θ および姿勢角 ϕ についてスピアマンの順位相関係数の無相関検定を行った。検定の結果、上腕の疲労を報告した人数と偏角 θ

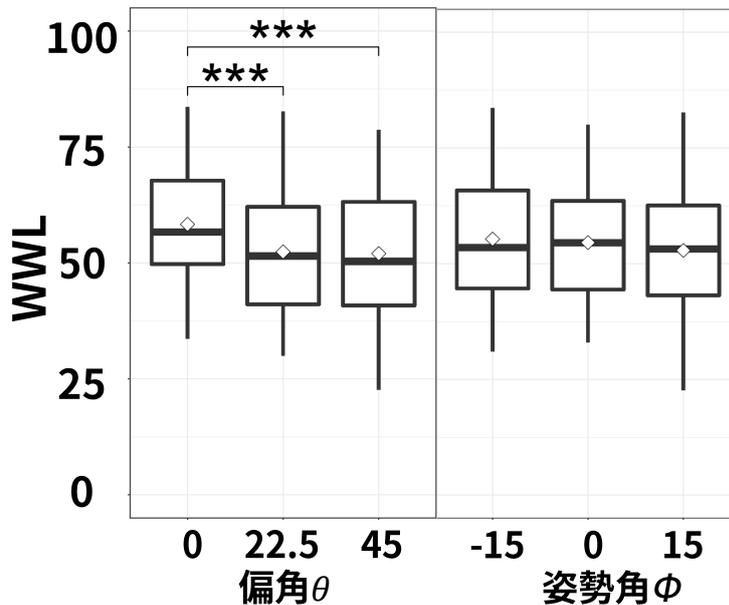


図 5.6: 各偏角 θ および各姿勢角 ϕ の WWL (白い点は平均値を示す).

との間に負の相関 ($r=-0.94$) が検出された ($p = 9.59 \times 10^{-5} < 0.05$). また, 首の疲労を報告した人数と偏角 θ との間に正の相関 ($r=0.95$) が検出された ($p = 7.26 \times 10^{-5} < 0.05$). したがって, 偏角 θ が小さい時には上腕の疲労の報告が増え, 偏角 θ が大きい時には首の疲労の報告が増えることが分かった. なお, 上腕の疲労を報告した人数と姿勢角 ϕ との間 ($p = 1.00 > 0.05$), および首の疲労を報告した人数と姿勢角 ϕ との間 ($p = 0.78 > 0.05$) には相関が検出されなかった. 以上より, 姿勢角 ϕ に比べ偏角 θ の方が上腕および首の疲労への影響が大きいと考えられる.

実験にて各セッション終了後に回答してもらったアンケートにおける自由記述の感想のうち, ポジティブな感想およびネガティブな感想を集計した結果を図 5.10 に示す. ポジティブな感想は, 「指を引き抜きやすい」, 「キーが押しやすい」, および「見やすい角度だった」等の感想であり, ネガティブな感想は, 「操作しづらい」, 「疲れる」, および「キーが押しにくい」等の感想であった. これらの感想について, 経験者および未経験者ともに内容の偏りはみられなかった. 図 5.10 より, 仮想キーボードの姿勢角 ϕ が -15 度の条件においてポジティブな感想が最も少なく, 姿勢角 ϕ が 15 度の条件においてポジティブな感想が最も多いことが分かった. また反対に, 仮想キーボードの姿勢角 ϕ が -15 度の条件においてネガティブな感想が最も多く, 姿勢角 ϕ が 15 度の条件においてネガティブな感想が最も少ないことが分かった. 以上のアンケート結果より, 実験参加者は仮想キーボードの姿勢角 ϕ が -15 度の条件に比べて, 姿勢角 ϕ が 15 度の条件における文字入力を好むことが分かった.

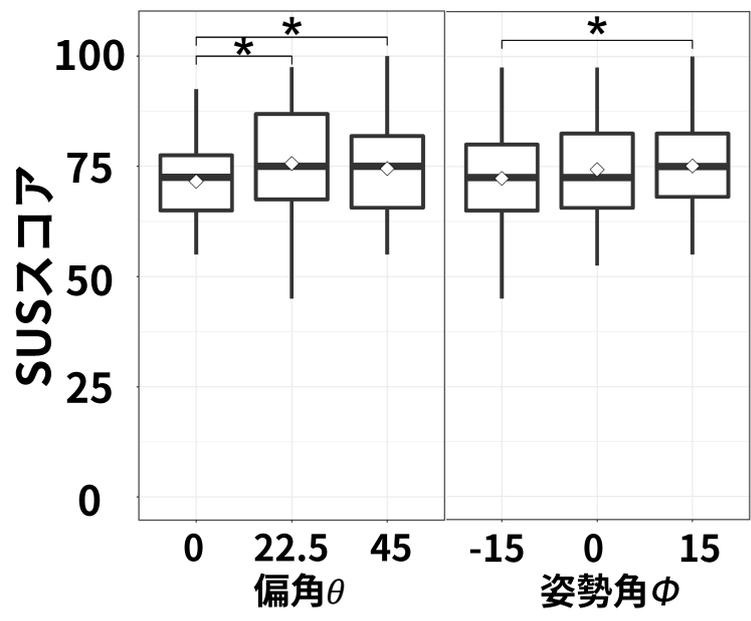


図 5.7: 各偏角 θ および各姿勢角 ϕ の SUS スコア (白い点は平均値を示す).

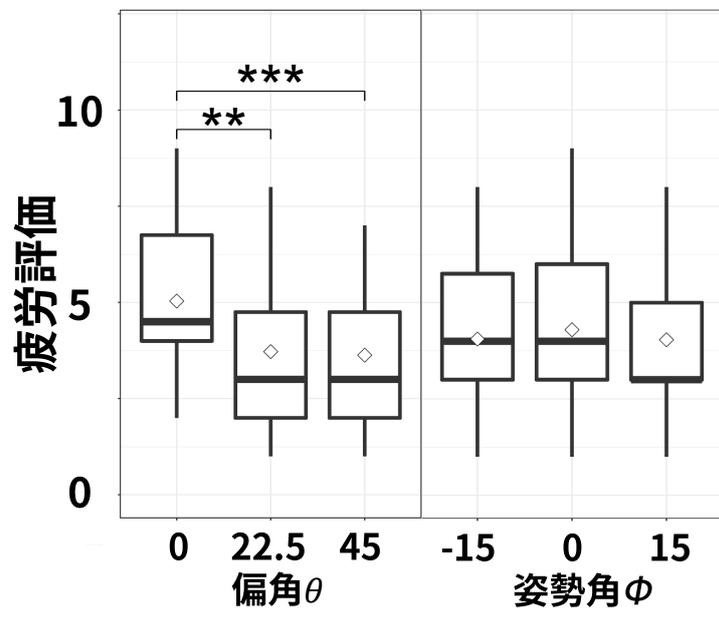


図 5.8: 各偏角 θ および各姿勢角 ϕ の疲労 (白い点は平均値を示す).

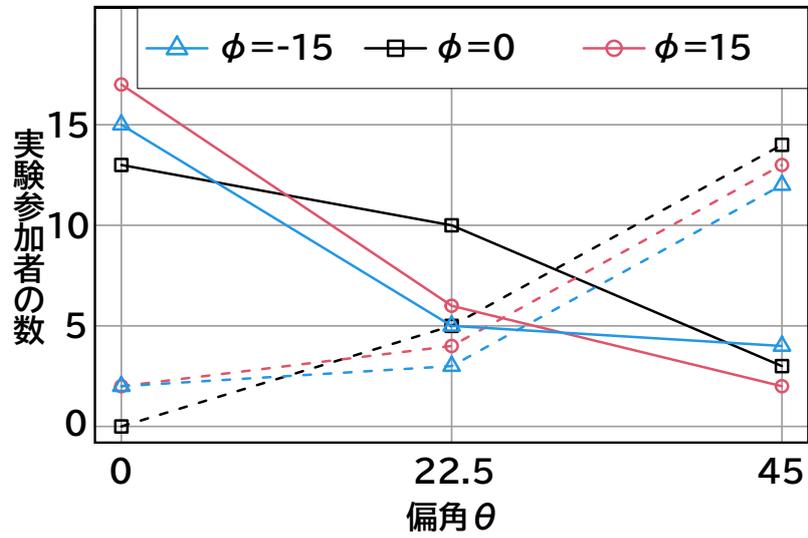


図 5.9: 上腕および首の疲労を訴えた人数および偏角 θ の関係 (実線 : 上腕, 点線 : 首).

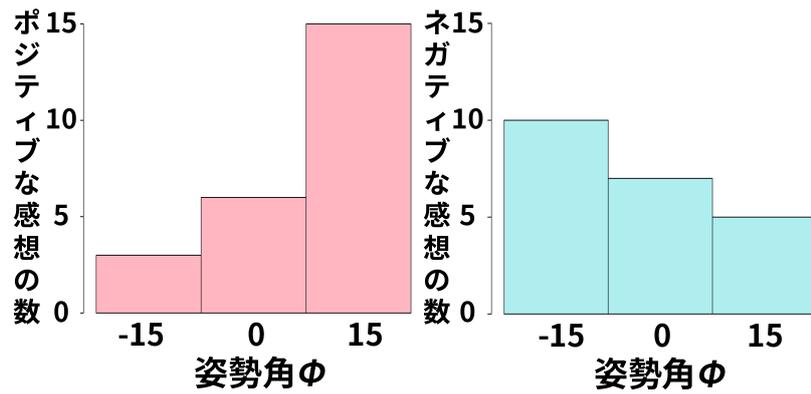


図 5.10: 各姿勢角 ϕ のポジティブな感想およびネガティブな感想の数.

第6章 仮想キーボードの姿勢による影響に関する考察

第5章にて述べた実験より、VR向け仮想キーボードの偏角 θ および姿勢角 ϕ が入力性能およびユーザの主観評価へ影響を与えることが分かった。なお、入力性能およびユーザの主観評価の両観点において、仮想キーボードの位置および角度による相互作用が検出されなかったことから、仮説 H_1 は棄却された。本章では実験結果に基づき、仮想キーボードの位置および角度のそれぞれが及ぼす影響をまとめ、考察を述べる。

6.1 入力性能

偏角 θ が22.5度の条件において最も入力速度が大きいこと、および図5.9より偏角 θ が22.5度の条件において上腕または首の疲労を報告する人数が少ない傾向にあることから、仮想キーボードの配置が高過ぎるまたは低過ぎると、上腕または首に疲労が生じ、かつ入力性能が低下することが示唆された。加えて、姿勢角 ϕ が-15度の条件における入力速度が最も小さいことから、仮想キーボードをユーザから見て手前方向に傾けることにより入力速度が低下することが分かった。以上より、位置および角度のそれぞれにおいて入力速度が高い、偏角 θ が22.5度かつ姿勢角 ϕ が15度の条件が最も入力速度の高い仮想キーボードの設置条件であると考えられる。

実験参加者の自由記述の感想において、姿勢角 ϕ が-15度の条件にて「距離感が掴みにくい」、「距離感が取りづらかった」、「キーボードが奥側にあるように感じた」という感想が得られた。このことから、仮想キーボードが手前方向へ傾いている条件では、キーボードの遠近感の知覚に齟齬が生じていた可能性がある。遠近知覚の原理[今村01]では、相対的な位置が上にあるものは過大視され、下にあるものは過小視される。これに基づけば、仮想キーボードが手前方向へ傾いた場合、奥方向へ傾いた条件よりも文字の見え方および遠近感の知覚の齟齬が大きくなると考えられる。そのため、入力速度が低下したと考えられる。キーボードの傾きによる遠近感の齟齬は長期利用により慣れることができると考えられるため、長期間継続して手前方向に傾けた仮想キーボードを使用する実験を行い、その入力速度の推移を調査する必要がある。

一方、偏角 θ および姿勢角 ϕ がMSDエラー率に影響を与えないことが分かった。MSDエラー率が小さいことから、ユーザは入力速度よりも入力精度を意識して文字入力を行ったと考えられる。これはQWERTY配列の仮想キーボードを人差し指のみで入力する

動作が普段の物理キーボードにおける入力方法と異なることも一要因として考えられる。

6.2 ユーザの主観評価

偏角 θ が 0 度の条件において首の疲労に比べて腕の疲労が大きい、かつ偏角 θ が 0 度の条件において最も主観的作業負荷が大きいと実験参加者が述べていること、および偏角 θ が 0 度の条件において最もユーザビリティが低いことから、実験参加者は首よりも腕の疲労が高い時により主観的作業負荷を感じ、ユーザビリティが低くなる傾向があると考えられる。よって、VR アプリケーションのデザインにおいて、ユーザの手指およびコントローラを用いてオブジェクトに触れる操作は、HMD および頭部の自重を考慮しても、Bachynskyi ら [BPOW15] の報告と同様に、ユーザの目線より低い位置（本研究において偏角 θ が 22.5 度の位置）にて行うことが好ましいと考えられる。また、ユーザは首よりも腕の疲労が高い時により主観的作業負荷を感じる傾向があることから、VR アプリケーションのデザインにおいて、仮想キーボードをユーザの目線より低い位置に設置することにより、主観的作業負荷を抑えられると考えられる。しかし、仮想キーボードを偏角 θ が 60 度以上の位置に表示すると、首への負荷が大きくなるため、偏角 θ を 45 度以下にする必要がある。これらの観点から、腕の疲労が小さな位置にて手の動きをトラッキング [ILY+21, FM18, BCF+20, GWO+18] しつつ、首の疲労が小さい目線の高さにハンドオブジェクトおよび仮想キーボードを表示し入力する手法も仮想キーボードの設計として効果的であると考えられる。

姿勢角 ϕ が -15 度の条件に比べて姿勢角 ϕ が 15 度の条件におけるユーザビリティが高いことから、VR 向け仮想キーボードをユーザから見て奥方向に傾けるのは手前方向に傾けるよりもユーザビリティを向上させることが示唆された。加えて、図 5.10 より、実験参加者は仮想キーボードの姿勢角 ϕ が -15 度の条件よりも姿勢角 ϕ が 15 度の条件における文字入力を好んだ。ユーザが日常的に使用する物理キーボードは地面に対して水平に置かれていることから、今回の姿勢角 ϕ が 15 度の条件は他の条件に比べ普段の文字入力環境に近かった。そのため、実験参加者は、物理キーボードの傾きにより近い奥方向に傾いた仮想キーボードを好んだと考えられる。以上より、仮想キーボードを手前方向へ傾けることは、入力性能およびユーザの主観評価の両観点に影響を与えていることから、仮説 H_2 は支持された。

6.3 制限

本研究では仮想キーボードを用いた小文字の英単語からなる英文入力のみを行ったが、仮想キーボードの用途として大文字の英単語入力、日本語入力、および記号入力も想定される。日本語入力では文字変換のためにスペースキーが用いられ、大文字の英単語入力および記号入力には主に Shift キーが用いられる。そのため、物理キーボードと同様の入力方法により、大文字の英単語入力、日本語入力、および記号入力を行う際には、本研究におけるキーボードの設置指針は適用できない。一方で、空中タップによる文字入力にて複数の指をタップに用いた場合、意図しないタップによる誤タップが増加すること [DBWK19, FDG+21]、ならば

にタップ回数および手の移動量の増加による主観的作業負荷の増加およびユーザビリティの低下が懸念される。したがって、これらの課題に対して、複数の指によるキーボード入力の代わりに、ピンチ動作のような片手ジェスチャをスペースキーおよび Shift キーに割り当て、人差し指のみで文字入力を行う手法が考えられる。これにより、タップ回数および手の移動量の増加を抑えられるとともに、本研究におけるキーボードの設置指針が適用できると考えられる。したがって、片手ジェスチャをスペースキーおよび Shift キーに割り当てることにより、小文字の英単語以外の文字入力における入力性能および主観評価を調査する必要がある。

第7章 手首の屈曲および伸展により操作される 仮想キーボード

続いて、QWERTY キーボードの概形を保ちつつ、奥方向のポインティングおよびユーザの手の移動量を削減することを目的とし、手首の屈曲および伸展により操作される仮想キーボードを実装した。以下に、提案手法の仮想キーボードの設計および操作方法を示す。

7.1 仮想キーボードの設計

図 7.1 に、今回実装した仮想キーボードの概形を示した。空中タップによる仮想キーボードへの文字入力において、ユーザは QWERTY 配列を好むことが報告されている [MJH13]。したがって、本手法における仮想キーボードのキー配列は、図 7.1 のような QWERTY 配列とした。本手法では、QWERTY キーボードを上部および下部に 2 分割し、下部に表示した中段を奥方向に 75 度、下段を奥方向に 90 度だけ傾けたひな壇状に設計した。

Bachynskyi ら [BPOW15] は、3 次元インタラクションにおける疲労の少ない仮想キーボードの大きさについて、70.00 cm × 21.00 cm の領域に収めることを推奨している。また、日本人の肩幅の大きさは約 43 cm である [Hos84]。これらに基づき、提案キーボードの大きさを 42.50 cm × 12.25 cm とした。また、仮想キーボードのキーの形状については、直方体である場合の入力性能が高いことが報告されている [DA20b]。したがって、提案キーボードのキーの形状を 3.75 cm × 3.75 cm × 1.25 cm の直方体とした。また、キーを等間隔に配置するためにキー同士の間隔を 0.50 cm、手首の屈曲にてキーをタップするために上段および中段の間隔を 5.50 cm とした。誤タップを減らすために、キーの縦横方向の当たり判定を 4.25 cm、およびキーの奥行方向の当たり判定を 6.25 cm とし、キーの正面からのタップのみ有効とした。なお、提案キーボードにおけるキーの当たり判定については、誤タップを防ぐために上段が下面のみ、中段および下段が上面のみ有効とし、ユーザの指がキーに触れた時に文字が入力された。

7.2 操作方法

今回実装した仮想キーボードの操作手順を図 7.2 に示す。本手法では、ユーザは図 7.2A のように上段および中段の間の空間に手指を挿入した状態から、手指の左右の動作に加えて手



図 7.1: QWERTY 配列の上段のキーが上部，中段および下段のキーが下部に配置された仮想キーボード。

首の屈曲および伸展動作，および親指の屈曲動作により文字入力を行う．入力に要する動作は具体的には以下の通りである．

- 図 7.2B のように手首を伸展させることにより上段のキーをタップする (図 7.3)．
- 図 7.2C のように手首を屈曲させることにより中段のキーをタップする (図 7.4)．
- 図 7.2D のように親指を屈曲させることにより下段のキーおよびスペースキーをタップする (図 7.5)．

なお，上段および中段のタップでは両手の人差し指による空中タップのみを，下段のみ両手の親指による空中タップを有効とした．この設計は，両手のすべての指を用いた場合は指の追従動作による誤タップが多く，両手の人差し指のみを用いた場合の入力性能が最も高いという報告に基づく [DBWK19]．また，ユーザがキーをタップした際には，キーの色は赤色になり，かつ電子音によるフィードバックが与えられる．

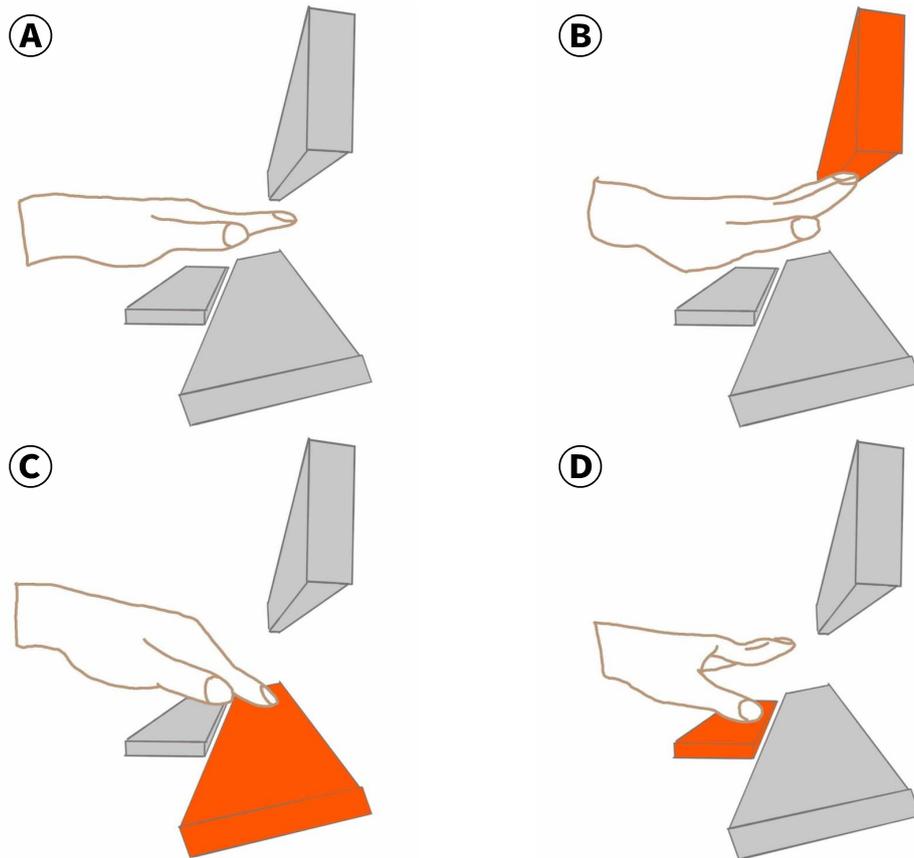


図 7.2: 人差し指提案キーボードの操作手順. A:ホームポジション, B:上段のキーのタップ, C:中段のキーのタップ, D:下段のキーのタップ.

Press the button to start the test!

hci



Press the button to start the test!

hci



図 7.3: 上段のキー「I」をタップする様子。上:正面, 下:斜め後ろ.



図 7.4: 中段のキー「H」をタップする様子。上:正面, 下:斜め後ろ.

Press the button to start the test!

hc



Press the button to start the test!

hc



図 7.5: 下段のキー「C」をタップする様子。上:正面, 下:斜め後ろ.

第8章 提案手法の評価実験

提案キーボードの入力性能，主観評価，および手の移動量を測定するために，提案キーボードおよび QWERTY キーボードを用いた実験を行った．なお，提案キーボードが人差し指および親指を用いた操作であるため，提案キーボードおよび QWERTY キーボードにおいて，文字入力に人差し指のみを用いた人差し指条件，人差し指および親指を用いた 2 本指条件の 2 条件を比較した．

8.1 実験参加者

実験では，18 歳–23 歳の大学生もしくは大学院生 8 名（平均 22.25 歳，標準偏差 1.48 歳，女性 1 名，左利き 1 名）をボランティアの実験参加者とした．実験参加者のうち，2 名が眼鏡，1 名がコンタクトレンズを装着して実験に参加した．また，残りの 5 名は裸眼にて実験に参加した．実験参加者のうち，7 名は過去に HMD を使用した経験があり，1 名は HMD を使用した経験が一度もなかった．なお，実験参加者のうち，4 名は過去に空中タップを用いた VR 向け文字入力の実験に参加した経験があり，4 名は空中タップを用いた VR 向け文字入力の実験に参加した経験がなかった．実験の所要時間は 1 人当たり 60 分であった．

8.2 実験環境

本実験では，VR 向け HMD に HTC VIVE を，コンピュータには ALIENWARE m15 (Intel® Core™ i7-8750H, 16 GB RAM, NVIDIA® GeForce® GTX 1060, Windows 10) を用いた．空中タップを検出するために，HMD の前面に Leap Motion を装着した．Leap Motion は，図 4.1 のように HMD の前面に装着した．赤外線による Leap Motion への外乱の影響を防ぐために直射日光が当たらない環境にて実験を行った．また，Unity の環境において C# を用いて実験用アプリケーションを実装した．文字入力タスクに伴う実験参加者の疲労を抑えるため，6 章にて述べた仮想キーボードの設置指針に基づき仮想キーボードは実験参加者の目線の高さから下方向に 22.5 度の位置に表示した．実験中の VR 空間の背景は無地の白色とした．

図 8.1 に提案キーボードを用いた実験の様子を示す．実験に用いた QWERTY キーボード (図 8.2) の大きさは，提案キーボードと同様に Bachynskyi ら [BPOW15] の報告および日本人の肩幅の大きさ [Hos84] を考慮して，42.50 cm × 12.25 cm とした．仮想キーボードのキーの形状は，平面形状の入力性能に比べて立体形状の入力性能の方が優れているため [DA20b]，縦 3.75 cm，横 3.75 cm，奥行き 1.25 cm の直方体とした (図 8.2)．また，キー同士の幅を 0.50 cm，



図 8.1: 提案キーボードを用いた実験の様子。

キーの縦横方向の当たり判定を 4.15 cm，およびキーの奥行方向の当たり判定を 6.25 cm とした。実験参加者がキーをタップした際には，そのキーの色は赤色になり，かつクリック音が再生された。

実験にて提案キーボードにおける 2 本指条件と比較した文字入力手法の操作手順を図 8.3 に示す。提案キーボードにおける人差し指条件では，上段および中段のキー入力は図 7.2B および図 7.2C と同様だが，下段のキーおよびスペースキーの入力のみ図 8.3E のように人差し指を用いてタップした。QWERTY キーボードにおける人差し指条件では，図 8.3F のように全てのキーに対して人差し指を用いて正面からタップした。また，2 本指条件では，図 8.3F および図 8.3G のように全てのキーに対して人差し指および親指を用いて正面からタップした。

8.3 実験内容

実験参加者は，文字入力に提案キーボード（図 1.4）もしくは QWERTY キーボード（図 4.3）を用いる 2 条件に加え，人差し指条件あるいは 2 本指条件の 2 条件において，条件ごとに 10 フレーズの英文入力を行った。入力される英文には，MacKenzie らの英文セット [BMB12] を用いた。実験参加者ごとの条件の出現順をラテン方格にて決定することにより，実験タスクにおける実験参加者間の順序効果を除いた。なお，実験参加者の立ち位置を固定し，かつ仮想キーボードの位置座標をワールド座標系にて固定することにより，実験参加者および仮想キーボード間の位置関係を一定に保ち，かつ実験参加者の身動きによる仮想キーボードの微動を防止した。はじめに，実験参加者は仮想キーボードの操作方法を理解するための練習セッションを約 2 分間行った。練習セッションでは，例文を表示せず，実験参加者が仮想キーボード



図 8.2: 実験にて用いた QWERTY キーボード。

の操作方法を理解できるまで自由に文字を入力した。実験参加者は、できる限り高速かつ正確に英文入力を行うように指示され、入力した英文は任意のタイミングにて提出できた。実験参加者は各条件の終了時に NASA Task Load Index (NASA-TLX) [HS88], System Usability Scale (SUS) [Bro96] スコアを計測するためのアンケート、および自由記述にて感想を回答した。

8.4 結果

入力性能の評価指標に入力速度 (WPM: Words Per Minute [AS09]) およびエラー率 (TER : Total Error Rate [MJH13]) を用いた。TER は、タップした全てのキーを測定した後に、以下の式にて計算される。

$$TER = \frac{INF + IF}{C + INF + IF} \times 100$$

ここで C は正しく入力された文字数、 INF は誤って入力され修正されなかった文字数、 IF 誤って入力された後修正された文字数である。また、実験参加者の手の移動量の評価指標には、1 単語当たりの手の移動量 (HMPW : Hand Movement Per Word [MJH13]) を用いた。HMPW は、1 フレーズごとに最初の文字から最後の文字の入力までの手の移動量を測定した後に、以下の式にて計算される。

$$HMPW = \frac{|HM| \times 5}{|T| - 1} \times 100$$

HM は、1 フレーズの文字入力における実験参加者の手の移動量の合計であり、 T は入力されたフレーズの文字数である。

以降に、WPM, NASA-TLX より得られた加重ワークロード (以降, WWL: Weighted Workload), SUS スコア、および HMPW を統計解析した結果を示す。WPM は文字入力の速度に関する指

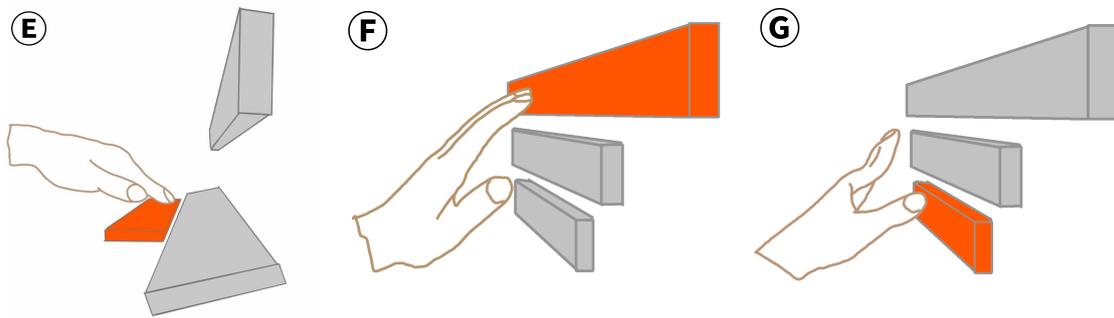


図 8.3: 実験にて比較した文字入力手法の操作手順. E: 人差し指条件における提案キーボードの下段およびスペースキーのタップ. F: 人差し指による QWERTY キーボードのタップ. G: 2 本指条件における QWERTY キーボードのタップ.

標であり, WPM が大きいほど入力が速いことを表す. TER は文字入力におけるエラー率に関する指標であり, TER が大きいほどエラー率が高いことを表す. WWL は作業負荷に関する指標であり, WWL が大きいほど主観的作業負荷が大きいことを表す. SUS スコアはユーザビリティに関する指標であり, SUS スコアが大きいほどユーザビリティが高いことを表す. HMPW はユーザの手の移動量に関する指標であり, HMPW が大きいほど 1 単語当たりの手の移動量が大きいことを表す. なお, HMPW はユーザから見て左右方向を x 方向, 上下方向を y 方向, および前後方向を z 方向として総移動量および各方向成分の解析を行った. WWL, SUS スコア, および HMPW の解析には各セッション単位のデータを用い, WPM および TER の解析には各英文フレーズ単位のデータを用いた. 主効果および交互作用を調べるために文字入力手法および入力に用いた指の本数を因子とした多変量分散分析を行った. 事後検定にはボンフェローニ補正を施した対応のある t 検定を用いた. また, 有意水準を 0.05 とした. 多変量分散分析の結果, WPM および TER において, 入力に用いた指の本数 ($p = 9.66 \times 10^{-7} < 0.05$) の主効果および交互作用 ($p = 1.27 \times 10^{-4} < 0.05$) が検出された. なお, WPM および TER において, 各仮想キーボード ($p = 6.77 \times 10^{-2} > 0.05$) の主効果は検出されなかった. また, WWL, SUS スコア, および HMPW において, 各仮想キーボード ($p = 6.67 \times 10^{-14} < 0.05$) および入力に用いた指の本数 ($p = 6.76 \times 10^{-10} < 0.05$) の主効果および交互作用 ($p = 1.07 \times 10^{-9} < 0.05$) が検出された.

8.4.1 入力性能

各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における WPM ($M=11.60$, $SD=4.09$) を図 8.4 および図 8.5 に示す. 従属変数ごとに多変量分散分析を行った結果, WPM に対して人差し指条件 ($M=12.12$) および 2 本指条件 ($M=11.11$) の有意差 ($p = 2.79 \times 10^{-2} < 0.05$) および交互作用 ($p = 1.66 \times 10^{-3} < 0.05$) が検出された. 事後検定の結果, 人差し指条件にお

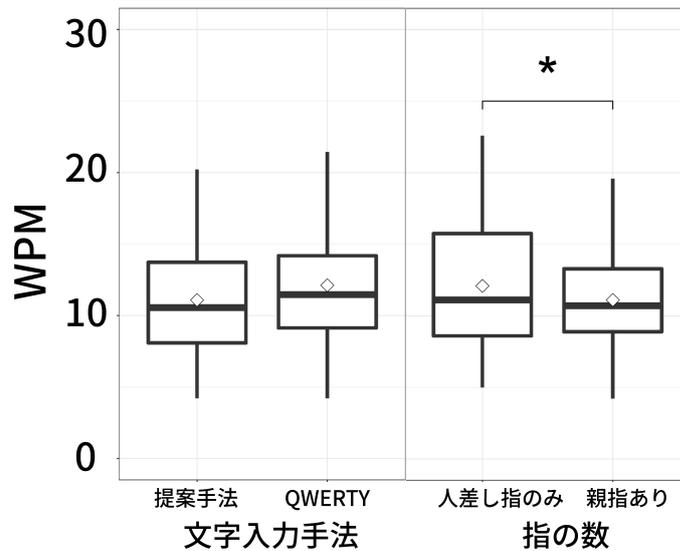


図 8.4: 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における WPM.

る QWERTY キーボード ($M=13.32$) と 2 本指条件における QWERTY キーボード ($M=10.91$) との間 ($p = 1.02 \times 10^{-3} < 0.05$), 人差し指条件における QWERTY キーボード ($M=13.32$) と人差し指条件における提案キーボード ($M=10.86$) との間 ($p = 0.74 \times 10^{-3} < 0.05$), および人差し指条件における QWERTY キーボード ($M=13.32$) と 2 本指条件における提案キーボード ($M=11.29$) との間 ($p = 8.90 \times 10^{-3} < 0.05$) に有意差が検出された. この結果より, 人差し指条件に比べ 2 本指条件の入力速度が低いことが分かった. また, 人差し指条件における QWERTY キーボードの入力性能が最も高いことが分かった.

各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における TER ($M=15.58\%$, $SD=13.98\%$) を図 8.6 および図 8.7 に示す. 従属変数ごとに多変量分散分析を行った結果, TER に対して人差し指条件 ($M=15.59$) および 2 本指条件 ($M=19.36$) の有意差 ($p = 6.65 \times 10^{-7} < 0.05$) および交互作用 ($p = 1.79 \times 10^{-3} < 0.05$) が検出された. 事後検定の結果, 人差し指条件における QWERTY キーボード ($M=9.46$) と 2 本指条件における提案キーボード ($M=17.00$) との間 ($p = 0.24 \times 10^{-2} < 0.05$), 2 本指条件における提案キーボード ($M=17.00$) と人差し指条件における提案キーボード ($M=14.14$) との間 ($p = 0.22 \times 10^{-2} < 0.05$), および 2 本指条件における QWERTY キーボード ($M=21.71$) と人差し指条件における QWERTY キーボード ($M=9.46$) との間 ($p = 0.89 \times 10^{-7} < 0.05$) に有意差が検出された. この結果より, 人差し指条件に比べ 2 本指条件のエラー率が高いこと, および人差し指条件における QWERTY キーボードのエラー率が低く 2 本指条件における QWERTY キーボードのエラー率が高いことが分かった.

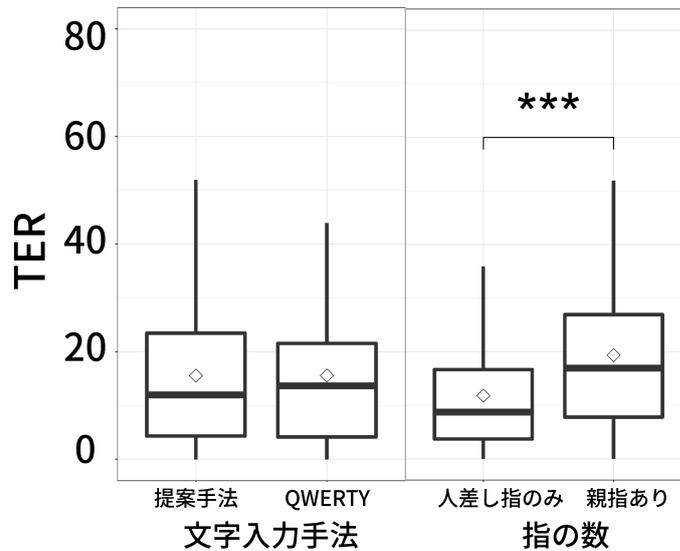


図 8.6: 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における TER.

0.05) および人差し指条件 ($M=62.53$) および 2 本指条件 ($M=58.05$) の有意差 ($p = 0.02 < 0.05$) が検出された. なお, 交互作用 ($p = 0.38 > 0.05$) は検出されなかった. この結果より, QWERTY キーボードに比べ提案キーボードの HMPW が小さいこと, および人差し指条件に比べ 2 本指条件の HMPW が小さいことが分かった.

各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における右手 x 方向の HMPW ($M=36.13$ cm, $SD=11.63$ cm) を図 8.11 および図 8.12 に示す. 従属変数ごとに多変量分散分析を行った結果, 右手 x 方向の HMPW に対して提案キーボード ($M=27.73$) および QWERTY キーボード ($M=44.51$) の有意差 ($p = 2.64 \times 10^{-10} < 0.05$), 人差し指条件 ($M=40.91$) および 2 本指条件 ($M=30.50$) の有意差 ($p = 2.23 \times 10^{-7} < 0.05$), および交互作用 ($p = 2.46 \times 10^{-3} < 0.05$) が検出された. 事後検定の結果, 2 本指条件における提案キーボード ($M=25.16$) と人差し指条件における QWERTY キーボード ($M=53.18$) との間 ($p = 0.13 \times 10^{-10} < 0.05$), 2 本指条件における提案キーボード ($M=25.16$) と 2 本指条件における QWERTY キーボード ($M=35.85$) との間 ($p = 0.64 \times 10^{-3} < 0.05$), 人差し指条件における提案キーボード ($M=30.31$) と人差し指条件における QWERTY キーボード ($M=53.18$) との間 ($p = 0.13 \times 10^{-8} < 0.05$), および人差し指条件における提案キーボード ($M=30.31$) と 2 本指条件における QWERTY キーボード ($M=35.85$) との間 ($p = 0.36 \times 10^{-6} < 0.05$) に有意差が検出された. この結果より, QWERTY キーボードに比べ提案キーボードの HMPW が小さいこと, および人差し指条件に比べ 2 本指条件の HMPW が小さいことが分かった. また, 人差し指条件における QWERTY キーボードの HMPW が最も大きく, 2 本指条件における提案キーボードの HMPW が最も小さいことが分かった.

各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における右手 y 方向の HMPW ($M=28.75$ cm, $SD=9.38$ cm) を図 8.13 および図 8.14 に示す. 従属変数ごとに多変量分散分析を行った結果, 右

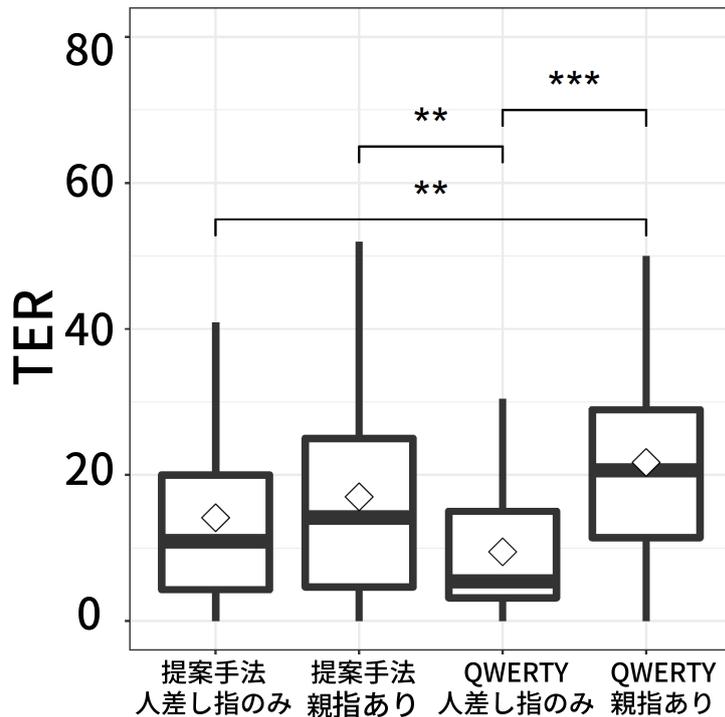


図 8.7: 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数を組み合わせた 4 条件における TER.

手y方向のHMPWに対して提案キーボード(M=20.33)およびQWERTYキーボード(M=37.18)の有意差($p = 0.26 \times 10^{-14} < 0.05$), 人差し指条件(M=26.83)および2本指条件(M=30.17)の有意差($p = 0.02 < 0.05$), および交互作用($p = 7.18 \times 10^{-4} < 0.05$)が検出された. 事後検定の結果, 2本指条件における提案キーボード(M=19.69)と人差し指条件におけるQWERTYキーボード(M=33.70)との間($p = 0.34 \times 10^{-8} < 0.05$), 人差し指条件における提案キーボード(M=20.96)と2本指条件におけるQWERTYキーボード(M=40.65)との間($p = 0.14 \times 10^{-11} < 0.05$), 2本指条件における提案キーボード(M=19.69)と2本指条件におけるQWERTYキーボード(M=40.65)との間($p = 0.31 \times 10^{-8} < 0.05$), 人差し指条件における提案キーボード(M=20.96)と人差し指条件におけるQWERTYキーボード(M=33.70)との間($p = 0.24 \times 10^{-7} < 0.05$), および人差し指条件におけるQWERTYキーボード(M=33.70)と2本指条件におけるQWERTYキーボード(M=40.65)との間($p = 0.53 \times 10^{-3} < 0.05$)に有意差が検出された. この結果より, QWERTYキーボードに比べ提案キーボードのHMPWが小さいこと, および人差し指条件に比べ2本指条件のHMPWが大きいことが分かった. また, 2本指条件におけるQWERTYキーボードのHMPWが最も大きく, 次いで人差し指条件におけるQWERTYキーボードのHMPWが大きいことが分かった.

各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における右手z方向のHMPW(M=37.83 cm, SD=14.02 cm)を図 8.15 に示す. 従属変数ごとに多変量分散分析を行った結果, 右手z方向のHMPWに対して提案キーボード(M=24.77)およびQWERTYキーボード(M=50.89)の有意

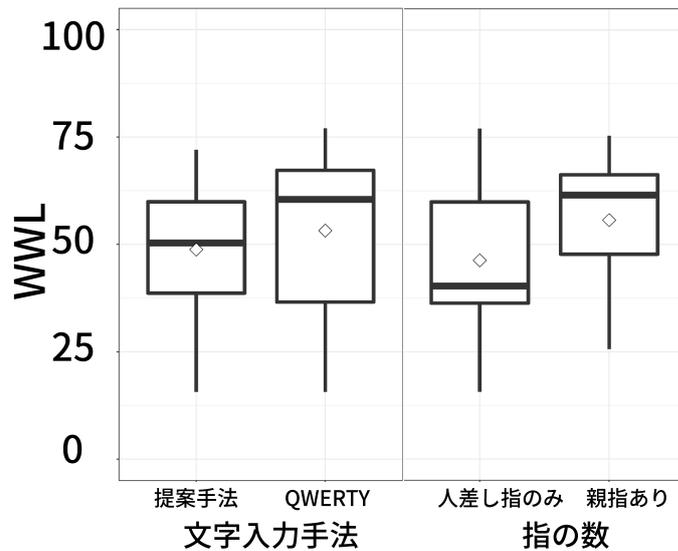


図 8.8: 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における WWL.

差 ($p = 0.01 \times 10^{-14} < 0.05$) および人差し指条件 ($M=39.38$) および 2 本指条件 ($M=35.25$) の有意差 ($p = 1.19 \times 10^{-3} < 0.05$) が検出された。なお、交互作用 ($p = 0.66 > 0.05$) は検出されなかった。この結果より、QWERTY キーボードに比べ提案キーボードの HMPW が小さいこと、および人差し指条件に比べ 2 本指条件の HMPW が小さいことが分かった。

各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における左手の HMPW ($M=45.26$ cm, $SD=14.50$ cm) を図 8.16 および図 8.17 右に示す。従属変数ごとに多変量分散分析を行った結果、左手の HMPW に対して提案キーボード ($M=35.15$) および QWERTY キーボード ($M=55.37$) の有意差 ($p = 0.66 \times 10^{-13} < 0.05$)、人差し指条件 ($M=50.84$) および 2 本指条件 ($M=38.78$) の有意差 ($p = 1.74 \times 10^{-8} < 0.05$)、および交互作用 ($p = 1.27 \times 10^{-9} < 0.05$) が検出された。事後検定の結果、2 本指条件における提案キーボード ($M=35.33$) と人差し指条件における QWERTY キーボード ($M=68.49$) との間 ($p = 0.11 \times 10^{-13} < 0.05$)、2 本指条件における提案キーボード ($M=35.33$) と 2 本指条件における QWERTY キーボード ($M=42.23$) との間 ($p = 0.16 \times 10^{-1} < 0.05$)、人差し指条件における提案キーボード ($M=34.98$) と人差し指条件における QWERTY キーボード ($M=68.49$) との間 ($p = 0.85 \times 10^{-14} < 0.05$)、人差し指条件における提案キーボード ($M=34.98$) と 2 本指条件における QWERTY キーボード ($M=42.23$) との間 ($p = 0.11 \times 10^{-1} < 0.05$)、および人差し指条件における QWERTY キーボード ($M=68.49$) と 2 本指条件における QWERTY キーボード ($M=42.23$) との間 ($p = 0.35 \times 10^{-11} < 0.05$) に有意差が検出された。この結果より、QWERTY キーボードに比べ提案キーボードの HMPW が小さいこと、および人差し指条件に比べ 2 本指条件の HMPW が小さいことが分かった。また、人差し指条件における QWERTY キーボードの HMPW が最も大きく、次いで 2 本指条件における QWERTY キーボードの HMPW が大きいことが分かった。

各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における左手 x 方向の HMPW ($M=24.72$ cm,

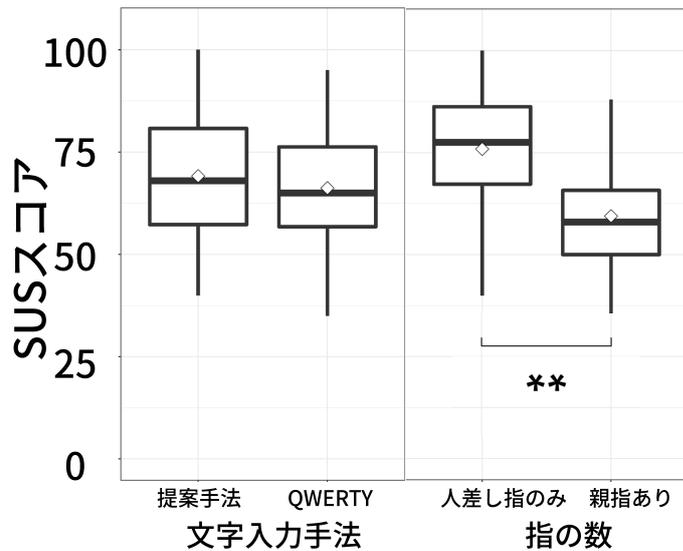


図 8.9: 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数を組み合わせた 4 条件における SUS スコア。

SD=4.48 cm) を図 8.18 および図 8.19 に示す。従属変数ごとに多変量分散分析を行った結果、左手 x 方向の HMPW に対して提案キーボード (M=23.00) および QWERTY キーボード (M=26.43) の有意差 ($p = 8.68 \times 10^{-4} < 0.05$), 人差し指条件 (M=26.85) および 2 本指条件 (M=22.45) の有意差 ($p = 2.79 \times 10^{-5} < 0.05$), および交互作用 ($p = 2.01 \times 10^{-5} < 0.05$) が検出された。事後検定の結果、2 本指条件における提案キーボード M=23.09) と人差し指条件における QWERTY キーボード (M=31.07) との間 ($p = 0.06 \times 10^{-4} < 0.05$), 人差し指条件における提案キーボード (M=22.91) と人差し指条件における QWERTY キーボード (M=31.07) との間 ($p = 0.41 \times 10^{-5} < 0.05$), および人差し指条件における QWERTY キーボード (M=31.07) と 2 本指条件における QWERTY キーボード (M=21.80) との間 ($p = 0.43 \times 10^{-6} < 0.05$) に有意差が検出された。この結果より、QWERTY キーボードに比べ提案キーボードの HMPW が小さいこと、および人差し指条件に比べ 2 本指条件の HMPW が小さいことが分かった。また、人差し指条件における QWERTY キーボードの HMPW が最も大きいことが分かった。

各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における左手 y 方向の HMPW (M=20.94 cm, SD=5.95 cm) を図 8.20 および図 8.21 に示す。従属変数ごとに多変量分散分析を行った結果、左手 y 方向の HMPW に対して提案キーボード (M=16.99) および QWERTY キーボード (M=24.88) の有意差 ($p = 7.65 \times 10^{-9} < 0.05$), 人差し指条件 (M=22.76) および 2 本指条件 (M=18.83) の有意差 ($p = 1.14 \times 10^{-4} < 0.05$), および交互作用 ($p = 3.47 \times 10^{-6} < 0.05$) が検出された。事後検定の結果、2 本指条件における提案キーボード (M=17.69) と人差し指条件における QWERTY キーボード (M=29.82) との間 ($p = 0.07 \times 10^{-8} < 0.05$), 人差し指条件における提案キーボード (M=16.28) と 2 本指条件における QWERTY キーボード (M=19.95) との間 ($p = 0.46 \times 10^{-9} < 0.05$), および人差し指条件における QWERTY キーボード (M=29.82)

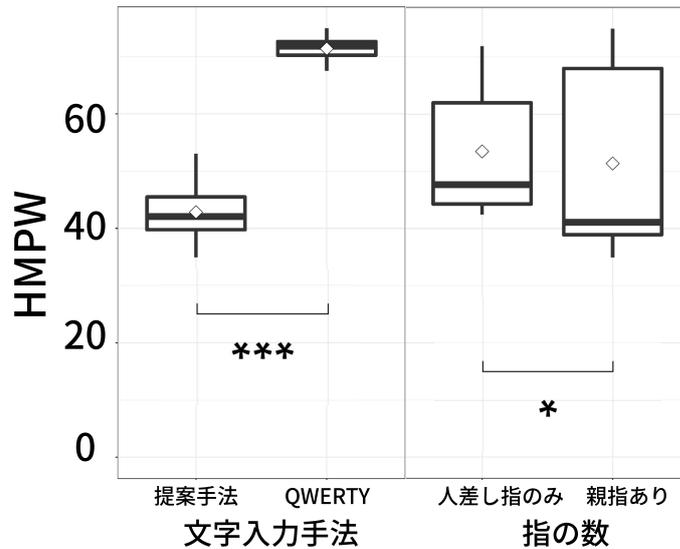


図 8.10: 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における右手の HMPW.

と 2 本指条件における QWERTY キーボード ($M=19.95$) との間 ($p = 0.31 \times 10^{-6} < 0.05$) に有意差が検出された. この結果より, QWERTY キーボードに比べ提案キーボードの HMPW が小さいこと, および人差し指条件に比べ 2 本指条件の HMPW が小さいことが分かった. また, 2 本指条件における QWERTY キーボードの HMPW が最も大きいことが分かった.

各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における左手 z 方向の HMPW ($M=27.22$ cm, $SD=8.43$ cm) を図 8.22 および図 8.23 に示す. 従属変数ごとに多変量分散分析を行った結果, 左手 z 方向の HMPW に対して提案キーボード ($M=20.12$) および QWERTY キーボード ($M=34.30$) の有意差 ($p = 6.28 \times 10^{-12} < 0.05$), 人差し指条件 ($M=28.69$) および 2 本指条件 ($M=25.21$) の有意差 ($p = 3.28 \times 10^{-3} < 0.05$), および交互作用 ($p = 6.09 \times 10^{-3} < 0.05$) が検出された. 事後検定の結果, 2 本指条件における提案キーボード ($M=20.00$) と人差し指条件における QWERTY キーボード ($M=38.19$) との間 ($p = 0.35 \times 10^{-9} < 0.05$), 人差し指条件における提案キーボード ($M=20.25$) と 2 本指条件における QWERTY キーボード ($M=30.42$) との間 ($p = 0.23 \times 10^{-4} < 0.05$), 2 本指条件における提案キーボード ($M=20.00$) と 2 本指条件における QWERTY キーボード ($M=30.42$) との間 ($p = 0.16 \times 10^{-4} < 0.05$), 人差し指条件における提案キーボード ($M=20.25$) と人差し指条件における QWERTY キーボード ($M=38.19$) との間 ($p = 0.47 \times 10^{-9} < 0.05$), および人差し指条件における QWERTY キーボード ($M=38.19$) と 2 本指条件における QWERTY キーボード ($M=30.42$) との間 ($p = 0.92 \times 10^{-3} < 0.05$) に有意差が検出された. この結果より, QWERTY キーボードに比べ提案キーボードの HMPW が小さいこと, および人差し指条件に比べ 2 本指条件の HMPW が小さいことが分かった. また, 人差し指条件における QWERTY キーボードの HMPW が最も大きく, 次いで 2 本指条件における QWERTY キーボードの HMPW が大きいことが分かった.

以上の結果より, 左手に比べ右手の HMPW が大きいこと, QWERTY キーボードに比べ提

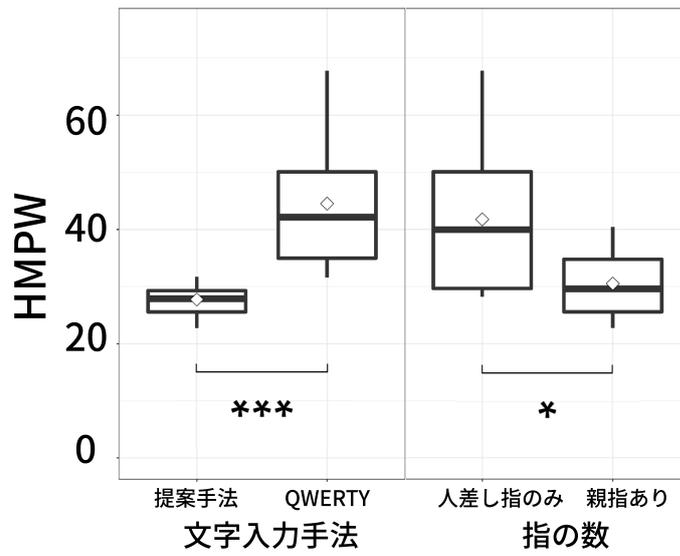


図 8.11: 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における右手 x 方向の HMPW.

案キーボードにおける HMPW が小さいこと，および人差し指条件に比べ 2 本指条件における HMPW が小さいことが分かった。

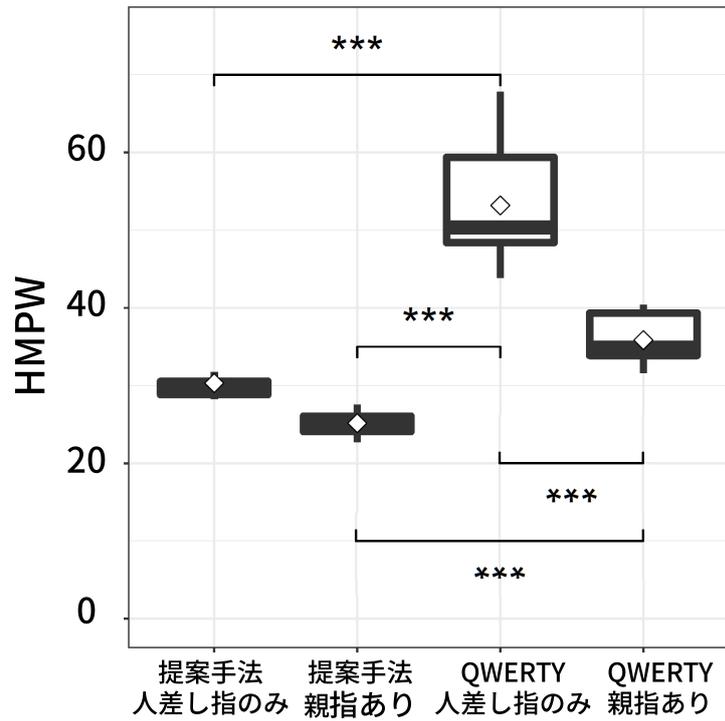


図 8.12: 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数を組み合わせた 4 条件における右手 x 方向の HMPW.

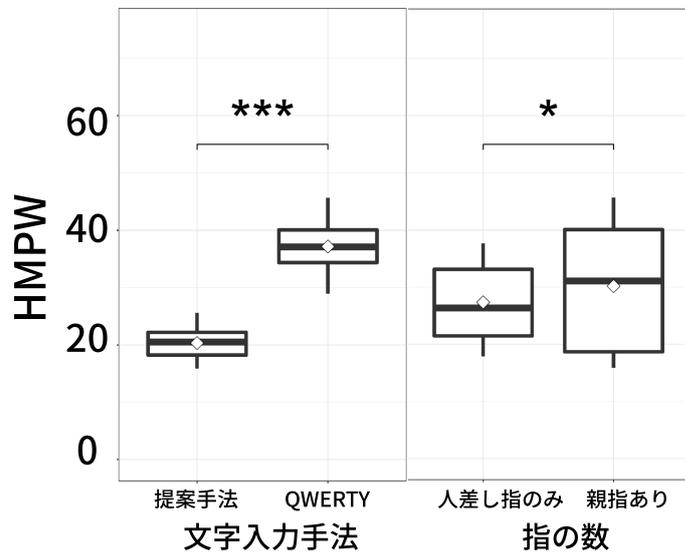


図 8.13: 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数を組み合わせた 4 条件における右手 y 方向の HMPW.

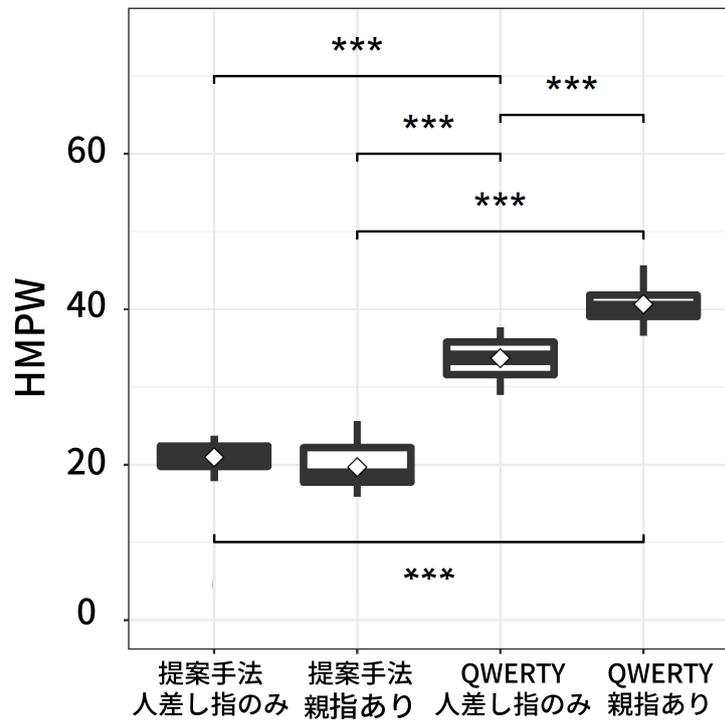


図 8.14: 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数を組み合わせた 4 条件における右手 y 方向の HMPW.

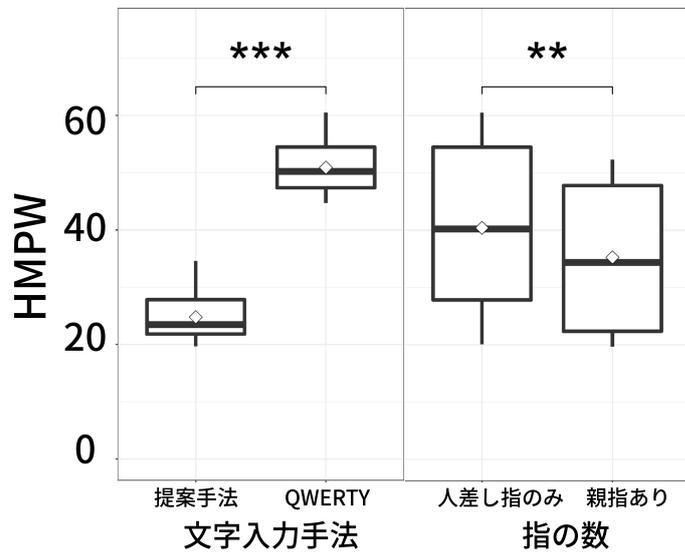


図 8.15: 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における右手 z 方向の HMPW.

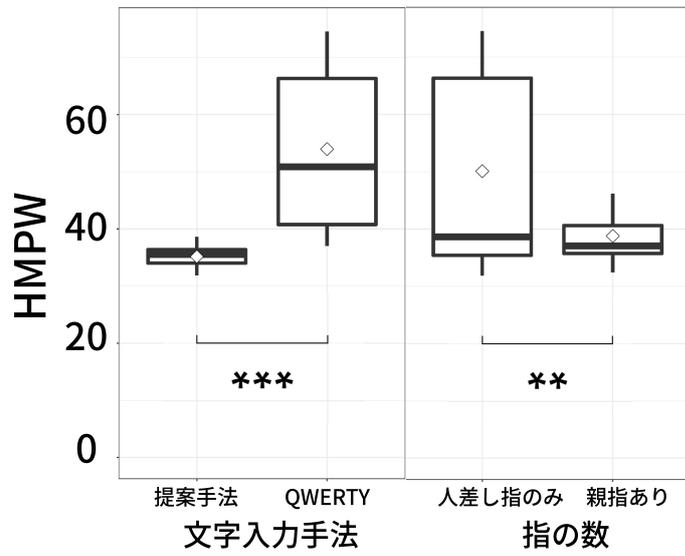


図 8.16: 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における左手の HMPW.

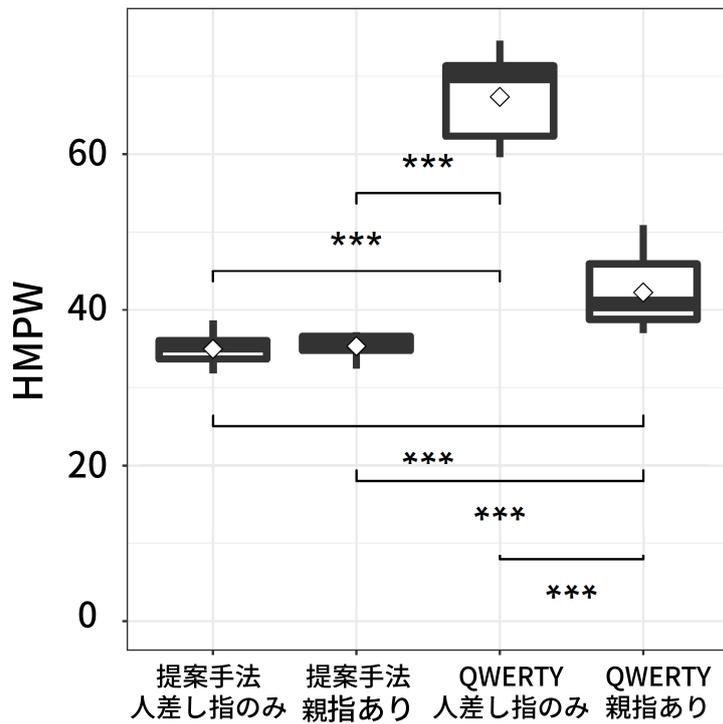


図 8.17: 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数を組み合わせた 4 条件における左手の HMPW.

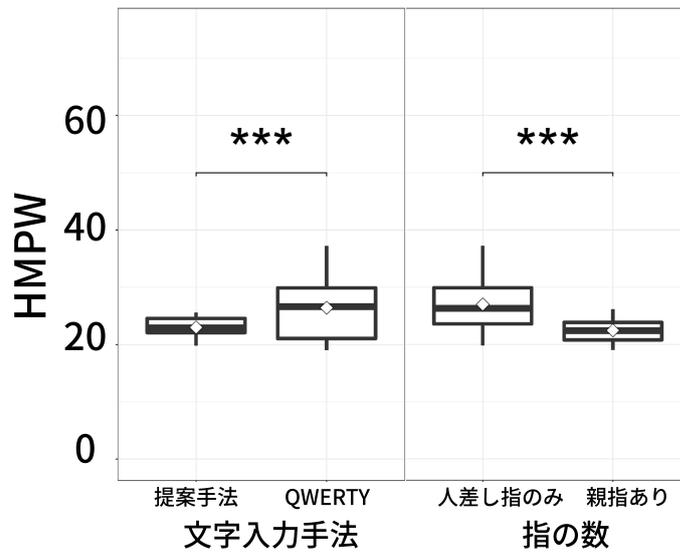


図 8.18: 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における左手 x 方向の HMPW.

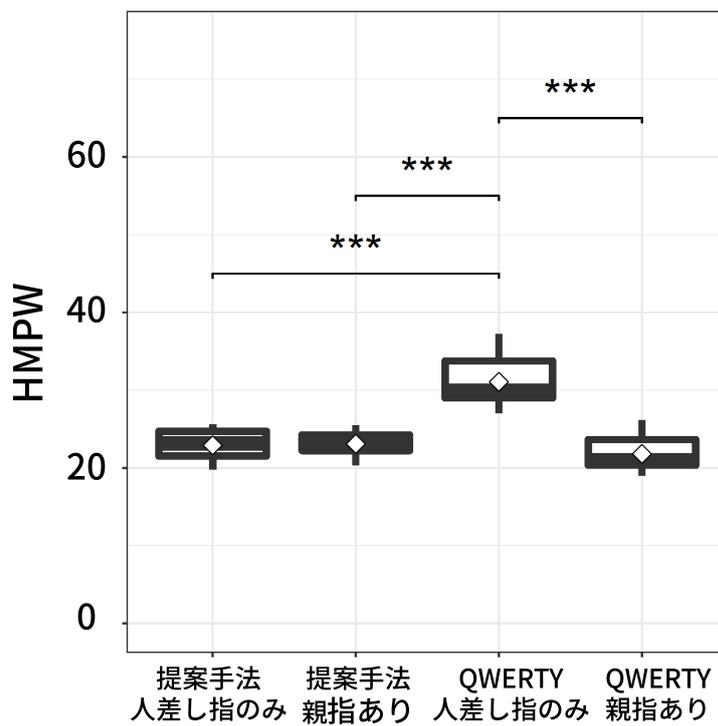


図 8.19: 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数を組み合わせた 4 条件における左手 x 方向の HMPW.

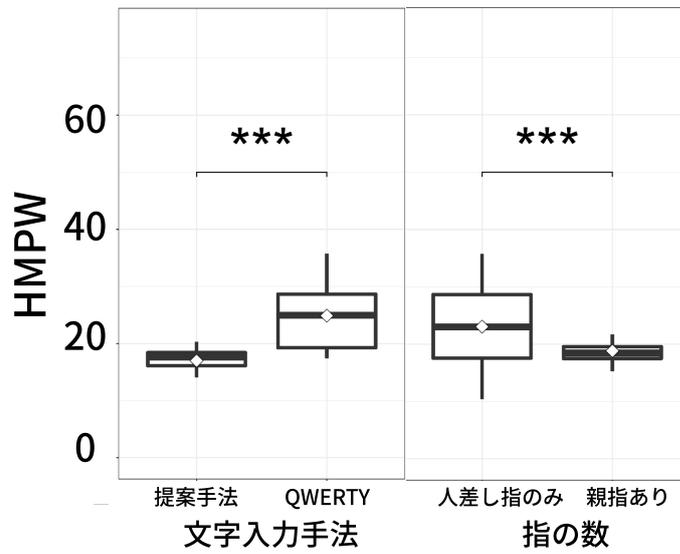


図 8.20: 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における左手 y 方向の HMPW.

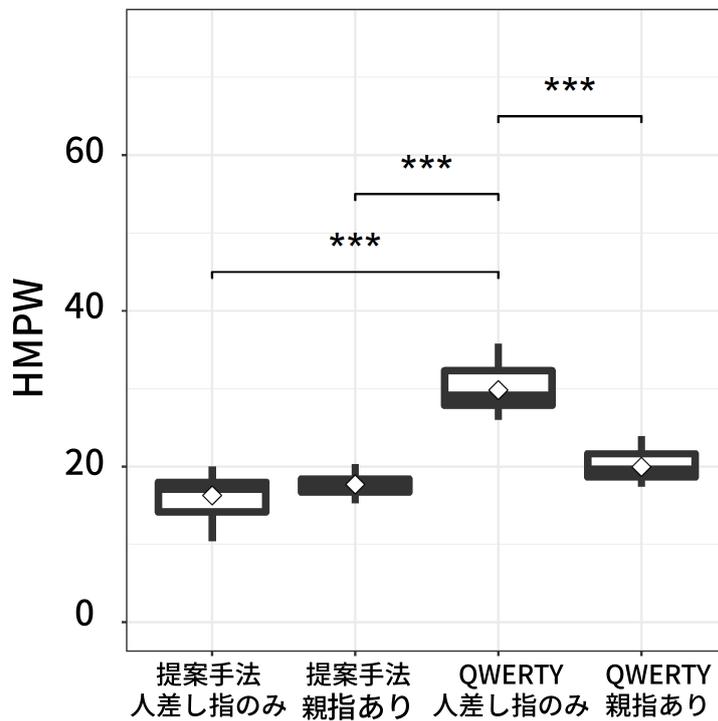


図 8.21: 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数を組み合わせた 4 条件における左手 y 方向の HMPW.

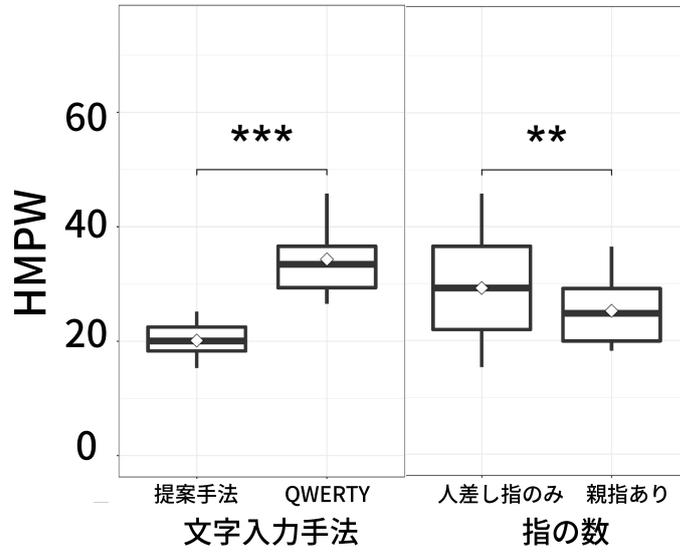


図 8.22: 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における左手 z 方向の HMPW.

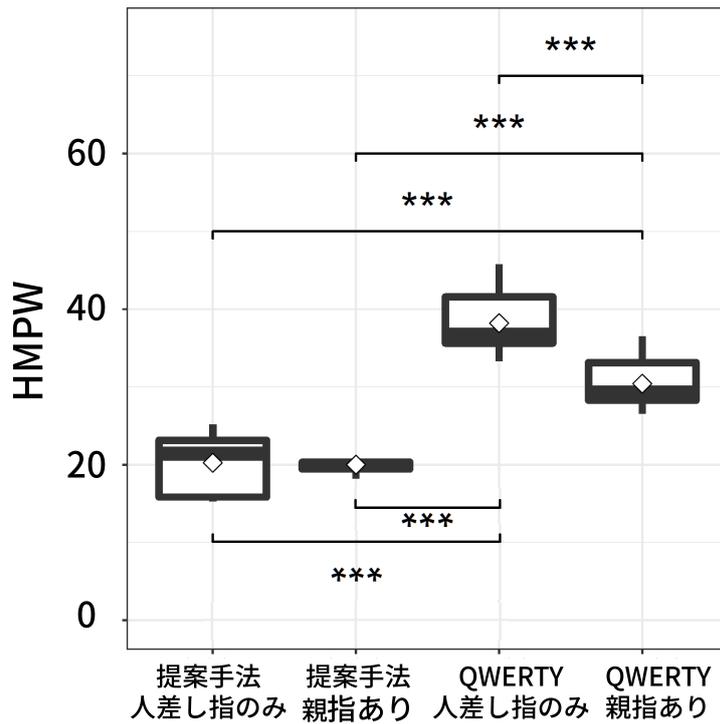


図 8.23: 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数を組み合わせた 4 条件における左手 z 方向の HMPW.

第9章 提案手法の評価実験に関する考察

実験より，提案キーボードと QWERTY キーボードとの間，および人差し指条件と 2 本指条件との間に入力性能，主観評価，および手の移動量における差があることが分かった．本章では実験結果に基づき，提案キーボードおよび QWERTY キーボード，および入力に用いた指の本数の違いによる影響をまとめ，考察を述べる．

9.1 入力性能

実験結果より，QWERTY キーボードおよび提案キーボードにおける入力速度およびエラー率に関して有意差は無いことが分かった．これは，QWERTY キーボードに比べ提案キーボードにおける HMPW が小さいことが一因であると考えられる．実験参加者は QWERTY キーボードの配列およびキーの正面をタップすることに慣れており，自由記述の感想および口頭にて「慣れるまでは入力に時間がかかったが慣れたら速く入力できそうに感じた.」，「長期間練習すれば高速かつ快適な文字入力手法になりうると思う.」といった意見があった．今回の実験では，実験参加者に提案キーボードおよび QWERTY キーボードの操作方法を良く理解してもらうため，各条件の実験開始前に約 2 分間の練習セッションを設けた．しかし，練習セッションにおいて QWERTY キーボードの操作方法について問われることは一度もなかったのに対し，提案キーボードの操作方法は度々質問された．そのため，提案キーボードは実験参加者が使い慣れた QWERTY キーボードに比べて操作が困難であったことが考えられる．そのうえで入力速度およびエラー率においてキーボード間に差が無かったのは，慣れておらずとも手の移動量が小さいことによりスムーズかつ正確な入力が出来たためであると考えられる．したがって，今後は実験参加者に提案キーボードを長期間使ってもらい，使い慣れた状態の入力速度を計測することにより入力速度の向上およびエラー率の低下が見込まれる．

また，人差し指条件に比べ 2 本指条件の入力速度が低くエラー率が高いことが分かった．この結果は，人差し指条件およびすべての指を用いた条件にて文字入力への影響を調査した Dudley ら [DBWK19] の実験結果と一致する．実験参加者の自由記述の感想にて，「人差し指で入力している時に親指で別のキーが入力されてしまうことが何回かあった.」，「親指に判定が増えることで誤入力が多くなった.」といった意見があり，Dudley らの報告と同様に指の追従運動による誤タップが多かったために，正確な文字入力に時間がかかったと考えられる．また，「入力間に時間のオフセットがあれば少しは誤入力が減りそう.」，「機械学習を用いて誤タップを検出すると良さそう.」といった意見があった．したがって，今後は機械学習を用いて正しいタップおよび追従動作による誤タップを分類し再調査を行うことにより，手の移

動量を抑えつつ入力性能および主観評価の向上が見込まれる。

また、人差し指条件における QWERTY キーボードの入力性能が最も高いことが分かった。この結果は、本条件におけるキーボードを用いた文字入力物理キーボードに最も近くエラー率が低いためであると考えられる。

9.2 主観評価

実験結果より、人差し指条件に比べ2本指条件のユーザビリティが低いことが分かった。これは、タップの動きに追従した指による誤タップを防ぐために慎重な動作が要求されたためであると考えられる。実験参加者の自由記述の感想にて、「2本の指のみに集中する方が操作しやすい。」という意見があったことから、人差し指条件に比べて実験参加者のユーザビリティが低いことが分かった。また、「親指によるスペースキーのタップが楽だった。」、「スペースキーのみ親指で入力したかった。」といった意見もあったため、親指によるタップをスペースキーのみに限定すれば、ユーザビリティの改善ができると考えられる。一方、「親指の代わりに小指によるタップを可能にするとやりやすくなると思う。」という意見があったため、実験参加者によっては人差し指および親指の組み合わせが悪いことが分かった。親指は人差し指に隣接しており人差し指の動きに追従しやすいため、薬指もしくは小指を文字入力に用いることにより、誤タップが減少し主観評価が改善できると考えられる。

9.3 手の移動量

実験結果より、左手に比べ右手の HMPW が大きいことが分かった。これは、実験参加者8名のうち7名が右利きであることから、キーのタップに利き手を多用していることが一因として考えられる。物理キーボードと異なりホームポジションの目印が無く使用可能な指が制限された仮想キーボードでは、明確なホームポジションが無く、左右の手指をまんべんなく使うことが困難である。そのため、実験参加者は仮想キーボードの多くのキーを利き手にてタップしたことにより、右手および左手において HMPW に差が出たと考えられる。

右手および左手ともに QWERTY キーボードに比べ提案キーボードにおける HMPW が小さいことが分かった。これは、手の上下方向および前後方向の移動量が制限されたことが一因であると考えられる。しかし、手の移動が制限されたことにより「手をキーボードのホームポジション位置にて維持するのが難しかった。」、「QWERTY キーボードの方が手を自由に動かして楽に入力出来た。」といった意見があり、ホームポジションの設定により主観評価に悪影響が生じていたことが分かった。したがって、今後は提案キーボードにてキーの大きさおよびキー間の空間の大きさを調整することにより、手の移動量を抑えつつ主観評価に悪影響を与えない配置を調査する必要がある。

また、人差し指条件に比べ2本指条件における HMPW が小さいことが分かった。これは、下段のキーおよびスペースキーを親指にてタップすることにより、実験参加者がホームポジションから手を動かす必要が無かったことが一因であると考えられる。しかし、右手の y 方

向に関してのみ人差し指条件に比べ2本指条件における HMPW が大きいことが分かる。これは、全体的に左手に比べ右手の HMPW が大きいこと、および2本指条件における QWERTY キーボードの TER が最も高く HMPW が最も大きいことから、実験参加者は右手を用いたタップを多用しており TER の最も高い条件において右手の使用率が増加するに伴い y 方向の手の移動が増加したことが一因であると考えられる。

第10章 本研究のまとめ

本研究では、VR向け仮想キーボードの姿勢がユーザの文字入力性能およびユーザの主観評価に与える影響の調査、およびQWERTY配列の並びを変えずに奥方向のポインティングおよびユーザの手の移動量を削減した仮想キーボードの比較実験を行った。

空中タップを用いた仮想キーボードを対象として、偏角 θ および姿勢角 ϕ の比較実験を行った結果、偏角 θ および姿勢角 ϕ は入力速度およびユーザビリティに、偏角 θ は主観的作業負荷に影響を与えることが分かった。特に、仮想キーボードの配置が高過ぎるもしくは低過ぎると入力性能を低下させることが示唆された。このことから、先行研究同様にユーザの目線より低い位置（本研究において偏角 θ が22.5度の位置）にキーボードを設置することが好ましいと考えられる。また、姿勢角 ϕ が大きくなるにつれて入力速度が大きくなっていたこと、および姿勢角 ϕ が-15度の条件に比べて姿勢角 ϕ が15度の条件におけるユーザビリティが高かったことから、VR向け仮想キーボードをデザインする時には、物理キーボードの設置条件に倣い、仮想キーボードをユーザから見て奥方向に傾けること（本研究においては姿勢角 ϕ が15度）が好ましいといえる。さらに、ユーザは首よりも腕の疲労が高い時により主観的作業負荷を感じる傾向があることが示された。したがって、VRアプリケーションのデザインにおいて、仮想キーボードをユーザの目線より低い位置に設置することにより主観的作業負荷を抑えられると考えられる。

QWERTY配列の並びを変えずに奥方向のポインティングおよびユーザの手の移動量を削減した仮想キーボードの比較実験の結果、提案キーボードは、QWERTYキーボードと比べて入力性能に有意な差がなくHMPWが小さいこと、ならびに2本指条件は人差し指条件に比べて入力性能および主観評価が低いことが分かった。また、各キーボードおよび用いた指の本数の組み合わせでは、人差し指条件におけるQWERTYキーボードの入力性能が最も高く、2本指条件における提案キーボードのHMPWが最も小さいことが分かった。このことから、提案キーボードは入力性能を損なうことなく手の移動量を削減できることが示された。しかし、人差し指条件におけるQWERTYキーボードの入力性能が最も高いことから、実験参加者が使い慣れた形状の仮想キーボードの入力性能が高いことが分かる。したがって、提案キーボードを長期的に使用したユーザによる評価実験を行うことにより、入力性能の向上が見込まれると考えられる。また、機械学習を用いて意図したタップおよび意図しないタップの分類を行うことにより、入力に複数の指を用いる際の誤タップを減らせると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，志築文太郎先生，高橋伸先生，および川口一画先生には多くのご意見およびご指摘をいただきました。心より感謝いたします。特に，主指導教員である志築文太郎先生は，研究の進め方および論じ方だけでなく，社会でも必要とされる論理的思考力，文章力，およびコミュニケーション能力など数えきれないほどご指導いただきました。また，どのような意見に対しても真摯に向き合ってくださいのおかげで，前向きに研究を進めることができました。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先輩方，同期，および後輩たちには多くの助言をいただきました。ゼミだけでなく日常の研究室生活でも，研究室の皆さまに意見をいただけたことで，2年間研究をやり遂げることができました。特に WAVE チームの皆さまからは，多くの知識および技術を学びました。中でも，基礎的なコンピュータサイエンスの知識および技術から論文の執筆手法まで親身に教えてくださった藤田俊さんに感謝いたします。2年間の研究室生活は，研究室の皆さまと深く関わり合うことによりとても楽しく充実したものになりました。深く感謝いたします。

学生生活および私生活において私を支えてくださった友人たちおよび後輩たち，大学院生活にてお世話になった皆様に感謝いたします。研究活動において，複数の実験を行ってききましたが，実験参加者を集めることは友人たちおよび後輩たちの協力なくしては達成できませんでした。また，私生活においても，皆様が懇意にしてくれたことでとても充実したものになりました。深く感謝いたします。

最後に，今まで私を育て支えてくださった家族に深く感謝いたします。私が研究に没頭し，今までの学生生活を謳歌できたのは，両親，祖父母，および兄妹が支えてくれたおかげです。重ねて感謝いたします。

参考文献

- [AS09] Ahmed Sabbir Arif and Wolfgang Stuerzlinger. Analysis of Text Entry Performance Metrics. In *IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity*, TIC-STH '09, pp. 100–105. IEEE, 2009.
- [BC02] Lee Butts and Andy Cockburn. An Evaluation of Mobile Phone Text Input Methods. *Australian Computer Science Communications*, Vol. 24, No. 4, pp. 55–59, 2002.
- [BCF⁺20] Eugenie Brasier, Olivier Chapuis, Nicolas Ferey, Jeanne Vezien, and Caroline Appert. ARPads: Mid-air Indirect Input for Augmented Reality. In *2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 332–343, 2020.
- [BJB09] Sebastian Boring, Marko Jurmu, and Andreas Butz. Scroll, Tilt or Move It: Using Mobile Phones to Continuously Control Pointers on Large Public Displays. In *Proceedings of the 21st Annual Conference of the Australian Computer-Human Interaction Special Interest Group: Design: Open 24/7*, OZCHI'09, pp. 161–168, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery.
- [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, Oct. 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. 1–10, 2019.
- [BMB12] Bartosz Bajer, I. Scott MacKenzie, and Melanie Baljko. Huffman Base-4 Text Entry Glove (H4 TEG). In *2012 16th International Symposium on Wearable Computers*, pp. 41–47, 2012.
- [BOW⁺08] Regina Bernhaupt, Marianna Obrist, Astrid Weiss, Elke Beck, and Manfred Tscheligi. Trends in the Living Room and beyond: Results from Ethnographic Studies Using Creative and Playful Probing. *Computers in Entertainment*, Vol. 6, No. 1, pp. 1–23, 2008.

- [BPOW15] Myroslav Bachynskyi, Gregorio Palmas, Antti Oulasvirta, and Tino Weinkauf. Informing the Design of Novel Input Methods with Muscle Coactivation Clustering. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, Vol. 21, No. 6, pp. 1–25, 2015.
- [Bro96] John. Brooke. SUS:A Quick and Dirty Usability Scale. *Usability Evaluation in Industry*, pp. 189–194, 1996.
- [CWG⁺19] Sibó Chen, Junce Wang, Santiago Guerra, Neha Mittal, and Soravis Prakkamakul. Exploring Word-Gesture Text Entry Techniques in Virtual Reality. In *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '19, pp. 1–6, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [DA20a] Tafadzwa Joseph Dube and Ahmed Sabbir Arif. Impact of Key Shape and Dimension on Text Entry in Virtual Reality. In *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '20, pp. 1–10, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [DA20b] Tafadzwa Joseph Dube and Ahmed Sabbir Arif. Impact of Key Shape and Dimension on Text Entry in Virtual Reality. In *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '20, pp. 1–10, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [DBWK19] John Dudley, Hrvoje Benko, Daniel Wigdor, and Per Ola Kristensson. Performance Envelopes of Virtual Keyboard Text Input Strategies in Virtual Reality. In *2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, ISMAR '19, pp. 289–300. IEEE, 2019.
- [DM11] Nguyen-Thong Dang and Daniel Mestre. Effects of Menu Orientation on Pointing Behavior in Virtual Environments. In Randall Shumaker, editor, *Virtual and Mixed Reality - New Trends*, pp. 144–153, Berlin, Heidelberg, 2011. Springer Berlin Heidelberg.
- [ES92] Roger Enoka and Douglas Stuart. Neurobiology of Muscle Fatigue. *Journal of Applied Physiology*, Vol. 72, No. 5, pp. 1631–1648, 1992.
- [FDG⁺21] Conor R. Foy, John J. Dudley, Aakar Gupta, Hrvoje Benko, and Per Ola Kristensson. Understanding, Detecting and Mitigating the Effects of Coactivations in Ten-Finger Mid-Air Typing in Virtual Reality. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [FM18] Tiare Feuchtner and Jörg Müller. Ownershift: Facilitating Overhead Interaction in Virtual Reality with an Ownership-Preserving Hand Space Shift. In *Proceedings of*

the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '18, pp. 31–43, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.

- [FPGH⁺21] Maite Frutos-Pascual, Clara Gale, Jake M. Harrison, Chris Creed, and Ian Williams. Character Input in Augmented Reality: An Evaluation of Keyboard Position and Interaction Visualisation for Head-Mounted Displays. In Carmelo Ardito, Rosa Lanzilotti, Alessio Malizia, Helen Petrie, Antonio Piccinno, Giuseppe Desolda, and Kori Inkpen, editors, *Human-Computer Interaction – INTERACT 2021*, pp. 480–501, Cham, 2021. Springer International Publishing.
- [GWO⁺18] Jens Grubert, Lukas Witzani, Eyal Ofek, Michel Pahud, Matthias Kranz, and Per Ola Kristensson. Text Entry in Immersive Head-Mounted Display-Based Virtual Reality Using Standard Keyboards. In *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 159–166, 2018.
- [Hos84] Hiroshi Hoshi. Some Findings on the Physical Status and Body Types in Japanese Viewed from the “Report of the Survey on the Physical Status in Japanese”. *Journal of the Anthropological Society of Nippon*, Vol. 92, No. 4, pp. 281–293, 1984.
- [HRGMI14] Juan David Hincapié-Ramos, Xiang Guo, Paymahn Moghadasian, and Pourang Irani. Consumed Endurance: A Metric to Quantify Arm Fatigue of Mid-Air Interactions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI'14, pp. 1063–1072, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [HRH12] Chris Harrison, Shilpa Ramamurthy, and Scott E. Hudson. On-Body Interaction: Armed and Dangerous. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, TEI '12, pp. 69–76, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [HS88] Sandra G. Hart and Lowell E. Staveland. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In Peter A. Hancock and Najmedin Meshkati, editors, *Human Mental Workload*, Vol. 52 of *Advances in Psychology*, pp. 139–183. North-Holland, 1988.
- [ILY⁺21] Hasan Iqbal, Seemab Latif, Yukang Yan, Chun Yu, and Yuanchun Shi. Reducing Arm Fatigue in Virtual Reality by Introducing 3D-Spatial Offset. *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 64085–64104, 2021.
- [JSAR17] Sujin Jang, Wolfgang Stuerzlinger, Satyajit Ambike, and Karthik Ramani. Modeling Cumulative Arm Fatigue in Mid-Air Interaction Based on Perceived Exertion and Kinetics of Arm Motion. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human*

- Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 3328–3339, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [LXZ17] Zhuorui Liang, Xiangmin Xu, and Shaolin Zhou. The Smallest Target Size for a Comfortable Pointing in Freehand Space: Human Pointing Precision of Freehand Interaction. *Universal Access in the Information Society*, Vol. 16, No. 2, pp. 381–393, 2017.
- [MJH13] Anders Markussen, Mikkel R. Jakobsen, and Kasper Hornbæk. Selection-Based Mid-Air Text Entry on Large Displays. In Paula Kotzé, Gary Marsden, Gitte Lindgaard, Janet Wesson, and Marco Winckler, editors, *Human-Computer Interaction – INTERACT 2013*, INTERACT '13, pp. 401–418, Berlin, Heidelberg, 2013. Springer Berlin Heidelberg.
- [MJH14] Anders Markussen, Mikkel Rønne Jakobsen, and Kasper Hornbæk. Vulture: A Mid-Air Word-Gesture Keyboard. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 1073–1082, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [MSH11] I. Scott MacKenzie, R. William Soukoreff, and Joanna Helga. 1 Thumb, 4 Buttons, 20 Words per Minute: Design and Evaluation of H4-Writer. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '11, pp. 471–480, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [MSSH18] Sven Mayer, Valentin Schwind, Robin Schweigert, and Niels Henze. The Effect of Offset Correction and Cursor on Mid-Air Pointing in Real and Virtual Environments. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [PKKH20] Sai Akhil Penumudi, Veera Aneesh Kuppam, Jeong Ho Kim, and Jaejin Hwang. The Effects of Target Location on Musculoskeletal Load, Task Performance, and Subjective Discomfort During Virtual Reality Interactions. *Applied Ergonomics*, Vol. 84, p. 103010, 2020.
- [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*, pp. 1–13, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [SM03] R. William Soukoreff and I. Scott MacKenzie. Metrics for Text Entry Research: An Evaluation of MSD and KSPC, and a New Unified Error Metric. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '03, pp. 113–120, New York, NY, USA, 2003. Association for Computing Machinery.

- [SMB03] Guy G Simoneau, Richard W Marklin, and Joseph E Berman. Effect of Computer Keyboard Slope on Wrist Position and Forearm Electromyography of Typists Without Musculoskeletal Disorders. *Physical Therapy*, Vol. 83, No. 9, pp. 816–830, 09 2003.
- [SMCV⁺18] Valentin Schwind, Sven Mayer, Alexandre Comeau-Vermeersch, Robin Schweigert, and Niels Henze. Up to the Finger Tip: The Effect of Avatars on Mid-Air Pointing Accuracy in Virtual Reality. In *Proceedings of the 2018 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play, CHI PLAY'18*, pp. 477–488, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [TFTS21] Koki Tominaga, Shun Fujita, Rei Takakura, and Buntarou Shizuki. *Investigating the Effects of Position and Angle of Virtual Keyboard on Text Entry Performance and Workload*, pp. 25–27. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2021.
- [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. 1–14, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [YCL⁺19] Zhen Yang, Cheng Chen, Yuqing Lin, Duming Wang, Hongting Li, and Weidan Xu. Effect of Spatial Enhancement Technology on Input Through the Keyboard in Virtual Reality Environment. *Applied Ergonomics*, Vol. 78, pp. 164–175, 2019.
- [YS18] Naoki Yanagihara and Buntarou Shizuki. Cubic Keyboard for Virtual Reality. In *Proceedings of the Symposium on Spatial User Interaction, SUI '18*, p. 170, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [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, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [館 11] 館暲, 佐藤誠, 広瀬通孝. バーチャルリアリティ学. 工業調査会, 2011.
- [喜多 19] 喜多修太郎, 小倉加奈代, Bista Bhed Bahadur, 高田豊雄. LeapMotion を用いた VR 上での文字入力手法の検討. 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , Vol. 181, No. 21, pp. 1–7. 情報処理学会, 2019.
- [今村 01] 今村真理子, 中溝幸夫. 距離・大きさ・奥行知覚の異方性. *VISION*, Vol. 13, No. 1, pp. 41–44, 2001.

- [細野 14] 細野敬太, 笹倉万里子, 田邊浩亨, 川上武志. Leap Motion を用いたジェスチャ操作による文字入力方法の提案. 第 28 回人工知能学会全国大会論文集, 第 JSAI2014 巻, pp. 1–4. 人工知能学会, 2014.
- [大西 16] 大西未来, 渡辺大地. Leap Motion を使用した文字入力方法の提案. 研究報告コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学 (CG), Vol. 165, No. 8, pp. 1–4. 情報処理学会, 2016.
- [藤田 21] 藤田俊, 志築文太郎. クロッシングによる選択を用いた表示面積の小さい仮想現実向け 1 次元キーボード. ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol. 23, No. 1, pp. 47–56. ヒューマンインタフェース学会, 2021.
- [富永 21a] 富永浩暉, 平井李音, 志築文太郎. 手首の屈曲および伸展を用いた VR 向け文字入力手法の検討. 第 29 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ論文集, WISS2021, 3 pages. 日本ソフトウェア科学会, 2021.
- [富永 21b] 富永浩暉, 高倉礼, 志築文太郎. VR 向け仮想キーボードの位置および角度が入力性能および作業負荷に与える影響の調査 (第 2 報). ヒューマンインタフェースシンポジウム 2021 論文集, pp. 404–410. ヒューマンインタフェース学会, 2021.
- [富永 21c] 富永浩暉, 藤田俊, 志築文太郎. VR 向け仮想キーボードの位置および角度が入力性能および作業負荷に与える影響の調査. 情報処理学会第 83 回全国大会論文集, 第 4 巻, pp. 245–246. 情報処理学会, 2021.
- [福仲 19] 福仲伊織, 謝浩然, 宮田一乘. VR 環境におけるフリック入力形式インタフェースの開発. 研究報告コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学 (CG), Vol. 165, No. 8, pp. 1–4. 情報処理学会, 2019.

著者論文リスト

本論文に関する論文

- 査読あり国際会議論文

1. Koki Tominaga and Shun Fujita and Rei Takakura and Buntarou Shizuki. 2021. Investigating the Effects of Virtual Keyboard Position and Angle on Text Entry Performance and Workload. In Proceedings of CHI 2021 symposia on Asian CHI Symposium: HCI Research from Asia and on Asian Contexts and Cultures, Asian CHI '21, ACM, pp. 25–27.

- 査読なし国内会議論文

1. 冨永浩暉, 藤田俊, 志築文太郎, VR 向け仮想キーボードの位置および角度が入力性能および作業負荷に与える影響の調査. 情報処理学会第 83 回全国大会, 第 4 巻, pp. 245–246. 2021 年 3 月. 情報処理学会.
2. 冨永浩暉, 高倉礼, 志築文太郎, VR 向け仮想キーボードの位置および角度が入力性能および作業負荷に与える影響の調査 (第 2 報). Human Interface Symposium 2021, pp. 404–410. 2021 年 9 月. ヒューマンインタフェース学会.
3. 冨永浩暉, 平井李音, 志築文太郎, 手首の屈曲および伸展を用いた VR 向け文字入力手法の検討. 第 29 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2021), 3 pages. 2022 年 12 月. 日本ソフトウェア科学会.
4. 冨永浩暉, 平井李音, 志築文太郎, 手首の屈曲および伸展により操作される仮想キーボードの提案. 情報処理学会研究報告 (HCI-196), No. 30, pp. 1–8. 2022 年 1 月. 情報処理学会.

その他の論文

- 査読なし国内会議論文

1. 平井李音, 富永浩暉, 横山海青, 志築文太郎, VR 環境向けの視線を用いた 3 次元バブルカーソルの提案. 第 29 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2021), 3 pages. 2022 年 12 月. 日本ソフトウェア科学会.
2. 國分晴利, 富永浩暉, 志築文太郎, 指輪型デバイスに対する親指ジェスチャを用いたスマートウォッチ向け片手操作手法. 第 29 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2021), 3 pages. 2022 年 12 月. 日本ソフトウェア科学会.

付録A 実験の際に用いた各種書類

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

A.1 実験同意書

<p>同 意 書</p> <p>筑波大学システム情報系長 殿</p> <p>私は、「課題名：VR 向け仮想キーボードの位置および角度の変化に伴う文字入力性能の評価」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。</p> <p>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。</p> <p>令和 年 月 日</p> <p>氏 名 _____ (署名) □18 歳未満</p> <p>「課題名：VR 向け仮想キーボードの位置および角度の変化に伴う文字入力性能の評価」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。</p> <p>実施責任者 所 属 _____</p> <p>氏 名 _____ (署名又記名押印)</p>
<p>データ提供の同意撤回の期限は同意書署名の日から<u>30</u>日後までとさせていただきます。</p> <p>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</p> <p>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)</p> <p>筑波大学 システム情報系 研究倫理委員会 事務局</p> <p>(システム情報エリア支援室 TEL:029-853-4989)</p>

以下について具体的に記載してください。

① 研究の概要について

[研究の目的]

私たちは Virtual Reality（以下、VR）空間における仮想キーボードの表示位置および角度の違いによる文字入力性能および負荷の違いを明らかにするために調査を行っています。本研究により得られるデータから、ユーザが高い入力速度を出せる条件、誤打鍵を少なく入力できる条件および入力に伴い生じる負荷を軽減できる条件を明らかにできると考えています。

[研究の方法]

Head Mounted Display（以下、HMD）を装着し、VR空間に表示される QWERTY 配列のタッチキーボードを、VR空間に表示される自身の指を使って触れることにより文字入力を行います。仮想キーボードの表示位置（実験参加者の頭部から 50cm、65cm、の 2 条件）および仮想キーボードの角度（実験参加者の目線から下に向かって 0 度、30 度、45 度、60 度、90 度の 5 条件）がそれぞれ異なる 10 条件にて、両手の人差し指を用いて英文字 10 文章の入力を行います。この時、「できる限り早く正確に入力する」ように意識してください。各条件における全 10 文の入力完了後には、主観的作業負担の評価を行うためのアンケートに回答していただきます。全 10 条件の入力を 1 セットとし実験参加者には 2 セットの入力を行っていただきます。

[拘束時間]

1 人当たりの実験の所要時間は、実験前の説明時間、文字入力課題、アンケートの回答時間および休憩時間を含めて 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、筑波大学の規定に基づいた謝金を支払います。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分の謝金を支払うこととします。

[研究の期間]

研究倫理委員会承認後 ～ 2025 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

本実験の参加は任意であり、参加に同意しないことによる影響は一切ありません。また、実験参加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。本実験で用いる VR HMD は、実験開始前および実験終了後に明星産商株式会社「アルウエッティ one2 エタノール」を用いて拭くことにより消毒し、実験参加者に清潔な状態にて提供します。その他実験に伴う心身上の苦痛及び不快な状態として、長時間の実験による拘束、およびそこから生じる疲労が考えられます。ただし、

ご協力いただいた時間の対価として謝金を支払い、実験中は十分な休憩を取られるように最大限の配慮いたします。なお、HMD を長時間装着したタスクを行うため、肉体的・精神的な疲労が予想されます。実験中は各条件の途中であっても、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、実験参加者から得られたデータは個人を特定できないよう加工して使用いたします。

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

<新型コロナウイルス感染症への対策>

令和2年5月4日付け新型コロナウイルス感染症対策専門家会議にて示された「新型コロナウイルス感染症対策の状況分析・提言」を参考に、下記の対策を実施します。

- 実験実施者および実験参加者は、実験日前14日間の健康状況観察を行い、発熱、風邪症状（咳・鼻水・のどの痛み・強い倦怠感・息苦しさ等）、ならびに明らかな誘因（舌の火傷・花粉症等）のない味覚・嗅覚障害等が無いことを確認します。
- 実験参加者が入室する前に、実験室への入退室ならびに実験の際に参加者が触れ得る箇所をアルコール等の消毒液にて消毒します。また、実験中は実験室の換気を行います。
- 実験を実施するにあたって、実験実施者および実験参加者のマスクの着用ならびに手指の消毒を徹底します。また、手指の消毒のために、実験室の入口付近に消毒設備を設置します。
- 実験実施者と実験参加者の接触を最低限に抑えるため、実験実施者は実験室に入らず、ビデオ通話を用いて別室から説明を行います。機材トラブル等が発生した場合は実験実施者も実験室に入室し対応を行います。その際は手指の消毒やマスクの着用を徹底するとともに、実験参加者とは2m以上の距離を確保します。
- 実験実施者と実験参加者の接触を最低限に抑えるため、実施者と参加者間にはパーティションを設置します。参加者が機材の装着を行うことが困難な場合、パーティションを越えて実験参加者に近づいて装着方法を指示しますが、その際はマスクの装着に加えて使い捨て手袋を着用し、指示が完了次第速やかに2m以上の距離を確保します。

③ 個人情報の保護について

- 実験中に写真やビデオの撮影を行う場合がありますが、これらは実験の様子を記録するためにを行います。その写真やビデオ、音声データを発表において利用する場合は、別途承諾書にて実験参加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。参加の拒否・撤回によって被る不利益は一切ありません。
- 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、性別ごとの実験参加者数、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研究成果公表後 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います。なお、さらに安全を期すため、データに個人名が入ることはありません。データは研究機関の終了後記録媒体を物理的に破壊することにより消去します。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実験協力者のプライバシーは保全されます。

A.2 実験計画書

研究実施計画書

- 課題名
VR 向け仮想キーボードの位置および角度の変化に伴う文字入力性能の評価
- 実施責任者
システム情報系 教授 志築文太郎
- 研究の概要
Virtual Reality(以下、VR)における文字入力は VR 空間内に表示された仮想キーボードを用いて行われることが一般的である。自身の手で仮想キーボードに直接触れて入力する手法は、コントローラを用いた入力手法に比べて身体的負荷および精神的負荷が大きいとされている。しかし、従来の研究では仮想キーボードが目線の高さに表示された状態で入力操作を行う実験が多い。したがって、仮想キーボードの表示位置および角度を変更することによって、身体的負荷あるいは精神的負荷が軽減されると考えられる。我々は VR 空間における仮想キーボードの表示位置および角度の違いによる文字入力性能および負荷の違いを明らかにするために調査を行う。
- 実験内容
実験参加者は起立した状態で Head Mounted Display (以下、HMD) を装着し、VR 空間にて仮想キーボードの操作を行う。本実験にて用いる仮想キーボードは QWERTY 配列のタッチキーボードであり、ユーザは VR 空間に表示されるキーボードを、VR 空間に表示される自身の指を使って触れることにより文字入力を行う (図 1)。ユーザの指のトラッキングは赤外線カメラ (Leap Motion) にて行われる。仮想キーボードの表示位置 (実験参加者の頭部から 50cm、65cm、の 2 条件) および仮想キーボードの角度 (実験参加者の目線から下に向かって 0 度、30 度、45 度、60 度、90 度の 5 条件) がそれぞれ異なる 10 条件にて、両手の人差し指を用いて英文字 10 文章の入力を行う (図 2)。この時、実験参加者には「できる限り早く正確に入力する」ように指示する、各条件における全 10 文の入力完了後には、主観的作業負担の評価を行うためのアンケートとして NASA-TLX に回答してもらう。1 条件の入力ごとに 1 分以上の休憩時間を設ける。全 10 条件の入力を 1 セットとし実験参加者には 2 セットの入力を行ってもらう。実験参加者の実験結果から入力速度およびエラー率を計算する。また、HMD を長時間着用して実験タスクを行うことで肉体的・精神的な疲労が予想されるため、実験中は各条件の途中でであっても、研究対象者の意思で自由に中断・休憩、もしくは参加を中止できることを事前に説明する。

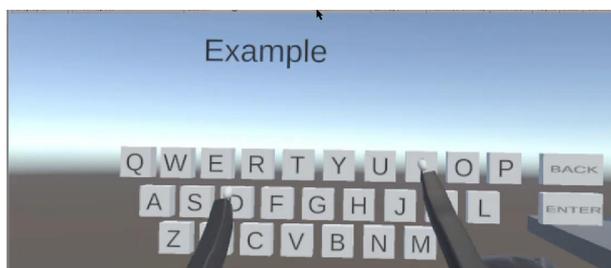


図1 ユーザがVR空間に表示される自身の指を使って文字入力を行う様子



図2 仮想キーボードの位置および角度

○ 実験参加者

実験参加者は本学教職員および学生の中から任意で参加を依頼する。実験参加者数は、統計的な解析を可能とするために10名程度もしくは30名程度の募集を予定している。また、実験参加者には実験へ参加した時間に対する報酬として、筑波大学の規定に基づいた謝金を支払う。報酬の支払い方法は口座振り込みもしくはアマゾンギフト券等の提供とする。実験参加者が身体的・精神的な理由でやむをえず実験を中止する場合には、実験参加者が実験に参加した時間分の謝金を支払う。

○ 実験手順

1, 同意書に基づき実験の目的および方法を実験参加者へ説明し、参加の同意を得る。

- 2, 実験に使用する VR HMD を明星産商株式会社「アルウェッティ one2 エタノール」を用いて拭くことで消毒する。
- 3, 実験前に日頃どの程度 VR 空間における文字入力を行っているかを調査するためにアンケートに回答してもらう。
- 4, HMD を装着し、実験システムを起動した後、文字入力課題を行ってもらう。実験参加者には実験中に思ったことを自由に発言することを促し、表示される課題文を「できる限り早く正確に入力する」ように指示する。
 - I. 仮想キーボードの表示位置 2 条件および仮想キーボードの表示角度 5 条件の組合せ 10 条件から無作為に選択された 1 条件において英文 10 文を入力してもらう。
 - II. 英文 10 文入力完了後、NASA-TLX を用いた主観的作業負担の評価のためのアンケートに回答してもらう。
 - III. 1 分以上の休憩をとってもらう。
 - IV. 既の実施した条件とは異なる条件を選択し、その条件において英文 10 文を入力してもらう。
 - V. II-IV を繰り返し、全 10 条件における入力が完了することを 1 セットとする。セット間には 2 分以上の休憩をとってもらい、実験参加者にはこれを 2 セット行ってもらおう。
- 5, 実験全体を通じた感想および疑問を口頭にて述べてもらう。

○ 実験の所要時間

文字入力課題における 1 文の入力にかかる時間はおおよそ 20 秒である。各実験参加者は文字入力課題として全部で 10 条件×2 セット×10 文=200 文の入力を行う。そのため、1 時間程度の実験時間を要する。実験前には同意書の説明時間、文字入力課題終了後にはアンケートの回答時間も含まれるため、休憩を含めて 120 分程度の実験時間となる。

作業負荷アンケート

文責：志築文太郎

※選択肢の説明

- **知的／知覚的要求**

どの程度の知的・知覚的（考える、決める、計算する、記憶する、見るなど）を必要とするか、課題が易しいか難しいか、単純か複雑か、正確さが求められるか大雑把でよいか

- **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）を必要とするか、作業が楽かキツイか、ゆっくりできたか急ぐ必要があったか、休みながらできたか作業が連続したか

- **タイムプレッシャー**

仕事のペースや課題が発生する頻度のために感じる時間的切迫感がどの程度か、ペースはゆっくりで余裕があったか、もしくは早く余裕がなかったか

- **作業成績**

作業指示者によって設定された課題の目標をどの程度達成できたと考えているか、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るか

- **努力**

作業成績のレベルを達成・維持するための、精神的・身体的にどの程度一生懸命作業しなければならなかったか

- **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、悩みをどの程度感じるか、あるいは安心感、満足感、充足感、楽しさ、リラックスをどの程度感じるか

- **全体的な負荷**

全体を通して作業の負担はどうであったか

1. 本実験を終えて、より重要だと感じた方に○を記入してください

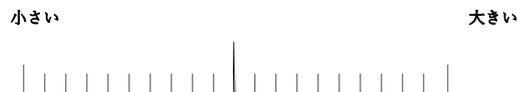
知的／知覚的要求 ・ 身体的要求
知的／知覚的要求 ・ タイムプレッシャー
知的／知覚的要求 ・ 作業成績
知的／知覚的要求 ・ 努力
知的／知覚的要求 ・ フラストレーション
身体的要求 ・ タイムプレッシャー
身体的要求 ・ 作業成績
身体的要求 ・ 努力

身体的要求 ・ フラストレーション
タイムプレッシャー ・ 作業成績
タイムプレッシャー ・ 努力
タイムプレッシャー ・ フラストレーション
作業成績 ・ 努力
作業成績 ・ フラストレーション
努力 ・ フラストレーション

2. 本実験を終えて以下の項目について○印を記入して評価してください

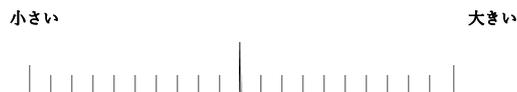
• **知的/知覚的要求 (小さい/大きい)**

どの程度の知的・知覚的 (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, 課題は易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, 正確さは求められましたか大雑把でもよかったですか



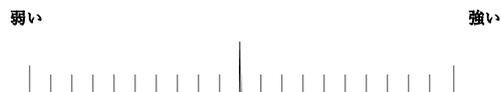
• **身体的要求 (小さい/大きい)**

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, 作業は楽でしたかキツかったですか, ゆっくりできましたか急ぐ必要がありましたか, 休みながらできましたか作業は連続しましたか



• **タイムプレッシャー (弱い/強い)**

仕事のペースや課題が発生する頻度のために感じる時間的切迫感ほどの程度であったか, ペースはゆっくりでしたか余裕がありましたか, もしくは早くて余裕がありませんでしたか



• **作業成績 (悪い/良い)**

作業指示者によって設定された課題の目標をどの程度達成できたと考えていますか、目標の達成に関して自分の作業成績にどの程度満足しましたか



• **努力 (少ない/多い)**

作業成績のレベルを達成・維持するための、精神的・身体的にどの程度一生懸命作業しなければなりませんでしたが



• **フラストレーション (低い/高い)**

作業中に不安感, 落胆, いらいら, ストレス, 悩みをどの程度感じましたか、あるいは安心感, 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



• **全体的な負荷 (低い/高い)**

全体を通して作業の負担はどうでしたか



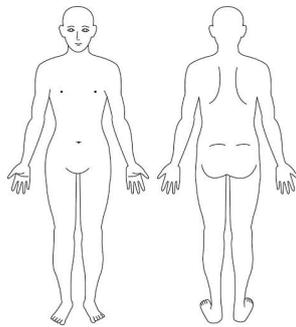
アンケート例

A.4 実験後アンケート（位置および角度の影響）

疲労に関するアンケート

文責：富永浩暉

1. 本実験にて疲労を感じた身体部位に○をつけてください



2. 疲労を感じた場合、疲労の程度を 10 段階で評価してください

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

3. 疲労を感じた場合、それはどのような疲労感であったか記述してください

4. 本実験について、改善点および現状維持すべき点等があれば記述してください

5. 本実験について、感想等があれば記入してください

作業負荷アンケート (NASA-TLX)

文責：富永浩暉

1. 本実験を終えて、より重要だと感じた方に○を記入してください

知的／知覚的要求 ・ 身体的要求
知的／知覚的要求 ・ タイムプレッシャー
知的／知覚的要求 ・ 作業成績
知的／知覚的要求 ・ 努力
知的／知覚的要求 ・ フラストレーション
身体的要求 ・ タイムプレッシャー
身体的要求 ・ 作業成績
身体的要求 ・ 努力
身体的要求 ・ フラストレーション
タイムプレッシャー ・ 作業成績
タイムプレッシャー ・ 努力
タイムプレッシャー ・ フラストレーション
作業成績 ・ 努力
作業成績 ・ フラストレーション
努力 ・ フラストレーション

2. 本実験を終えて以下の項目について○印を記入して評価してください

• **知的／知覚的要求 (小さい／大きい)**

どの程度の知的・知覚的 (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、課題は易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、正確さは求められましたか大雑把でもよかったですか

小さい

大きい

• **身体的要求（小さい／大きい）**

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、作業は楽でしたかキツかったですか、ゆっくりできましたか急ぐ必要はありましたか、休みながらできましたか作業は連続しましたか



• **タイムプレッシャー（弱い／強い）**

仕事のペースや課題が発生する頻度のために感じる時間的切迫感ほどの程度であったか、ペースはゆっくりでしたか余裕がありましたか、もしくは早くて余裕がありませんでしたか



• **作業成績（悪い／良い）**

作業指示者によって設定された課題の目標をどの程度達成できたと考えていますか、目標の達成に関して自分の作業成績にどの程度満足しましたか



• **努力（少ない／多い）**

作業成績のレベルを達成・維持するための、精神的・身体的にどの程度一生懸命作業しなければなりませんでしたか



• **フラストレーション（低い／高い）**

作業中に不安感、落胆、いらいら、ストレス、悩みをどの程度感じましたか、あるいは安心感、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



ユーザビリティに関するアンケート (SUS)

文責：富永浩暉

本キーボードに関して、以下の 10 項目を評価してください

そう思わない

そう思う

1. 本キーボードを頻繁に使いたいと思う 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____ 5
2. 本キーボードは不必要に複雑だと思う 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____ 5
3. 本キーボードは使いやすいと思う 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____ 5
4. 本キーボードを使用するには、
詳しい人のサポートが必要だと思う 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____ 5
5. 本キーボードは様々な機能が
上手く統合されていると思う 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____ 5
6. 本キーボードには一貫性がないと思う 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____ 5
7. 多くの人が本キーボードの使い方を
すぐに習得できると思う 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____ 5
8. 本キーボードを使うのは面倒だと思う 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____ 5
9. 本キーボードを使いこなせる自信がある 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____ 5
10. 本キーボードを使い始める前に、
多くのことを学ぶ必要がある 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____ 5

A.5 実験後アンケート（提案キーボード）

2021/12/18 23:38 System Usability Scale Test

System Usability Scale Test

*必須

1. メールアドレス *

2. 年齢を教えてください

3. 性別を教えてください

1つだけマークしてください。

男

女

その他

4. 利き手を教えてください

1つだけマークしてください。

右利き

左利き

両利き

https://docs.google.com/forms/d/1KniGAgSkoqBPf7qUGBYL4qCXye2m3J6ZRLm_odFnt6s/edit 1/5

5. 視力矯正について教えてください

1つだけマークしてください。

- 裸眼
 眼鏡
 コンタクトレンズ

本キーボードに関して、以下の10項目を評価してください。

6. ユーザID

7. 本キーボードを頻繁に使いたいと思う。

1つだけマークしてください。

	1	2	3	4	5	
そう思わない	<input type="radio"/>	そう思う				

8. 本キーボードは不必要に複雑だと思う

1つだけマークしてください。

	1	2	3	4	5	
そう思わない	<input type="radio"/>	そう思う				

9. 本キーボードは使いやすいと思う

1つだけマークしてください。

	1	2	3	4	5	
そう思わない	<input type="radio"/>	そう思う				

10. 本キーボードを使用するには、詳しい人のサポートが必要だと思う

1つだけマークしてください。

	1	2	3	4	5	
そう思わない	<input type="radio"/>	そう思う				

11. 本キーボードは様々な機能が上手く統合されていると思う

1つだけマークしてください。

	1	2	3	4	5	
そう思わない	<input type="radio"/>	そう思う				

12. 本キーボードには一貫性がないと思う

1つだけマークしてください。

	1	2	3	4	5	
そう思わない	<input type="radio"/>	そう思う				

13. 多くの人が本キーボードの使い方をすぐに習得できると思う

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5

そう思わない そう思う

14. 本キーボードを使うのは面倒だと思う

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5

そう思わない そう思う

15. 本キーボードを使いこなせる自信がある

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5

そう思わない そう思う

16. 本キーボードを使い始める前に、多くのことを学ぶ必要がある

1つだけマークしてください。

1 2 3 4 5

そう思わない そう思う

17. 何かご意見ご要望があれば記述をお願いします。
