

スマートフォンを用いた AR 環境における 片手用空中キーボードの性能調査

佐藤 玲生^{1,a)} 小西 智樹² 志築 文太郎³

概要: 我々は、スマートフォンを用いた AR 環境用の低オクルージョンな片手用空中仮想キーボード（以降、空中仮想キーボード）、親指をトリガとした空中における文字入力手法（以降、ThumbTrigger 手法）およびデバイスの画面タッチを用いた文字入力手法（以降、ScreenTouch 手法）を実装した。また、本研究では、スマートフォンを用いた AR 環境におけるこれらのキーボードおよび文字入力手法の性能調査を目的とした評価実験を行った。その結果、ScreenTouch 手法の文字入力速度は、キーボードサイズが大きい条件において 16.51WPM、キーボードサイズの小さい条件において 11.29WPM であった。これらの結果は、ThumbTrigger 手法（キーボードサイズ大：5.56WPM、キーボードサイズ小：4.34WPM）と比べて、有意に高かった。また、エラー率、ユーザビリティおよび腕の疲労度においても ScreenTouch 手法は、有意に性能が高いことが示された。これらの実験結果を踏まえ、空中仮想キーボードのレイアウトおよび ThumbTrigger 手法のデザインを改良することにより、性能が向上する可能性がある。

1. はじめに

スマートフォンなどのスレートデバイスを用いて構築される拡張現実環境（以降、スレート AR 環境）において、文字入力が高速に行えれば好都合である。しかし、スレート AR 環境における文字入力手法の性能調査は現在までに行われていない。

そこで我々は、性能調査のために、スレートデバイスを片手把持した状態にて入力可能な空中仮想キーボードおよびそれを用いた 2 つの文字入力手法（ThumbTrigger 手法および ScreenTouch 手法）を実装した。空中仮想キーボードは、低いオクルージョンを実現するために、キーに対応するアルファベットののみが表示される。ThumbTrigger 手法において、ユーザは、スレートデバイスの背後に手を配置し、入力したいキーに人差し指を重ねた状態にて親指をトリガすることにより入力を行う。また、ScreenTouch 手法において、ユーザは、スレートデバイスの画面をタッチすることにより、入力を行う。

これらのキーボードおよび文字入力手法を用いて、性能評価するための実験を行った。実験では、参加者は、スマートフォンを用いた空中キーボードのサイズ 2 条件 × 文字入力手法 2 条件の計 4 条件において文字入力タスクを

行った。本稿では、その実験結果を示す。

2. 関連研究

本研究は、スレート AR 環境において、空中仮想キーボードおよび文字入力手法の性能を調査することを目的とする。そのため、本節では、スレートデバイスを用いた AR アプリケーション、ヘッドマウントディスプレイ装着時の AR 環境における文字入力およびスレートデバイスにおける低オクルージョンなキーボードを用いた文字入力に関する研究を述べ、本研究を位置付ける。

2.1 スレートデバイスを用いた AR アプリケーション

Rajaram ら [10] は、紙をインタラクションの中核に置き、科学および数学などの STEM 教育を対象として、ユーザが AR 教育体験を作成するために設計された AR オーサリングシステムである Paper Trail を実装した。弓部ら [16] は、電柱に装架された通信設備の巡視点検教育のための AR システムをタブレット端末に実装した。

Ye ら [13] は、実環境におけるユーザの近接的な全身を用いた身振りによるインタラクションを三人称視点にてプロトタイピングし、プロトタイピングされたインタラクションを一人称視点および三人称視点の両方から検証するためのスマートフォン用 AR ツール ProGesAR を実装した。また、Wang ら [12] は、点群を用いた迅速なデザインの反復、キャプチャおよび編集を可能にする AR 環境デザイン

¹ 筑波大学 情報科学類

² 筑波大学 情報理工学位プログラム

³ 筑波大学 システム情報系

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

のための新しいタブレット端末ベースのアプリケーション PointShopAR を実装した。

本研究は、これらのスレート AR 環境において、文字入力を行う際の空中仮想キーボードおよび文字入力手法の性能を調査する。

2.2 ヘッドマウントディスプレイ装着時の AR 環境における文字入力

Kern ら [7] は、仮想現実 (VR) 用およびビデオシーヌルー型 AR 用ヘッドマウントディスプレイ (以降、HMD) の 2 条件にて、コントローラを用いた 2 つの両手用文字入力手法を評価した。また、Liang ら [8] は 2 つの慣性計測装置を内蔵したリングを用いて、人差し指にマッピングした小型のキーボードをスワイプすることにより文字入力を行う DRG-KeyBoard を実装した。しかし、これらの研究は、HMD を装着した環境においてのみ調査しており、かつ両手あるいは外部デバイスを用いることを前提としている。

本研究は、HMD ではなく、ユーザがスレートデバイスのみを片手持持した状態における AR 環境を想定する。

2.3 スレートデバイスにおける狭い画面を考慮した文字入力

Zhu ら [15] は、スマートフォンの画面領域の占有率を 0% にした Invisible Keyboard を実装した。Invisible Keyboard を用いた文字入力の速度は 3 日間の練習ののち 37.9WPM を記録した。

Wenzhe ら [3] は、ユーザが片手持持したスマートフォンの背面にて同じ手の人差し指を用いてワードジェスチャタイピング可能な BackSwipe を実装した。BackSwipe は特に、ユーザが片手持持した状態にてコマンドおよび短いテキストを入力する際に有用であることが示された。しかし、BackSwipe はスマートフォンの背面を入力に用いるため、AR のために用いられるカメラおよびセンサに干渉する可能性がある。

また、Higuchi ら [6] は、スレートデバイスの小さな画面において、タイピングの操作性を向上させるための AR タイピングインタフェースを実装した。このインタフェースは、デバイスの背面カメラを用いてユーザの手を認識し、AR 技術によって画面上に配置された仮想キーボードに指を重ねることにより、広い空間にて衛生的にタイピングを可能にする。この AR タイピングインタフェースを用いた文字入力タスクでは、タイピング回数を重ねた場合、平均してタイピング時間が短縮された。しかし、手の位置を動かしながらのタイピング動作の認識は未達成かつユーザが変わると認識精度が低下してしまう。

これらの研究は、メールおよびチャットなどの通常のデバイス利用のみを想定している。本研究は、通常のデバイス利用ではなく、スレート AR 環境を想定し、AR 空間上

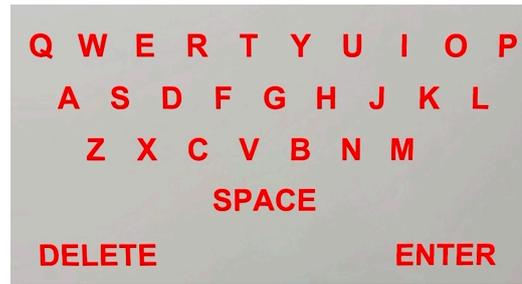


図 1 空中仮想キーボード。

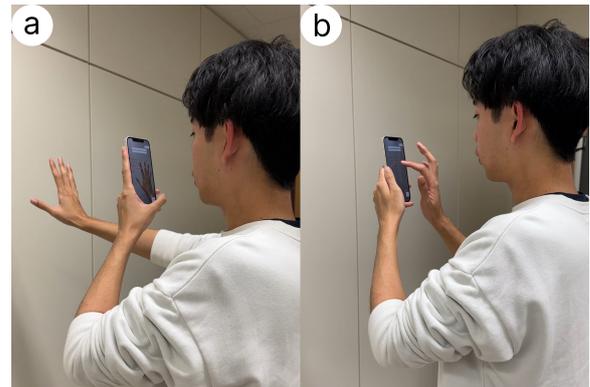


図 2 2 つの文字入力手法を用いているユーザ。a) ThumbTrigger 手法、b) ScreenTouch 手法

に実装した空中仮想キーボードを用いた文字入力手法の性能の調査を目的とする。

3. 実装

本節では、空中仮想キーボードデザイン、2 つの文字入力手法の実装および入力方法を述べる。

3.1 片手用空中仮想キーボード

図 1 に示すように、空中仮想キーボードは、AR 空間に配置され、かつキーに対応するアルファベットののみが表示される。このレイアウトは、John ら [4] のキーボードレイアウトを参考にしたものである。この空中仮想キーボードは、参考にしたレイアウトと同様に画面占有率が低い。また、キーに対応するアルファベットが表示されているため、QWERTY キーボードに慣れていない人にとって入力がより容易なものになっている。

3.2 ThumbTrigger 手法および ScreenTouch 手法

ThumbTrigger 手法および ScreenTouch 手法を用いる様子を図 2a および図 2b に示す。

まず、ThumbTrigger 手法において、ユーザが、図 2a のように、スレートデバイスの背後の空間に片手を配置すると、カメラに映った手全体がスレートデバイスの背面カメラを通してリアルタイムにトラッキングされる。

図 3a のように、ユーザは AR 空間上に表示されている空中仮想キーボードの入力したいキーに人差し指を重ねた

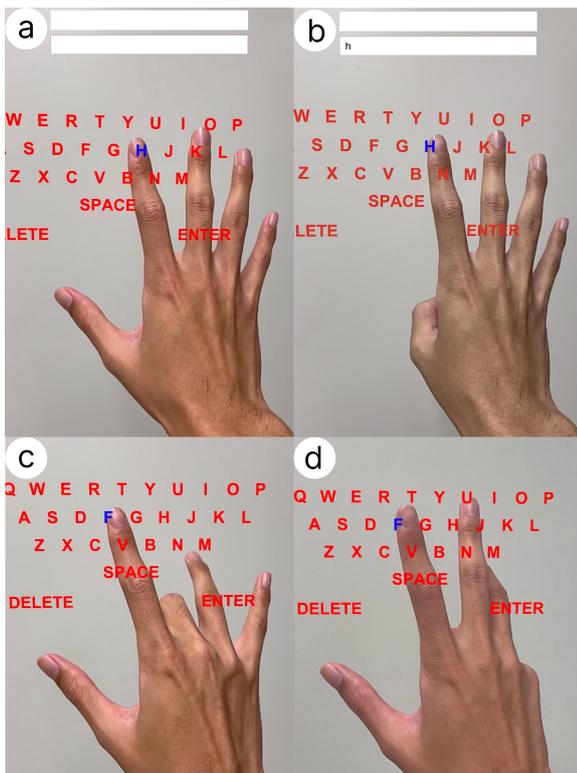


図 3 ThumbTrigger 手法を用いた文字入力. a) ユーザは、入力したいキーに人差し指を重ねる。そのとき、キーが青くハイライトされる。b) 親指を折り曲げる。c) 中指を折り曲げるとスペースが入力される。d) 小指を折り曲げると文字が削除される。

状態にて、親指を折り曲げるトリガ動作を行うことにより文字入力を行う (図 3b)。このとき、人差し指が重なっているキーが青色にハイライトされることにより、入力したいキーにきちんと人差し指が重なっているかどうかをすぐに確認できる。

親指を折り曲げるジェスチャは、トラッキングされた親指の先端および第 2 関節に配置されたオブジェクトの奥行き方向の差が閾値を下回るにより検出される。さらに、中指もしくは小指を折り曲げるジェスチャによって、スペース入力および削除を行う機能を追加した (図 3c, d)。この機能は、Yi [14] らが、実験前インタビューを行った際に参加者がスペースキーを入力するのが面倒であるという意見から、入力に用いない指にジェスチャ入力機能を結びつけたことを参考にしたものである。この機能により、スペースキーおよび削除キーを押す必要がなくなり、文字入力の速度が向上する可能性がある。中指および小指を折り曲げるジェスチャは、各指の先端および第 4 関節に配置されたオブジェクトの垂直方向の差が、閾値を下回った際に検出される。

また、ScreenTouch 手法において、ユーザは、図 2b のように、画面タッチによって文字入力を行う。画面タッチは、スレートデバイス用の文字入力手法に多く採用されている。

4. 評価実験

2つのキーボードサイズおよび2つの文字入力手法 (ThumbTrigger 手法および ScreenTouch 手法) を用いて文字入力タスクを行う。文字入力タスクによって得られたデータから、文字入力速度、エラー率を計測および比較することによりキーボードサイズおよび文字入力手法の性能を評価する。また、System Usability Scale (以降、SUS) [2]、NASA-Task Load Index (以降、NASA-TLX) [5] のアンケートから得られたスコアの比較によって、ユーザビリティを評価する。さらに、腕の疲労度、タスク条件の順位付けおよび自由記述式のアンケートへの回答を行った。

4.1 実験参加者

実験参加者は、研究室内の大学生および大学院生 8 名 (男性 8 名、平均年齢 23 歳、全員右利き) であった。スレートデバイスを用いた AR の使用頻度、HMD を用いた AR の使用頻度および QWERTY キーボードの使用頻度について、5 段階評価 (5: 毎日使う, 1: 全く使わない) にて集計した。その結果、スレートデバイスを用いた AR の使用頻度について、5 名が 2, 2 名が 1, 1 名が 3 と回答し、HMD を用いた AR の使用頻度について、4 名が 2, その他の 1 名ずつが 1, 3, 4 および 5 と回答した。また、参加者全員が、QWERTY キーボードを毎日使うと回答した。

4.2 実験デバイスおよび実験環境

参加者は、背景を白い壁とした十分広い空間において、立った状態にて文字入力タスクを行った。文字入力タスクには、実験用アプリケーションがインストールされた iPhone12 を用いた。スマートフォンの画面サイズは 6.1 インチであった。

4.3 実験手順

キーボードサイズ 2 条件 (サイズ大およびサイズ小: サイズ大の 60% のサイズ) × 文字入力手法 2 条件 (ThumbTrigger 手法および ScreenTouch 手法) の計 4 条件において、文字入力タスクを行った。各条件は、練習セッションおよび本番セッションに分かれており、さらに本番セッションは 2 つの試行から構成される。

まず、参加者は、各条件の開始時に、用いるキーボードサイズおよび文字入力手法の説明を受けた。その後、練習セッションを開始した。練習セッションでは、参加者は、最大 5 分間条件に沿ったキーボードおよび文字入力手法を用いて動作を確認後、最低 2 個の文章を転写した。このとき、参加者が、練習を十分行っていると判断した場合に、練習セッションを終了し、休憩を取ることができた。1 分間の休憩後、本番セッションでは、各試行ごとに 5 つの文章を転写し、計 10 個の文章を転写した。各セッション間には 3

分間の休憩を設けた。

参加者は、計 40 個の文章 (4 条件 × 2 試行 × 5 個の文章) を入力した。このとき、参加者は、なるべく高速かつ正確に入力するよう求められた。また、入力エラーを修正するか、あるいは未修正のままにしておくか自由に選択できることを伝えられた。文字入力タスクに使用したフレーズセットは、MacKenzie and Soukoreff のフレーズセット [9] である。このフレーズセットを用いた理由は、QWERTY キーボードを用いた文字入力タスクにて頻繁に用いられているためである。

文章は、MacKenzie and Soukoreff のフレーズセットの 500 個の文章の中からランダムに表示され、かつ 1 つの条件を通して、重複しないように設計された。本番セッション終了後、参加者は、その条件に関して腕の疲労度、SUS および NASA-TLX のアンケートへ回答した。すべての条件にて、文字入力タスクを終えた後、参加者は、実験後アンケートに回答した。

4.4 実験結果

実験によって得られた各条件における文字入力速度、エラー率の結果 SUS、および NASA-TLX のスコアを示し、統計解析の結果を示す。また、腕の疲労度および 4 条件の順位付けに関するアンケート結果を示す。ここで、各条件名を以下の 4 つにする。

- キーボードサイズ大 × ThumbTrigger 手法 (以降、BT 条件)
- キーボードサイズ小 × ThumbTrigger 手法 (以降、ST 条件)
- キーボードサイズ大 × ScreenTouch 手法 (以降、BS 条件)
- キーボードサイズ小 × ScreenTouch 手法 (以降、SS 条件)

なお、統計解析において、有意水準を 0.05 とした。

4.4.1 WPM

文字入力速度は Words Per Minute (以降、WPM) [1] として計測された。条件ごとの全参加者の WPM の平均値を図 4 に示す。BT 条件の WPM の平均値は 5.56WPM (SD=0.70WPM)、ST 条件は 4.34WPM (SD=1.33WPM)、BS 条件は 16.51WPM (SD = 2.41WPM) および SS 条件は 11.29WPM (SD = 2.58WPM) であった。

まず、2 つの要因 (キーボードサイズおよび文字入力手法) がそれぞれ入力速度に影響を及ぼすかどうかを調査するために、BT 条件&ST 条件の組み合わせ (以降、ThumbTrigger 手法条件) および BS 条件&SS 条件の組み合わせ (以降、ScreenTouch 手法条件) BT 条件&BS 条件の組み合わせ (以降、キーボードサイズ大条件) および ST 条件&SS 条件の組み合わせ (以降、キーボードサイズ小条件)、に対して、ウィルコクソンの符号付順位和検定を行ったとこ

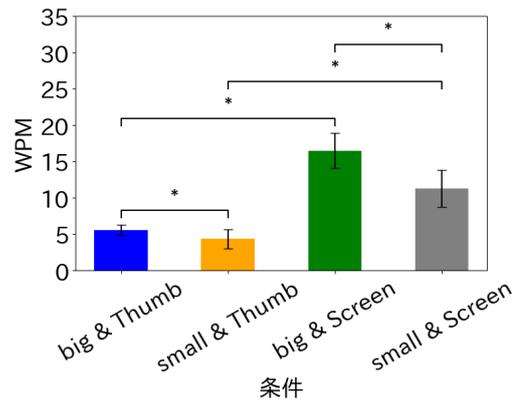


図 4 各条件における WPM の平均値。

ろ、どちらにも有意差が見られた (キーボードサイズ間: $p = 3.86 \times 10^{-6}$, 文字入力手法間: $p = 7.95 \times 10^{-7}$).

次に、それぞれの 2 つの要因の相互作用が入力速度に影響を及ぼすかどうかを調査するために、各条件の組み合わせに対して、正規性のある組み合わせに対応のある t 検定、正規性のない組み合わせにウィルコクソンの符号付順位和検定を行ったところ、BT 条件および ST 条件の間に有意差があった ($p = 0.0036 < 0.05$). 同様に、BS 条件および SS 条件間 ($p = 4.28 \times 10^{-7} < 0.05$), BT 条件および BS 条件間 ($p = 3.05 \times 10^{-5} < 0.05$), ST 条件および SS 条件間 ($p = 1.80 \times 10^{-6} < 0.05$) に有意差があった。

つまり、キーボードサイズが小さくなると有意に WPM が低下すること、および ScreenTouch 手法と比べて ThumbTrigger 手法はキーボードサイズに関わらず有意に WPM が低いことが示された。一方、ThumbTrigger 手法は、ScreenTouch 手法に比べると、キーボードサイズが小さくなったときの WPM の低下がわずかであることがわかる。

4.4.2 エラー率

エラー率はトータルエラー率 (以降、TER) [1] として計測された。条件ごとの全参加者の TER の平均値を図 5 に示す。BT 条件の TER の平均値は 18.51% (SD = 5.05%), ST 条件は 28.67% (SD = 10.10%), BS 条件は 5.00% (SD = 3.17%) および SS 条件は 10.45% (SD = 3.77%) であった。

TER についても、まず、2 つの要因 (キーボードサイズおよび文字入力手法) がそれぞれ入力速度に影響を及ぼすかどうかを調査するために、ThumbTrigger 手法条件および ScreenTouch 手法条件、キーボードサイズ大条件およびキーボードサイズ小条件に対して、ウィルコクソンの符号付順位和検定を行った。その結果、どちらにも有意差が見られた (キーボードサイズ間: $p = 1.47 \times 10^{-4} < 0.05$, 文字入力手法間: $p = 1.40 \times 10^{-6} < 0.05$).

次に、それぞれの 2 つの要因の相互作用が TER に影響を及ぼすかどうかを調査するために、4 条件全てに対してフリードマン検定を行ったところ、有意差が見られた ($p = 3.11 \times 10^{-7} < 0.05$). そのため、ボンフェローニ補正

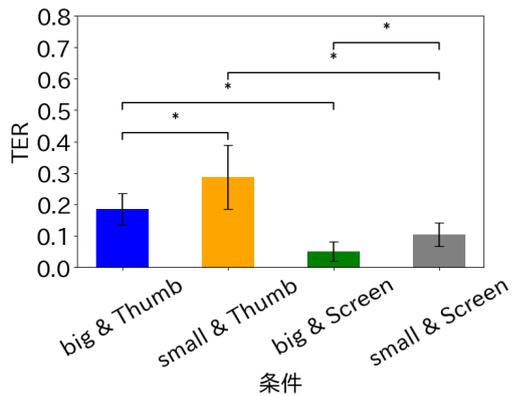


図 5 条件におけるトータルエラー率の平均値。

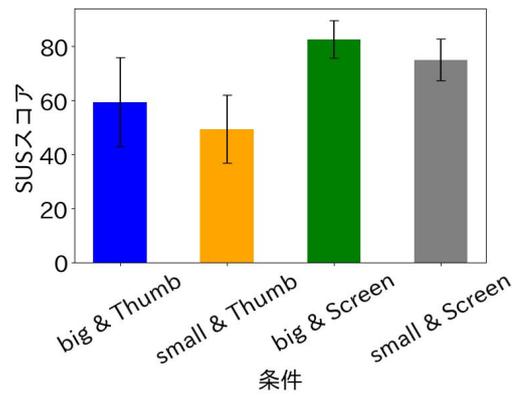


図 6 各条件における SUS の平均値。

による多重比較を行った。このとき、ウィルコクソンの符号付順位和検定を用いた。その結果、すべての条件の組み合わせにて有意差が見られた (BT 条件および ST 条件の間: $p = 0.0085 < 0.05$, BS 条件および SS 条件間: $p = 0.0037 < 0.05$ BT 条件および BS 条件間: $p = 1.22 \times 10^{-4} < 0.05$, および ST 条件および SS 条件間: $p = 8.54 \times 10^{-4} < 0.05$)。

つまり、TER に関して、キーボードサイズが小さくなると有意に TER が増加すること、および ScreenTouch 手法と比べて ThumbTrigger 手法はキーボードサイズに関わらず有意に TER が高いことが示された。

4.4.3 ユーザビリティ

各条件のユーザビリティを評価するための SUS および NASA-TLX のアンケート結果を図 6 および図 7 に示す。SUS に関して、各条件のスコア平均値はそれぞれ、BT 条件は 59.38 (SD = 16.52), ST 条件は 49.38 (SD = 12.52), BS 条件は 82.50 (SD = 6.94) および SS 条件は 75.00 (SD = 7.68) であった。

まず、ThumbTrigger 手法条件および ScreenTouch 手法条件、キーボードサイズ大条件およびキーボードサイズ小条件に対して、ウィルコクソンの符号付順位和検定を行ったところ、どちらにも有意差が見られた (キーボードサイズ間: $p = 0.0040 < 0.05$, 文字入力手法間: $p = 7.93 \times 10^{-4} < 0.05$)。

次に、それぞれの 2 つの要因の相互作用が SUS スコアに影響を及ぼすかどうかを調査するために、フリードマン検定を行ったところ、有意差が見られた ($p = 6.1 \times 10^{-4} < 0.05$)。しかし、キーボードサイズおよび文字入力手法の相互作用に関する条件の組み合わせに対して有意差は見られなかった (BT 条件および ST 条件間: $p = 0.070 > 0.05$, BS 条件および SS 条件間: $p = 0.438 > 0.05$, BT 条件および BS 条件間: $p = 0.063 > 0.05$, および ST 条件および SS 条件間: $p = 0.069 > 0.05$)。

よって、SUS スコアに関して、2 つの要因の相互作用における有意差はなかったが、ThumbTrigger 手法は、Screen-

Touch 手法と比べて有意にスコアが低いことがわかった。これは、ThumbTrigger 手法におけるハンドトラッキングが不安定であることから、参加者が入力するのに苦労したためと考えられる。また、キーボードサイズに関して、小さい場合は大きい場合と比べて有意にスコアが低いことがわかった。これは、キーのサイズが小さくなるとタッチの当たり判定も小さくなるため、入力したいキーを定めて押しても、押したことになっていないあるいは異なるキーを押してしまうためと考えられる。

また、NASA-TLX に関して、各条件のスコア平均値はそれぞれ、BT 条件は 65.58 (SD = 17.02), ST 条件は 77.13 (SD = 11.01), BS 条件は 53.04 (SD = 16.70) および SS 条件は 57.92 (SD = 6.97) であった。

各条件の NASA-TLX スコアについて、正規性および等分散性が認められたため、2 元反復測定配置分散分析を行ったところ、キーボードサイズ、文字入力手法およびそれらの相互作用について、それぞれ有意差は見られなかった (キーボードサイズ間: $p = 0.82 > 0.05$, 文字入力手法間: $p = 0.52 > 0.05$, 2 要因の相互作用: $p = 0.067 > 0.05$)。

よって、NASA-TLX に関して、各条件間にて有意差は見られなかったが、ThumbTrigger 手法を含む条件、特に、ST 条件が最も作業負荷が高いことがわかる。これは、腕の疲労が身体的要求に及ぼす影響が大きかったためと考えられる。また、キーボードサイズが小さい条件に関しても作業負荷が高くなっている。これは、小さなキーを押す際の意図しない未入力および入力がフラストレーションの項目に大きな影響を及ぼしたためと考えられる。

4.4.4 アンケート結果

各条件の主観評価として、参加者に、各条件の腕の疲労度の 5 段階評価 (5: 非常に疲れている, 1: 全く疲れていない) を行ってもらった。また、4 つの条件をそれぞれ 1 位から 4 位に順位付けしてもらった。その結果を図 8 および図 9 に示す。

各条件の疲労度の平均値は、BT 条件は 4.00 (SD = 0.87), ST 条件は 4.63 (SD = 0.70), BS 条件は 2.625 (SD = 1.11)

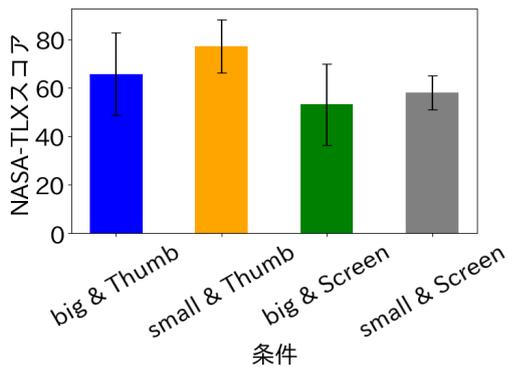


図 7 各条件における NASA-TLX の平均値。

および SS 条件は 2.625 (SD = 0.70) であった。腕の疲労度についても、まず、ThumbTrigger 手法条件および ScreenTouch 手法条件、キーボードサイズ大条件およびキーボードサイズ小条件に対して、ウィルコクソンの符号付順位和検定を行った。その結果、文字入力手法間にのみ有意差が見られた (キーボードサイズ間: $p = 0.19 > 0.05$, 文字入力手法間: $p = 8.47 \times 10^{-4} < 0.05$)。これは、ThumbTrigger 手法が、ScreenTouch 手法と比べて腕の疲労度が有意に高いことを示している。また、ScreenTouch 手法を用いる場合、キーボードサイズは腕の疲労度に有意に影響を及ぼさないことがわかった。これは、ScreenTouch 手法の 1 つのキーをタッチする動作自体の疲労度が非常に小さいためと考えられる。

次に、フリードマン検定を行ったところ、有意差が見られた ($p = 6.1 \times 10^{-4} < 0.05$)。しかし、キーボードサイズおよび文字入力手法の相互作用に関する条件の組み合わせに対して有意差は見られなかった (BT 条件および ST 条件間: $p = 0.52 > 0.05$, BS 条件および SS 条件間: $p = 1.00 > 0.05$, BT 条件および BS 条件間: $p = 0.063 > 0.05$, および ST 条件および SS 条件間: $p = 0.065 > 0.05$)。

よって、有意差は見られなかったが、ThumbTrigger 手法について、キーボードサイズが小さい場合、大きい場合と比べて疲労度が高くなっている。これは、WPM の結果から、文字を入力する時間が長くなるにつれてより疲労が溜まるためであると考えられる。

条件の順位について、1 位は BS 条件、2 位は SS 条件、3 位は BT 条件および 4 位は ST 条件であった。また、2 名の参加者が、BT 条件を 2 位に選んだ。各参加者が順位を選んだ理由として、「疲労が溜まりにくい順」、「タッチスクリーン上の入力に慣れている、かつ ThumbTrigger 手法において手のトラッキングの誤認識が多かった」などとコメントした。一方、BT 条件を 2 位に選んだ参加者 2 名ともが「入力のしやすかった順番にした」とコメントした。このことから、参加者は、全体的に入力しやすいことを理由にキーボードサイズが大きい方を好むことがわかる。また、ThumbTrigger 手法の使いやすさに関して、大きな個

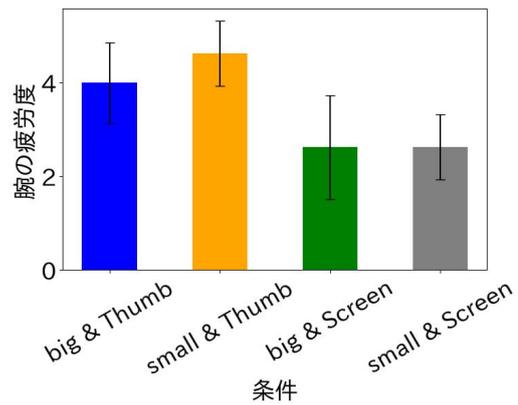


図 8 各条件における腕の疲労度 (5 段階評価) の平均値。

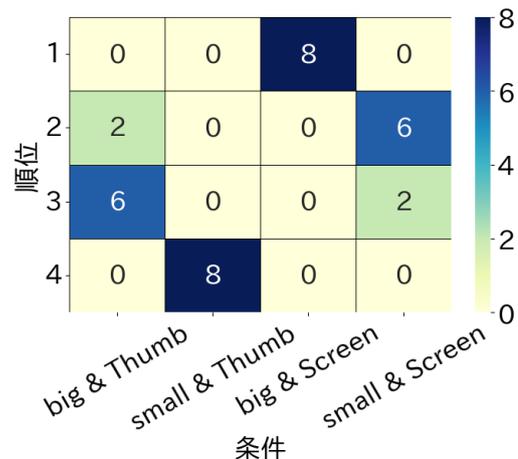


図 9 実験参加者による各条件の順位。色が濃いほど多くの参加者がその順位を選んだことを表す。また、数字はその順位を選んだ参加者の数を表す。

人差があることが考えられる。

5. 議論

本節では、実験結果および参加者からのアンケートの回答および空中仮想キーボード、ThumbTrigger 手法の改良についての議論を述べる。

5.1 空中仮想キーボードのデザイン

実験後のアンケートにて、キーボードサイズの画面占有率に関して感じたことを回答してもらったところ、「キーボードサイズが大きい場合、少し窮屈に感じたので、今の大きさの 90%程度がいいかもしれない」、「キーボードサイズが大きい場合、画面からはみ出してしまい、見えにくい時があった」などのコメントがあった。そのため、大きいキーボードサイズ条件において、少し小さくしたサイズを採用することを考えている。

一方、Shenら [11] は、HMD を装着した AR 環境において、幅およびアスペクト比を調整可能な空中仮想キーボードである、AdaptiKeyboard を用いてユーザ実験を行った結果、個人がそれぞれ最適なキーボードの幅およびアスペ

クト比をデザインしたことを示している。よって、スレート AR 環境においても参加者に最適化されたキーボードレイアウトを用いて文字入力を行うことにより、性能が向上する可能性がある。

また、アンケートにてキーボードデザインの改良案について尋ねると、4名の参加者が、「物理 QWERTY キーボードのように、デリートキーの位置が上側にあった方が良い」と回答した。今回の評価実験では、特に誤入力を防ぐために、デリートキーおよびエンターキーを通常のキーの下側に配置した。しかし、実験前アンケートでは、全ての参加者が QWERTY キーボードに慣れていると回答したためこのようなコメントが得られたと考える。

5.2 ThumbTrigger 手法

本節では、実験を行ったことによって得られた ThumbTrigger 手法の課題および改善案を示す。

5.2.1 練習時間

今回実施した評価実験では、最大 5 分の練習時間を設けた。参加者の多くが、初めて ThumbTrigger 手法を用いる条件にて、5 分間練習を行った。また、数人の参加者が ThumbTrigger 手法について、慣れると入力しやすくなるかもしれないとコメントした。これらのことから ThumbTrigger 手法の文字入力の性能は、より多くの練習時間を設けるあるいは複数日数にわたり練習を行うことにより、さらに向上すると考えられる。ThumbTrigger 手法に習熟した著者による文字入力速度は BT 条件にて 8.20WPM、ST 条件にて 9.70WPM であった。このことから、ThumbTrigger 手法の習熟がより高速な文字入力につながることを示唆する。

5.2.2 参加者ごとの視野角設定

4.4.4 節にて述べたように、ThumbTrigger 手法の使いやすさに個人差がある原因として、ハンドトラッキングする際に手全体を画面中央に配置する姿勢が、参加者の身体差により、難しい場合があることが考えられる。さらに、手全体を無理やり視野角内に写そうとした結果、スマートフォンおよび目間の距離が短くなり、より疲れる原因になることが、参加者のコメントから示された。体の疲労は、入力する腕の姿勢を維持することを妨げてしまい、その結果再び手が画面内から外れてしまい、正確なハンドトラッキングを行うことが難しくなってしまう。

よって、スマートフォンのカメラの視野角を参加者ごとに調整することを考える。これにより、参加者は、安定した姿勢にて文字入力を行うことができる可能性がある。

5.2.3 疲労しない姿勢の考慮

ある参加者から、「手の姿勢は基本曲がっているのが通常なため、ThumbTrigger 手法の標準姿勢を、手を伸ばしている状態ではなく、指を曲げている状態として、その状態から指を伸ばす動作をトリガとすることにより、腕の疲労

が少なくなる。またそれにより手全体の表示領域が小さくなり、画面内に収めやすくなるので、手全体を視野角内に収めることがより楽になる」というコメントが得られた。また、別の参加者の「腕および指を伸ばすことなく入力できれば楽になる」というコメントおよび、別の参加者から、「腕を伸ばした状態だけが疲労の原因ではなく、そこからさらに手首を曲げ、さらに手をしっかり広げることがかなり疲れる」というコメントが得られた。

ThumbTrigger 手法において、手の基本姿勢を自然な姿勢とすることにより、疲労度の大きな低下が期待できる一方、指同士のオクルージョンにより、ハンドトラッキングの精度が低下してしまう可能性がある。そこで、腕を回転させ、手のひらを手前に向けた姿勢を基本姿勢とすることにより、指同士のオクルージョンが解消され、より自然な姿勢にてハンドトラッキングの精度を維持したまま入力を行うことができるため、疲労が軽減されると考える。

6. 今後の展望

本論文における実験参加者は、研究室内から募集し、全員が男性かつ右利きであった。さらに、参加者人数が 8 人と少なかつたため、参加者数の増加および様々な属性の参加者を追加することによって、より正確な実験結果が得られると考える。

今後、スレート AR 環境において、空中仮想ワードジェスチャキーボードを実装し、文字入力の性能を調査することにより、より良い性能結果が得られると考える。現在の ThumbTrigger 手法を用いる際、ユーザは 1 文字入力するために、毎回親指を折り曲げることににより入力する必要があるため、この動作は、腕および指の疲労に大きく影響を及ぼしている。しかし、ジェスチャキーボードを用いることにより、ユーザは、1 つの単語を入力するために一度だけ親指を折り曲げ、入力したい単語のジェスチャを描くことにより、入力することができる。これにより、疲労度を軽減できると考える。

また、本論文では、文字入力タスクのみの実験を行ったが、実際のスレート AR 環境を想定したユーザ実験を実施することが考えられる。今回の実験では、我々は、空中仮想キーボードおよび文字入力手法の性能を調査したが、今後、実際のスレートデバイス用 AR アプリケーションを実装する。例えば、ユーザは、そのアプリケーションを用いてスレートデバイスをカメラ越しに写る AR オブジェクトに文字列を付与するために文字入力を行う。この時用いるキーボードおよび文字入力手法を性能面だけでなく、スレート AR 環境により適しているかどうかをユーザが主観的に評価することによって調査する。

7. まとめ

本研究は、スレート AR 環境において、空中仮想キーボー

ドおよび文字入力手法の性能を調査することを目的とする。そのために、スマートフォンに実装した空中仮想キーボード、ThumbTrigger 手法および ScreenTouch 手法を用いて、評価実験を行った。実験の結果として、ThumbTrigger 手法は ScreenTouch 手法と比べて、文字入力速度、エラー率、ユーザビリティ、腕の疲労度について有意に性能が低いことがわかった。また、キーボードサイズが大きい場合は、小さい場合と比べて有意に性能が高いことも示された。実験結果および自由記述式アンケートの回答から、空中仮想キーボードおよび ThumbTrigger 手法のデザイン改良についての議論を述べた。今後の展望として、ジェスチャキーボードの実装および実際のスレートデバイス用 AR アプリケーションを用いて、ユーザ実験を行うことが考えられる。

参考文献

- [1] Arif, A. S. and Stuerzlinger, W.: Analysis of text entry performance metrics, *2009 IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity (TIC-STH)*, pp. 100–105 (online), DOI: 10.1109/TIC-STH.2009.5444533 (2009).
- [2] Brooke, J.: SUS: A quick and dirty usability scale, *Usability Evaluation in Industry*, pp. 189–194 (1996).
- [3] Cui, W., Zhu, S., Li, Z., Xu, Z., Yang, X.-D., Ramakrishnan, I. and Bi, X.: BackSwipe: Back-of-device word-gesture interaction on smartphones, *In Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 196:1–196:12 (online), DOI: 10.1145/3411764.3445081 (2021).
- [4] Dudley, J. J., Vertanen, K. and Kristensson, P. O.: Fast and precise touch-based text entry for head-mounted augmented reality with variable occlusion, *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, Vol. 25, No. 6, pp. 30:1–30:40 (online), DOI: 10.1145/3232163 (2018).
- [5] Hart, S. G. and Staveland, L. E.: Development of NASA-TLX (task load index): results of empirical and theoretical research, *Advances in Psychology* (Hancock, P. A. and Meshkati, N., eds.), Vol. 52, North-Holland, pp. 139–183 (online), DOI: [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9) (1988).
- [6] Higuchi, M. and Komuro, T.: Multi-Finger AR typing interface for mobile devices using high-speed hand motion recognition, *In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '15, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1235–1240 (online), DOI: 10.1145/2702613.2732741 (2015).
- [7] Kern, F., Niebling, F. and Latoschik, M. E.: Text input for non-stationary XR workspaces: Investigating tap and word-gesture keyboards in virtual and augmented reality, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 29, No. 5, pp. 2658–2669 (online), DOI: 10.1109/TVCG.2023.3247098 (2023).
- [8] Liang, C., Hsia, C., Yu, C., Yan, Y., Wang, Y. and Shi, Y.: DRG-KeyBoard: Enabling subtle gesture typing on the fingertip with dual IMU rings, *In Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 6, No. 4, pp. 170:1–170:30 (online), DOI: 10.1145/3569463 (2023).
- [9] MacKenzie, I. S. and Soukoreff, R. W.: Phrase Sets for Evaluating Text Entry Techniques, *CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '03, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 754–755 (online), DOI: 10.1145/765891.765971 (2003).
- [10] Rajaram, S. and Nebeling, M.: Paper Trail: An immersive authoring system for augmented reality instructional experiences, *In Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '22, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 382:1–382:16 (online), DOI: 10.1145/3491102.3517486 (2022).
- [11] Shen, J., Hu, J., Dudley, J. J. and Kristensson, P.: Personalization of a mid-air gesture keyboard using multi-objective bayesian optimization, *2022 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, Los Alamitos, CA, USA, IEEE Computer Society, pp. 702–710 (online), DOI: 10.1109/ISMAR55827.2022.00088 (2022).
- [12] Wang, Z., Nguyen, C., Asente, P. and Dorsey, J.: PointShopAR: Supporting environmental design prototyping using point cloud in augmented reality, *In Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 34:1–34:15 (online), DOI: 10.1145/3544548.3580776 (2023).
- [13] Ye, H. and Fu, H.: ProGesAR: Mobile AR prototyping for proxemic and gestural interactions with real-world IoT enhanced spaces, *In Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '22, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 130:1–130:14 (online), DOI: 10.1145/3491102.3517689 (2022).
- [14] Yi, X., Liang, C., Chen, H., Song, J., Yu, C., Li, H. and Shi, Y.: From 2D to 3D: Facilitating single-finger mid-air typing on QWERTY keyboards with probabilistic touch modeling, *In Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 7, No. 1, pp. 38:1–38:25 (online), DOI: 10.1145/3580829 (2023).
- [15] Zhu, S., Luo, T., Bi, X. and Zhai, S.: Typing on an invisible keyboard, *In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 439:1–439:13 (online), DOI: 10.1145/3173574.3174013 (2018).
- [16] 弓部良樹, 瀬川 修, 山北 誠: モバイル AR を用いた屋外通信設備の巡視点検教育支援システムの検討, 情報処理学会研究報告, Vol. 2016-HCI-166, No. 10, pp. 1–8 (2016).