

# 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評価に与える影響の調査

富永 浩暉\*<sup>1</sup> 高倉 礼\*<sup>1</sup> 志築 文太郎\*<sup>1</sup>

Investigating the Effects of Virtual Keyboard Position and Angle  
on Text Entry Performance and Subjective Evaluation

Koki Tominaga\*<sup>1</sup>, Rei Takakura\*<sup>1</sup>, and Buntarou Shizuki\*<sup>1</sup>

**Abstract** – The virtual keyboard in the VR space is characterized by the user can place the keyboard at any position and angle in the air. The user's posture changes as the position and angle of the virtual keyboard change. We conducted an experiment to investigate the effects of the position and angle of the virtual keyboard on text entry. We found that the position of the virtual keyboard affected the workload by analyzing the experimental data for each participant in the experiment. In this paper, we analyzed the experimental data for each entry phrase. The results show that the entry speed and usability may be improved by tilting the keyboard toward the back from the user's point of view. Furthermore, since the fatigue of the arms was larger than the fatigue of the neck, the fatigue could be minimized by designing VR applications so as to place the user's fingers at a lower position than the user's eye level.

**Keywords** : Virtual Reality, Head Mounted Display, Mid-Air Interaction

## 1. はじめに

Virtual Reality (以降, 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ており, 位置および角度を自由に設置できるという特徴がある. 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. 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<sup>[1]</sup>. 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で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.

空中タップを用いた文字入力手法<sup>[2-5]</sup>では, 指から放出されたレイを用いた文字入力手法<sup>[6,7]</sup>と異なり, ユーザが自身の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は, 仮想キーボードの位置により操作するユーザの姿勢が, 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目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. VR 空間を利用するために装着する Head-Mounted Display (以降, HMD) の重量は 500 g

以上あり, 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<sup>[9,14,20]</sup>. 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<sup>[8,23,24]</sup>). 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<sup>[24]</sup>. 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<sup>[13]</sup>. 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.

我々はこれまでに, 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  $\theta$ ) および角度 (姿勢角  $\phi$ ) 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<sup>[9]</sup>. その実験の結果, 仮想キーボードの位置が主観的作業負荷に影響を与えることが分かった. 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

\*1: 筑波大学

\*1: University of Tsukuba

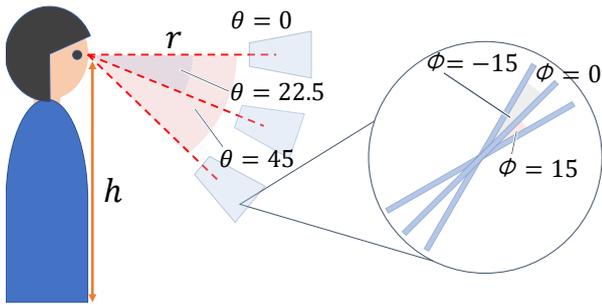


図1 仮想キーボードの偏角  $\theta$  および姿勢角  $\phi$ .  
Fig.1 Declination angle  $\theta$  and posture angle  $\phi$  of the virtual keyboard.

角  $\theta$ ) だけ移動させた位置とした。比較実験における仮想キーボードの偏角  $\theta$  および姿勢角  $\phi$  を図 1 に示す。本研究において、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  $\theta$  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  $\phi$  を 0 度と定義した。我々はさらに、この実験データを入力フレーズごとに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文字入力に与える影響を調査した<sup>[10]</sup>。その結果、仮想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入力速度およびユーザビリティが向上すること、ならびに目線の高さより低い位置に仮想キーボードを設置することにより主観的作業負荷を抑えられることが示唆された。本論文では、これらの調査結果に関する新たな考察を述べる。

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  $\theta$  および姿勢角  $\phi$  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。

## 2. 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が多く行われている。

### 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 配列の仮想キーボードには、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<sup>[14]</sup>。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<sup>[12,15]</sup>、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<sup>[15]</sup>。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<sup>[11]</sup> 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<sup>[12]</sup> 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。

#### 2.1.2 仮想キーボードの角度の違いによる比較

Dang ら<sup>[13]</sup> 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<sup>[14]</sup> 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 60 cm 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 6 cm 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 らはユーザ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。

#### 2.1.3 文字入力手法の違いによる比較

Markussen ら<sup>[16]</sup> は、大型ディスプレイを対象として、空中タップを用いた、H4<sup>[17]</sup>、MultiTap<sup>[18]</sup>、および QWERTY 配列のキーボードの入力性能を比較

した。その結果、QWERTY 配列の仮想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 配列の仮想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。

## 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<sup>[19]</sup>。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<sup>[24]</sup>。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<sup>[20-23]</sup>。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を調査した研究<sup>[21,23-25,35]</sup>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<sup>[20]</sup>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<sup>[21]</sup>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<sup>[23]</sup>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<sup>[24]</sup>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。

### 2.2.2 キーボードの角度による疲労

Simoneau ら<sup>[25]</sup>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か調査する必要がある。

## 3. 仮説

これまでの先行研究から、空中タップにより操作される仮想キーボードは、(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こと、(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こと、(3) 仮想キーボードの角度は入力性能へ影響を与えること、(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ことが示唆されている。

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それぞれ組み合わせて評価した研究は少ない。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が多く行われているものの、手前方向へ傾けた場合を評価した調査はない。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。これにより、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、我々は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。



図2 LeapMotion を取り付けけた HTC VIVE.  
Fig.2 HTC VIVE with LeapMotion at-  
tached.

$H_1$  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  $\theta$  および姿勢角  $\phi$ 、図1）をそれぞれ組み合わせた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。

#### 4. 予備実験

HMD を装着した状態かつ仮想キーボードの偏角  $\theta$  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<sup>[20]</sup>。そこで我々は、安全に実験を行える仮想キーボードの偏角  $\theta$  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 歳の大学生および大学院生 8 名（全員男性、全員右利き、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 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<sup>®</sup> Core<sup>™</sup> i7-8750H, 16 GB RAM, NVIDIA<sup>®</sup> GeForce<sup>®</sup> 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 2 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



図3 実験にて用いた仮想キーボード。  
Fig.3 The virtual keyboard used in the user  
study.

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。

実験参加者は、仮想キーボードの偏角  $\theta$  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<sup>[16]</sup> から本予備実験では QWERTY 配列の仮想キーボードを採用した。Bachynskyi ら<sup>[21]</sup> 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<sup>[26]</sup> 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<sup>[27]</sup> 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<sup>[14]</sup> に倣い 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<sup>[12,29]</sup> 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 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 $\theta$ 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<sup>[28]</sup>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 $\theta$ 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。

#### 4.2 結果

予備実験において、偏角 $\theta$ が60度の条件にて実験参加者6名が、偏角 $\theta$ 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 $\theta$ 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 $\theta$ 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 $\theta$ 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 $\theta$ の範囲を0度から45度とした。

### 5. 実験

VR向け仮想キーボードの偏角 $\theta$ および姿勢角 $\phi$ 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歳の大学生および大学院生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 $\theta$ および姿勢角 $\phi$ が異なる条件（図1）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、実験参加者の視線の高さ $h$ （ $M=162.0$  cm,  $SD=7.14$  cm）および腕の長さ $r$ （ $M=72.0$  cm,  $SD=3.85$  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 $\theta$ を0度、22.5度、および45度の3条件、姿勢角 $\phi$ を0度および $\pm 15$ 度の3条件とした。偏角 $\theta$ 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 $\theta$ の範囲である0度から45度の範囲から定めた。姿勢角 $\phi$ 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<sup>[25]</sup>（図4）。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<sup>[28]</sup>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偏角 $\theta$ 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を入力するように指示され、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-TLX<sup>[30]</sup>、System Usability Scale (SUS)<sup>[31]</sup>スコアを計測するためのアンケート、および疲労評価アンケートに回答した。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<sup>[32]</sup>）および入力エラー率（MSDエラー率: Minimum String Distance Error Rate<sup>[33]</sup>）を用いた。

以降では、WPM、MSDエラー率、およびNASA-TLXより得られた加重ワークロード（以降、WWL: Weighted workload）、およびSUSスコア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。なお、WPMおよびMSDエラー率の解析には各英文単位のデータを、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 $\theta$ および姿勢角 $\phi$ のみとし、



図4 姿勢角  $\phi$  が異なる3つの仮想キーボード. 左:  $-15^\circ$ , 中央:  $0^\circ$ , 右:  $15^\circ$ .

Fig.4 Virtual keyboard in three conditions with posture angle  $\phi$  of  $0^\circ$  and  $\pm 15^\circ$ . Left:  $-15^\circ$ . Center:  $0^\circ$ . Right:  $15^\circ$ .

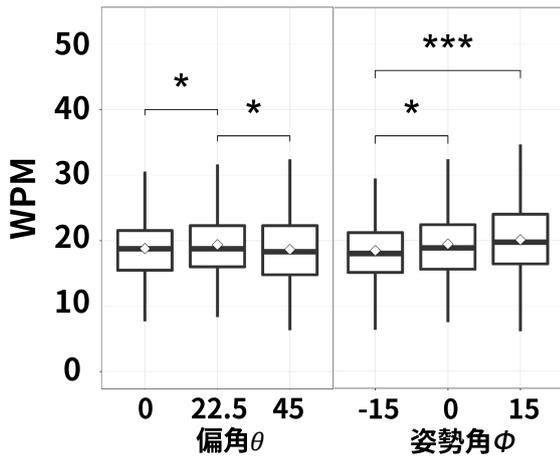


図5 各偏角  $\theta$  および各姿勢角  $\phi$  の WPM (白い点は平均値を示す).

Fig.5 The Words Per Minute (WPM) at a declination angle of  $\theta$  and a posture angle of  $\phi$ .

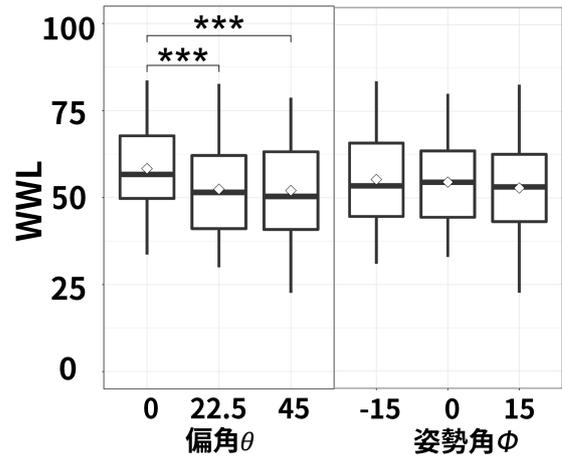


図6 各偏角  $\theta$  および各姿勢角  $\phi$  の WWL (白い点は平均値を示す).

Fig.6 The Weighted Work Load (WWL) at a declination angle of  $\theta$  and a posture angle of  $\phi$ .

主効果検定には反復測定二元配置分散分析を用い、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  $\theta$  および各姿勢角  $\phi$  の WPM ( $M=19.3$ ,  $SD=3.72$ ) を図 5 に示す。WPM は文字入力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  $\theta$  ( $p = 2.24 \times 10^{-2} < 0.05$ ) および姿勢角  $\phi$  ( $p = 7.79 \times 10^{-5} < 0.05$ ) 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  $\theta$  が  $0^\circ$  ( $M=19.07$ ) と  $22.5^\circ$  ( $M=19.81$ ) との間 ( $p = 0.15 \times 10^{-1} < 0.05$ ) および  $22.5^\circ$  ( $M=19.81$ ) と  $45^\circ$  ( $M=19.05$ ) との間 ( $p = 0.04 < 0.05$ ) に有意差が検出された。この結果より、偏角  $\theta$  が WPM に影響を与えることおよび偏角  $\theta$  が  $22.5^\circ$  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  $\phi$  が  $-15^\circ$  ( $M=18.43$ ) と  $0^\circ$  ( $M=19.42$ ) との間 ( $p = 0.37 \times 10^{-1} < 0.05$ ) および  $-15^\circ$  ( $M=18.43$ ) と  $15^\circ$  ( $M=20.09$ ) との間 ( $p = 0.35 \times 10^{-4} < 0.05$ )

の組み合わせに有意差が検出された。この結果より、姿勢角  $\phi$  が WPM に影響を与えることおよび姿勢角  $\phi$  が  $-15^\circ$  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入力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タイプが多いことを表す。各偏角  $\theta$  および各姿勢角  $\phi$  の MSD エラー率 ( $M=0.77\%$ ,  $SD=0.73\%$ ) 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  $\theta$  ( $p = 5.16 \times 10^{-2} > 0.05$ ) および姿勢角  $\phi$  ( $p = 0.29 > 0.05$ ) の主効果および交互作用は検出されなかった。この結果より、偏角  $\theta$  および姿勢角  $\phi$  は MSD エラー率に影響を与えないことが分かった。

### 5.3.2 主観評価

各偏角  $\theta$  および各姿勢角  $\phi$  の WWL ( $M=54.2$ ,  $SD=13.3$ ) を図 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  $\theta$  ( $p = 1.51 \times 10^{-3} < 0.05$ ) の主効果が検出された。ただ

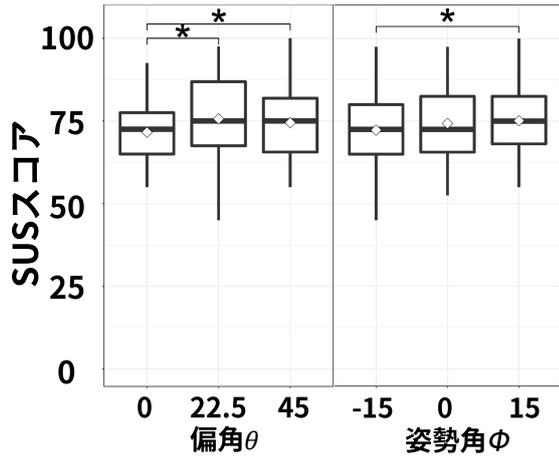


図7 各偏角  $\theta$  および各姿勢角  $\phi$  の SUS スコア (白い点は平均値を示す)。  
 Fig. 7 The System Usability Scale (SUS) at a declination angle of  $\theta$  and a posture angle of  $\phi$ .

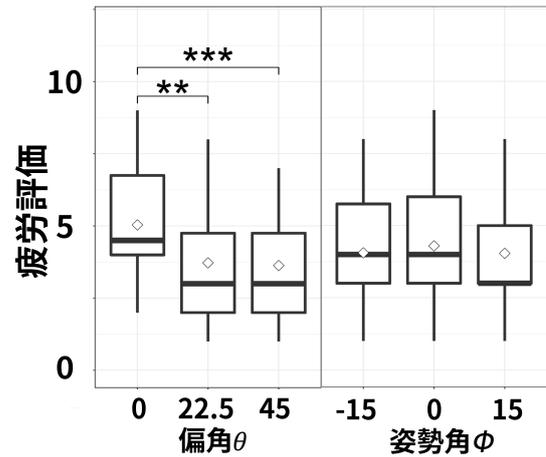


図8 各偏角  $\theta$  および各姿勢角  $\phi$  の疲労 (白い点は平均値を示す)。  
 Fig. 8 The fatigue at a declination angle of  $\theta$  and a posture angle of  $\phi$ .

し、姿勢角  $\phi$  ( $p = 0.22 > 0.05$ ) 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  $\theta$  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  $\theta$  が WWL に影響を与えることおよび偏角  $\theta$  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  $\theta$  および各姿勢角  $\phi$  の SUS スコア ( $M=73.7$ ,  $SD=12.2$ ) を図 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  $\theta$  ( $p = 3.74 \times 10^{-2} < 0.05$ ) および姿勢角  $\phi$  ( $p = 3.95 \times 10^{-2} < 0.05$ ) 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  $\theta$  が 0 度 ( $M=70.88$ ) と 22.5 度 ( $M=75.65$ ) との間 ( $p = 0.22 \times 10^{-1} < 0.05$ ) および 0 度 ( $M=70.88$ ) と 45 度 ( $M=74.49$ ) との間 ( $p = 0.17 \times 10^{-1} < 0.05$ ) に有意差が検出された。この結果より、偏角  $\theta$  が SUS スコアに影響を与えることおよび偏角  $\theta$  が 0 度の条件において最もユーザビリティが低いことが分かった。また、姿勢角  $\phi$  が -15 度 ( $M=71.57$ ) と 15 度 ( $M=75.15$ ) との間 ( $p = 0.19 \times 10^{-1} < 0.05$ ) に有意差が検出された。この結果より、姿勢角  $\phi$  が -15 度の条件に比べて姿勢角  $\phi$  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 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  $\theta$  ( $p = 2.36 \times 10^{-11} < 0.05$ ) の主効果が検出された。ただし、姿勢角

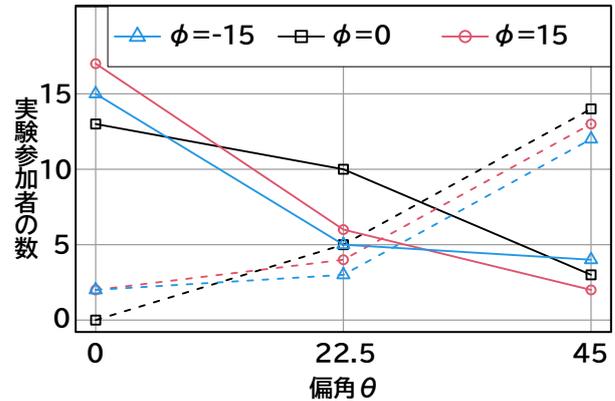


図9 上腕および首の疲労を報告した人数と偏角  $\theta$  および姿勢角  $\phi$  の関係 (実線：上腕、点線：首)。  
 Fig. 9 Relationship between the number of people who complained of upper arm and neck fatigue and the angle of declination angle  $\theta$  and posture angle  $\phi$  (solid line: upper arm; dotted line: neck).

$\phi$  ( $p = 0.27 > 0.05$ ) 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  $\theta$  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  $\theta$  が 0 度の時の疲労は、偏角  $\theta$  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

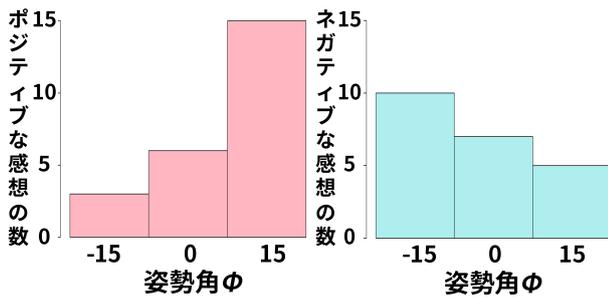


図 10 各姿勢角  $\phi$  のポジティブな感想およびネガティブな感想の数.

Fig. 10 The relationship between the posture angle  $\phi$  and fatigue.

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  $\theta$  および姿勢角  $\phi$  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  $\theta$  および各姿勢角  $\phi$  に対する上腕および首の疲労を報告した人数を図9に示す。図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  $\theta$  および姿勢角  $\phi$  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  $\theta$  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  $\theta$  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  $\theta$  が小さい時には上腕の疲労の報告が増え、偏角  $\theta$  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  $\phi$  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  $\phi$  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  $\phi$  に比べ偏角  $\theta$  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ごと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10より、仮想キーボードの姿勢角  $\phi$  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  $\phi$  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  $\phi$  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  $\phi$  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  $\phi$  が  $-15$  度の条件に比べて、姿勢角  $\phi$  が  $15$  度の条件における文字入力を好むことが分かった。

## 6. 考察

実験より、VR向け仮想キーボードの偏角  $\theta$  および姿勢角  $\phi$  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交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。本節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  $\theta$  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9より偏角  $\theta$  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  $\phi$  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  $\theta$  が  $22.5$  度かつ姿勢角  $\phi$  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  $\phi$  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<sup>[34]</sup>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  $\theta$  および姿勢角  $\phi$  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通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 主観評価

偏角  $\theta$  が 0 度の条件において首の疲労に比べて上腕の疲労が大きい、かつ偏角  $\theta$  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  $\theta$  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上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<sup>[21]</sup> 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  $\theta$  が 22.5 度の位置）にて行うことが好ましいと考えられる。

姿勢角  $\phi$  が -15 度の条件に比べて姿勢角  $\phi$  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、実験参加者は仮想キーボードの姿勢角  $\phi$  が -15 度の条件よりも姿勢角  $\phi$  が 15 度の条件における文字入力を好んだ。我々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  $\phi$  が 15 度の条件は他の条件に比べ普通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。

## 7. 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<sup>[12,29]</sup>、ならび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。

## 8. まとめと今後の展望

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を調査した。空中タップを用いた仮想キーボードを対象として、偏角  $\theta$  および姿勢角  $\phi$  の比較実験を行った結果、偏角  $\theta$  および姿勢角  $\phi$  は入力速度およびユーザビリティに、偏角  $\theta$  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また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  $\theta$  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  $\phi$  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  $\phi$  が -15 度の条件に比べて姿勢角  $\phi$  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  $\phi$  が 15 度）が好ましいといえる。

さらに、ユーザは首よりも上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。しかし、仮想キーボードを偏角  $\theta$  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  $\theta$  を 45 度以下にする必要がある。これらの観点から、上腕の疲労が小さな位置にて手の動きをトラッキング<sup>[35-38]</sup>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。

今後の研究では、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した場合における入力性能および主観評価への影響、および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。

## 参考文献

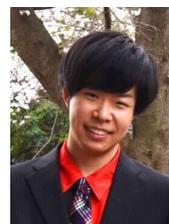
- [1] Bernhaupt, R., Obrist, M., Weiss, A., Beck, E., and Tscheligi, M.: Trends in the living room and beyond: results from ethnographic studies using creative and playful probing, *Computers in Entertainment*, Vol. 6 (1), pp. 1–23 (2008).
- [2] 福仲織, 謝浩然, 宮田一乗: VR 環境におけるフリック入力形式インタフェースの開発, *情報処理学会研究報告*, Vol. 2019–HCI–182, No. 3, pp. 1–8 (2019).
- [3] 喜多修太郎, 小倉加奈代, Bista, B., 高田豊雄: Leap-Motion を用いた VR 上での文字入力手法の検討, *情報処理学会研究報告*, Vol. 2019–HCI–181, No. 21, pp. 1–7 (2019).
- [4] 細野敬太, 笹倉万里子, 田邊浩亨, 川上武志: Leap Motion を用いたジェスチャ操作による文字入力方法の提案, 第 28 回全国大会論文集, 人工知能学会, pp. 1–4 (2014).
- [5] 大西未来, 渡辺大地: Leap Motion を使用した文字入力方法の提案, *コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学 (CG)*, Vol. 2016–CG–165, No. 8, pp. 1–4 (2016).
- [6] Schwind, V., Mayer, S., Comeau–Vermeersch, A., Schweigert, R., and Henze, N.: 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*, ACM, pp. 477–488 (2018).
- [7] Mayer, S., Schwind, V., Schweigert, R., and Henze, N.: 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*. ACM, No. 653, pp. 1–13 (2018).
- [8] Boring, S., Jurmu, M., and Butz, A.: 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, OzCHI ’09*, ACM, pp. 161–168 (2009).
- [9] Tominaga, K., Fujita, S., Takakura, R., and Shizuki, B.: Investigating the Effects of Position and Angle of Virtual Keyboard on Text Entry Performance and Workload, In *Asian CHI Symposium 2021*, ACM, pp. 25–27 (2021).
- [10] 富永浩暉, 高倉志, 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*, ヒューマンインタフェース学会, pp. 400–406 (2021).
- [11] Frutos–Pascual, M., Gale, C., Harrison, J.M., Creed, C., and Williams, I. Character Input in Augmented Reality: An Evaluation of Keyboard Position and Interaction Visualisation for Head–Mounted Displays, *IFIP Conference on Human–Computer Interaction, Human–Computer Interaction–INTERACT 2021, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 12932, pp. 480–501 (2021).
- [12] Dudley, J. J., Benko, H., Wigdor, D., and Kristensson, P. O.: Performance Envelopes of Virtual Keyboard Text Input Strategies in Virtual Reality, *2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR 2019, IEEE*, pp. 289–300 (2019).
- [13] Dang, N.T., and Mestre, D.: Effects of Menu Orientation on Pointing Behavior in Virtual Environments, *Virtual and Mixed Reality, Part I, HCII 2011, LNCS 6773*, pp. 144–153 (2011).
- [14] Yang, Z., Chen, C., Lin, Y., Wang, D., Li, H., and Xu, W.: Effect of spatial enhancement technology on input through the keyboard in virtual reality environment, *Applied Ergonomics, Volume 78*, pp. 164–175 (2019).
- [15] Speicher, M., Feit, A. M., Ziegler, P., and Krüger, A.: Selection–Based Text Entry in Virtual Reality, In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI ’18*, ACM, pp. 647:1–647:13 (2018).
- [16] Markussen, A., Jakobsen, M. R., Hornbæk, K.: Selection–Based Mid–Air Text Entry on Large Displays, *Human–Computer Interaction–INTERACT 2013, Lecture Notes in Computer Science, IFIP Conference on Human–Computer Interaction*, Vol.8117, pp. 401–418 (2013).
- [17] MacKenzie, I.S., Soukoreff, R.W., Helga, J.: 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*, ACM, 471–480 (2011).
- [18] Butts, L., Cockburn, A.: An evaluation of mobile phone text input methods, In *Proceedings of the Third Australasian conference on User interfaces, AUIC ’02, IEEE*, vol. 7, pp. 55–59 (2002).
- [19] Enoka, R. M., and Stuart, D. G.: Neurobiology of muscle fatigue, *Journal of applied physiology*, Vol. 72, No. 5, pp. 1631–1648 (1992).
- [20] Penumudi, S. A., Kuppam, V. A., Kim, J. H., and Hwang, J.: The effects of target location on musculoskeletal load, task performance, and subjective discomfort during virtual reality interactions, *Applied Ergonomics*, Vol. 84, pp. 103010 (2020).
- [21] Bachynskyi, M., Palmas, G., Oulasvirta, A., and Weinkauff, T.: Informing the Design of Novel Input Methods with Muscle Coactivation Clustering, *ACM Transactions on Computer–Human Interaction, Interact.* Vol.21, No.6, Article 30, pp. 1–25 (2015).
- [22] Harrison, C., Ramamurthy, S., and Hudson, S. E.: On–body interaction: armed and dangerous, In *Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction, TEI ’12*, ACM, pp. 69–76 (2012).

- [23] Hincapié-Ramos, J. D., Guo, X., Moghadasian, P., and Irani, P.: Consumed Endurance: A Metric to Quantify Arm Fatigue of Mid-Air Interactions, Proceedings of the 2014 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '14, ACM, pp. 1063–1072 (2014).
- [24] Jang, S., Stuerzlinger, W., Ambike, S., and Ramani, K.: Modeling Cumulative Arm Fatigue in Mid-Air Interaction based on Perceived Exertion and Kinetics of Arm Motion, Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '17, ACM, pp. 3328–3339 (2017).
- [25] Simoneau, G. G., and Marklin, R. W.: 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 (2003).
- [26] Hoshi, H.: 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).
- [27] Dube, T. J., and Arif, A. S.: 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, ACM, pp. 1–10 (2020).
- [28] MacKenzie, I. S., and Soukoreff, R. W.: Phrase Sets for Evaluating Text Entry Techniques, In CHI'03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '03, ACM, pp. 754–755 (2003).
- [29] Dudley, J. J., Gupta, A., Benko, H., and Kristensson, P. O.: 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, CHI '21, ACM, Article 287, pp. 1–11 (2021).
- [30] Hart, S. G., and Staveland, L. E.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research, In Human Mental Workload, Advances in Psychology, Vol. 52. pp. 139–183 (1988).
- [31] Brooke, J.: SUS : A Quick and Dirty Usability Scale, Usability Evaluation in Industry, pp. 189–194 (1996).
- [32] Arif, A. S., and Stuerzlinger, W.: Analysis of Text Entry Performance Metrics, 2009 IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity, TIC-STH, IEEE, pp. 100–105 (2009).
- [33] Soukoreff, R. W., and MacKenzie, I. S.: Metrics for Text Entry Research: An Evaluation of MSD and KSPC, and a New Unified Error Metric, In SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '03, ACM, pp. 113–120 (2003).
- [34] 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, p. 41–44 (2001).
- [35] Iqbal, H., Latif, S., Yan, Y., Yu, C., and Shi, Y.: Reducing Arm Fatigue in Virtual Reality by Introducing 3D-Spatial Offset, in IEEE Access, vol. 9, pp. 64085–64104 (2021).
- [36] Feuchtnner, T., and Müller, J.: 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, ACM, pp. 31–43 (2018).
- [37] Brasier, E., Chapuis, O., Ferey, N., Vezien, J., and Appert, C.: ARpads: Mid-Air Indirect Input for Augmented Reality, 2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR, IEEE, pp. 332–343 (2020).
- [38] Grubert, J., Witzani, L., Ofek, E., Pahud, M., Kranz, M., and Kristensson, P.O.: 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), Tuebingen/Reutlingen, pp. 159–166 (2018).

(2021年11月10日受付, 2022年2月4日再受付)

## 著者紹介

富永 浩暉 (学生会員)



1996年生。2020年山口大学理学部物理情報科学科卒業。現在、筑波大学大学院システム情報工学研究群情報理工学位プログラム博士前期課程在学中。ヒューマンインタフェースに関する研究に興味を持つ。ACM, 情報処理学会, ヒューマンインタフェース学会各学生会員。

高倉 礼 (学生会員)



1997年生。2020年筑波大学情報学群情報メディア創成学類卒業。現在、同大学院システム情報工学研究群情報理工学位プログラム博士前期課程在学中。ヒューマンインタフェースに関する研究に興味を持つ。ACM, 情報処理学会各学生会員, ヒューマンインタフェース学会各学生会員。

志築 文太郎 (正会員)



1971年生。1994年東京工業大学理学部情報学科卒業。2000年同大学大学院情報理工学研究科数理・計算科学専攻博士課程単位取得退学。博士(理学)。現在、筑波大学システム情報系教授。ヒューマンインタフェースに関する研究に興味を持つ。日本ソフトウェア科学会, ACM, IEEE Computer Society, 情報処理学会, ヒューマンインタフェース学会各会員。