

# 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

富永 浩暉<sup>1,a)</sup> 平井 李音<sup>1,b)</sup> 志築 文太郎<sup>2,c)</sup>

概要：我々は、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提案する。本手法において用いら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。ユーザは上面および下面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。本手法では、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。我々は、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、本手法と通常の QWERTY キーボードとの比較実験を行った。実験の結果、本手法は QWERTY キーボードと比べて入力速度が低いものの、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速度が低く、主観的作業負荷およびユーザビリティが低いことが分かった。



図 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。

## 1. はじめに

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次元インタラクションが用いられる。3次元インタラクションにおいてユーザは、3次元方向へのポインティングが可能である。しかし、手指による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 [1]。さらに、VR システムに標準

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。したがって、手の移動量に基づく身体的負荷 [2] 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 [3]。

これらの問題を解決するために、我々は広く使われている 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開発した [4]。本仮想キーボードは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ように設計されている。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）。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 配列の仮想キーボー

<sup>1</sup> 筑波大学 情報理工学位プログラム

<sup>2</sup> 筑波大学 システム情報系

a) tominaga@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

b) hirai@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

c) shizuki@cs.tsukuba.ac.jp

ドを実現した。

本稿では、実験参加者が文字入力に人差し指のみを用いた条件（以下、人差し指条件）および人差し指および親指を用いた条件（以下、2本指条件）にて提案キーボードおよびQWERTYキーボードの比較実験を行い、入力性能、主観評価、および手の移動量を評価した。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速度が低いものの、手の移動量が小さいことが分かった。また、提案キーボードおよびQWERTYキーボードの両条件において、2本指条件は人差し指条件に比べて入力速度が低く、主観評価が低いことが分かった。

## 2. 関連研究

これまでに入力性能の向上および作業負荷の減少を目的とし、VR向けの文字入力手法が研究されてきた。

### 2.1 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 [5] 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列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 [6] 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 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 [7] 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 [8] 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。

よって、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した文字入力手法が求められる。

### 2.2 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 [9] 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 [10]。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 [11] 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 [12]。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。

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。

以上より、我々は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。

## 3. 設計および操作方法

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したQWERTY配列の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。

### 3.1 仮想キーボードの設計

図1に、今回実装した仮想キーボードの概形を示す。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 [2]。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1のようなQWERTY配列とした。本手法では、QWERTY配列の仮想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。

Bachynskiyら [13] 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 [14]。これらに基づき、我々は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 [15]。よって、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

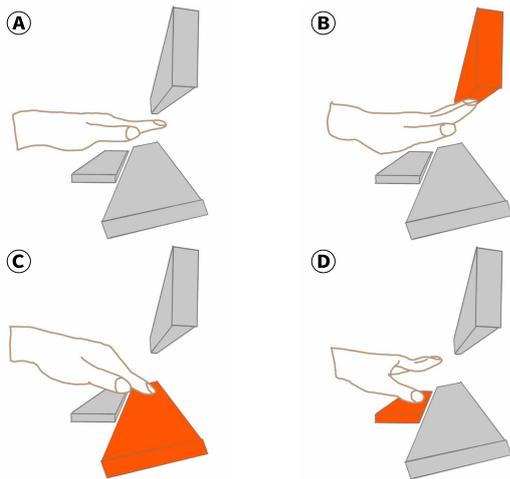


図 2 人差し指提案キーボードの操作手順.

び中段の間隔を 5.50 cm とした。我々は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た。

### 3.2 操作方法

今回実装した仮想キーボードの操作手順を図 2 に示す。本手法では、ユーザは図 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 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 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 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。

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 [16]。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。

## 4. 実験

我々は、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



図 3 LeapMotion を取り付けした HTC VIVE.

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。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 Head Mounted Display（以降、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。

### 4.1 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 3 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、先行研究 [4] に倣い仮想キーボードは実験参加者の目線の高さから下方に 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。

実験に用いた QWERTY キーボード (図 4) の大きさは、提案キーボードと同様に Bachynskiy ら [13] の報告および日本人の肩幅の大きさ [14] を考慮して、42.5 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 [15]、縦 3.75 cm、横 3.75 cm、奥行き 1.25 cm の直方体とした (図 4)。また、キー同士の幅を 0.5 cm、キーの縦横方向の当たり判定を 4.125 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



図 4 実験にて用いた QWERTY キーボード。

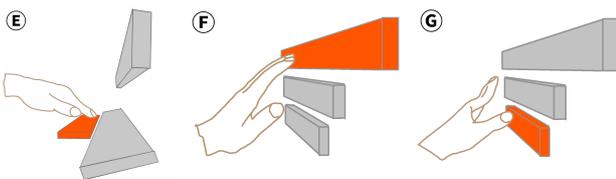


図 5 実験にて比較した文字入力手法の操作手順。E: 人差し指条件における提案キーボードの下端およびスペースキーのタップ。F: 人差し指による QWERTY キーボードのタップ。G: 2本指条件における QWERTY キーボードのタップ。

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 5 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 2B および図 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 5E 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 5F 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 5F および図 5G 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。

#### 4.2 実験タスク

実験参加者は、文字入力に提案キーボード (図 1) もしくは QWERTY キーボード (図 4) 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 [17] を用いた。我々は、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) [18], System Usability Scale (SUS) [19] 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。

## 5. 結果

我々は、入力性能の評価指標に入力速度 (WPM: Words Per Minute [20]) を用いた。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 [2]) および 10 フレーズ毎における手の移動量の総和を用いた。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を測定した上で、以下の式にて計算される。

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

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, HMPW, および手の移動量の総和を統計解析した結果を示す。WPM は文字入力に関する指標であり、WPM が大きいほど入力が速いことを表す。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。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, HMPW, および手の移動量の総和の解析には各英文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  $t$  検定およびテューキーの多重比較検定を用いた。また、有意水準を 0.05 とした。

### 5.1 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 6 左および図 7 左に示す。反復測定二元配置分散分析の結果、WPM に対して各仮想キーボード ( $p = 1.58 \times 10^{-5} < 0.05$ ) および入力に用いた指の本数 ( $p = 2.51 \times 10^{-6} < 0.05$ ) の主効果が検出された。また、交互作用が検出された。事後検

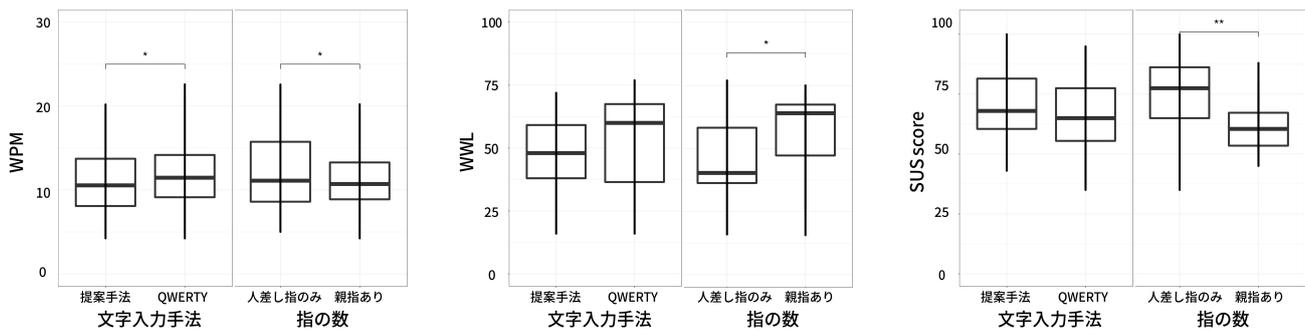


図 6 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における WPM, WWL, および SUS スコア。左: WPM, 中央: WWL, 右: SUS スコア

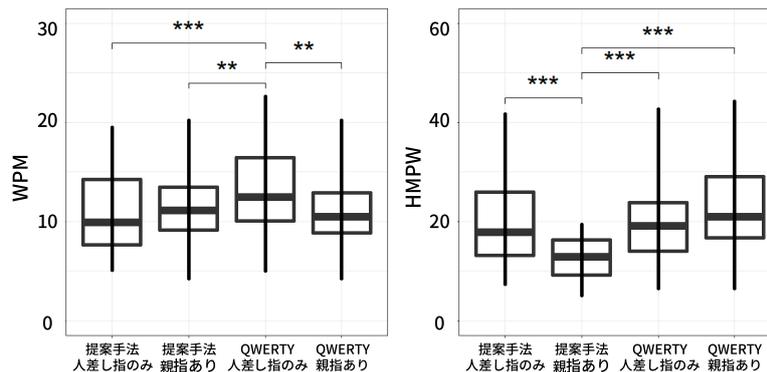


図 7 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数を組み合わせた 4 条件における WPM および HMPW。左: WPM, 右: HMPW

定の結果, 提案キーボードと QWERTY キーボードとの間 ( $p = 1.81 \times 10^{-2} < 0.05$ ) および人差し指条件と 2 本指条件との間 ( $p = 2.91 \times 10^{-2} < 0.05$ ) に有意差が検出された。さらに, 人差し指条件における QWERTY キーボードと 2 本指条件における QWERTY キーボードとの間 ( $p = 1.02 \times 10^{-3} < 0.05$ ), 人差し指条件における QWERTY キーボードと人差し指条件における提案キーボードとの間 ( $p = 0.74 \times 10^{-3} < 0.05$ ), および人差し指条件における QWERTY キーボードと 2 本指条件における提案キーボードとの間 ( $p = 8.90 \times 10^{-3} < 0.05$ ) に有意差が検出された。この結果より, QWERTY キーボードに比べ提案キーボードの入力速度が低いこと, および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。

## 5.2 主観評価

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 ( $M=50.99$ ,  $SD=17.18$ ) を図 6 中央に示す。反復測定二元配置分散分析の結果, WWL に対して入力に用いた指の本数 ( $p = 1.34 \times 10^{-3} < 0.05$ ) 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, 各仮想キーボード ( $p = 0.47 > 0.05$ ) の主効果は検出されなかった。事後検定の結果, 人差し指条件と 2 本指条件との間 ( $p = 1.64 \times 10^{-2} < 0.05$ ) 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 本指条件の主観的作業負荷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 SUS スコア ( $M=67.65$ ,  $SD=16.65$ ) を図 6 右に示す。反復測定二元配置分散分析の結果, SUS スコアに対して入力に用いた指の本数 ( $p = 1.29 \times 10^{-3} < 0.05$ ) の主効果が検出された。なお, 各仮想キーボード ( $p = 0.31 > 0.05$ ) 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, 人差し指条件と 2 本指条件との間 ( $p = 1.06 \times 10^{-4} < 0.05$ ) 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 本指条件のユーザビリティが低いことが分かった。

## 5.3 手の移動量

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 HMPW ( $M=19.15$  cm,  $SD=9.21$  cm) を図 8 左および図 7 右に示す。反復測定二元配置分散分析の結果, HMPW に対して各仮想キーボード ( $p = 1.15 \times 10^{-2} < 0.05$ ) の主効果が検出された。また, 交互作用が検出された。なお, 入力に用いた指の本数 ( $p = 0.11 > 0.05$ ) の主効果は検出されなかった。事後検定の結果, 提案キーボードと QWERTY キーボードとの間 ( $p = 1.40 \times 10^{-2} < 0.05$ ) に有意差が検出された。さらに, 2 本指条件における提案キーボードと人差し指条件における提案キーボードとの間 ( $p = 0.83 \times 10^{-4} < 0.05$ ), 2 本指条件における提案キーボードと人差し指条件における QWERTY キーボードとの

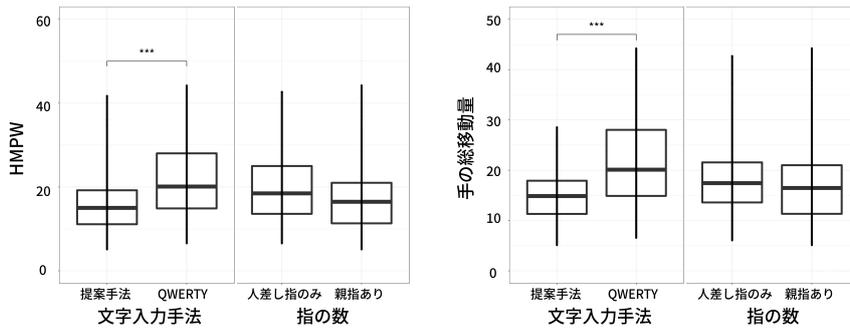


図 8 各仮想キーボードおよび入力に用いた指の本数における HMPW および手の移動量の総和. 左: HMPW, 右: 手の移動量の総和

間 ( $p = 0.57 \times 10^{-4} < 0.05$ ), および 2 本指条件における提案キーボードと 2 本指条件における QWERTY キーボードとの間 ( $p = 0.25 \times 10^{-7} < 0.05$ ) 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 が小さいことが分かった. また, 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の手の移動量の総和 ( $M=18.32\text{m}$ ,  $SD=8.48\text{m}$ ) を図 8 右に示す. 反復測定二元配置分散分析の結果, 手の移動量の総和に対して各仮想キーボード ( $p = 5.80 \times 10^{-3} < 0.05$ ) の主効果が検出された. なお, 入力に用いた指の本数 ( $p = 0.25 > 0.05$ ) 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, 提案キーボードと QWERTY キーボードとの間 ( $p = 2.53 \times 10^{-4} < 0.05$ ) 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手の移動量の総和が小さいことが分かった.

## 6. 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. 本節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.

### 6.1 入力性能

実験結果より, QWERTY キーボードに比べ提案キーボードの入力速度が低いことが分かった. これは実験参加者が 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, 提案キーボードの操作に慣れるまでに時間がかかったことが一因だと考えられる. 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. QWERTY キーボードは, コンピュータもしくはスマート

フォンにおける文字入力に用いられることが多いため, 実験開始前に操作方法について問われることが一度もなかったが, 提案キーボードの操作方法は練習セッション中に度々質問された. よって, 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. また, 実験参加者の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と思う.」といった意見があった. この課題を解決するために, 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性能を計測する.

また, 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. 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 [16] 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く, 正確な文字入力に時間がかかったと考えられる.

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, QWERTY キーボードの入力速度が高かった結果と同様に慣れによる影響が大きく, 親指による誤タップが少なかったためだと考えられる.

### 6.2 主観評価

実験結果より, 人差し指条件に比べ 2 本指条件の主観的作業負荷が大きく, 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身体的および精神的要求が増大したためだと考えられる. 実験参加者の自由記述の感想にて, 「2 本の指だけ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作業負荷が大きかったことが分かった. また, 「親指によるスペースキーのタップ

が楽だった」, 「スペースキーだけ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, 主観的作業負荷および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かったことが分かった. 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.

### 6.3 手の移動量

実験結果より, QWERTY キーボードに比べ提案キーボードにおける HMPW および手の移動量の総和が小さいことが分かった. これは, 手の上下方向の移動量が制限され, 奥方向のポインティングを削減したことが一因だと考えられる. 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, 主観評価に悪影響が生じていたことが分かった. よって, 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する必要がある. また, 人差し指条件における QWERTY キーボードの HMPW は約 20 cm/word であり, Markssen ら [2] が調査した空中タップにより操作される QWERTY キーボードの HMPW は約 40 cm/Word であった. これは, 我々の QWERTY キーボードの大きさが 42.5 cm × 12.25 cm であるのに対して, Markssen らの QWERTY キーボードの大きさが 50.0 cm × 25.0 cm と大きいことが一因だと考えられる. Markssen らの調査における QWERTY キーボードの HMPW は他手法に比べて最も低いため, 我々の提案手法における HMPW が概ね 20 cm/word を下回っていることは手の移動量が極めて小さいことを示唆している.

また, 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. これは, 人差し指条件における提案キーボードでは, 下段のキーおよびスペースキーをタップするために奥方向の動作が必要であるのに対して, 2本指条件における提案キーボードでは, 親指を用いた押下操作にて下段のキーおよびスペースキーをタップできることが一因だと考えられる.

## 7. 今後の予定

実験結果より, 提案キーボードの入力性能が QWERTY キーボードの入力性能に比べて低いことが分かった. しかし, 実験参加者の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. そこで, 今後は実験参加者に提案キーボードを長期間継続して使ってもらい, 使い慣れた状態の入力性能を調査する.

また, 同様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もあった.」, 「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, 複数の指による文字入力が困難であることが分かった. そこで, 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. これにより, 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, 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, 主観評価に悪影響が生じていたことが分かった. よって, 提案手法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.

## 8. おわりに

本稿では, 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. 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速度が低い, HMPW が小さいことが分かった. なお, 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 が最も小さかった. また, 2本指条件は, 人差し指条件に比べて入力速度が低く, 主観評価が低いということが分かった.

今後は, 提案キーボードに慣れてもらう長期的な実験, 機械学習による誤タップの調査, および主観評価に悪影響を及ぼさないキー配置を行う.

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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. ACM.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Sibio 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. ACM.
- [7] 大西未来, 渡辺大地. Leap Motion を使用した文字入力手法の提案. 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.
- [8] 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. ACM.
- [9] 伊織福伸, 浩然謝, 一乗宮田. 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.
- [10] 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.
- [11] 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. ACM.
- [12] 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. ACM.
- [13] Myroslav Bachynskyi, Gregorio Palmas, Antti Oulasvirta, and Tino Weinkauff. 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.
- [14] 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.
- [15] 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. ACM.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] John. Brooke. SUS:A Quick and Dirty Usability Scale. *Usability Evaluation in Industry*, pp. 189–194, 1996.
- [20] 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.