

2023年度

筑波大学情報学群情報科学類

卒業研究論文

題目

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

主専攻 ソフトウェアサイエンス主専攻

著者 佐藤 玲生

指導教員 志築 文太郎, 川口 一画

要 旨

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）、およびスレート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 環境における空中仮想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 16.51 WPM、キーボードサイズが小さい条件において 11.29 WPM であった。これらの結果は、ThumbTrigger 手法（キーボードサイズ大：5.56 WPM、キーボードサイズ小：4.34 WPM）と比べて、有意に高かった。また、エラー率、ユーザビリティ、作業負荷および腕の疲労感においても ScreenTouch 手法は、文字入力性能が有意に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 手法のデザイン改善による、文字入力性能向上の可能性を議論する。また、今後、サンプルの多様化およびジェスチャキーボードの実装により、スレート AR 環境における文字入力性能を調査する。また、実際のスレート AR 環境を想定したユーザ実験を行う。

目次

第1章	序論	1
1.1	目的およびアプローチ	1
1.2	貢献	1
1.3	本論文の構成	2
第2章	関連研究	3
2.1	スレートデバイスを用いた AR アプリケーション	3
2.2	ヘッドマウントディスプレイを用いた AR 環境における文字入力	4
2.3	スレートデバイスを用いた文字入力	4
第3章	実装	7
3.1	実装環境	7
3.2	空中仮想キーボード	7
3.2.1	キーボードレイアウト	7
3.2.2	キーボードサイズおよび配置	8
3.3	ThumbTrigger 手法	8
3.3.1	ハンドトラッキング	9
3.3.2	トラッキング精度	9
3.3.3	入力方法	10
3.4	ScreenTouch 手法	11
第4章	評価実験	15
4.1	参加者	15
4.2	実験装置および環境	15
4.3	条件	15
4.4	タスク	16
4.5	評価指標	16
4.6	実験手順	17
4.7	実験結果および考察	17
4.7.1	文字入力速度	17
4.7.2	エラー率	18
4.7.3	ユーザビリティ	19

4.7.4	作業負荷	20
4.7.5	腕の疲労感	21
4.7.6	各条件の順位	22
第 5 章	議論	24
5.1	空中仮想キーボードのデザイン	24
5.2	ThumbTrigger 手法の課題および改善案	24
5.2.1	練習時間	25
5.2.2	参加者ごとの視野角設定	25
5.2.3	疲労しない姿勢の考慮	25
第 6 章	今後の予定	27
6.1	実験参加者の多様化	27
6.2	空中仮想ワードジェスチャキーボードの実装	27
6.3	実際のスレート AR 環境を想定したユーザ実験の実施	27
第 7 章	結論	28
	謝辞	29
	業績リスト	30
	参考文献	31
付録 A	評価実験において用いたアンケート	35
A.1	実験前アンケート	36
A.2	タスク後アンケート	38
A.3	SUS アンケート	39
A.4	NASA-TLX アンケート	41
A.5	実験後アンケート	43

目次

3.1	空中仮想キーボード.	8
3.2	ハンドトラッキングによって指の先端および各関節に配置された球体オブジェクト.	9
3.3	ThumbTrigger手法を用いているユーザ.	10
3.4	$f_{c_{min}}$ を 1.0 としたときの 1€ フィルタをオブジェクトに適用した結果. . . .	12
3.5	$f_{c_{min}}$ を 0.1 としたときの 1€ フィルタをオブジェクトに適用した結果. . . .	12
3.6	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. このとき, キーが青くハイライトされる. b) 入力のために, 親指を折り曲げる様子. c) スペース入力のために中指を折り曲げる様子. d) 文字を削除するために小指を折り曲げる様子.	13
3.7	ScreenTouch手法を用いているユーザ.	14
4.1	各条件における WPM の平均値.	18
4.2	条件におけるトータルエラー率の平均値.	19
4.3	各条件における SUS の平均値.	20
4.4	各条件における NASA-TLX の平均値.	21
4.5	各条件における腕の疲労感 (5 段階評価) の平均値.	22
4.6	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.	23
5.1	ThumbTrigger手法の基本姿勢の改善. a) 現在の ThumbTrigger手法における手の姿勢. b) 手のひらを手前に向けた姿勢.	26
A.1	実験前アンケート-Part 1. 実験の説明を受けたのち, 参加者情報, AR および QWERTY キーボードの使用経験に関する質問に回答する.	36
A.2	実験前アンケート-Part 2.	37
A.3	各実験条件のタスク終了後にその条件に関する腕の疲労感に関する質問に回答する. また, 条件に対する感想を記述する.	38
A.4	SUS アンケート-Part 1. 条件のユーザビリティに関する質問に 5 段階尺度にて評価する.	39
A.5	SUS アンケート-Part 2.	40
A.6	NASA-TLX アンケート-Part 1. 6 つの項目に対する回答を行う.	41

A.7 NASA-TLX アンケート-Part 2. Part 1 に示した 6 つの項目のうち, ランダムに表示される 2 つの項目のどちらが重要な要因であるかを選択する. この選択を, 全通りに対して行う. 例として, 「作業負荷」および「フラストレーション」が表示された場合の画面を示す.	42
A.8 実験後アンケート-Part 1. すべての条件タスクが終了したのち, 4 つの条件の順位付けに関する質問および実験全体を通して得られた感想などを回答する.	43
A.9 実験後アンケート-Part 2.	44

第1章 序論

スマートフォンおよびタブレットデバイス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，システムからの要求あるいは文字列オブジェクトを追加することが想定されるため，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．本章では，本研究の目的およびアプローチを述べる．また，本研究の貢献および本論文の構成を述べる．

1.1 目的およびアプローチ

本研究の目的は，スレート AR 環境における，空中仮想キーボードおよび文字入力手法の性能調査である．そのため，我々は，スレートデバイスを片手持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において，低い画面占有率を実現するために，キーに対応するアルファベットのみが表示される．ユーザは，このキーボードを用いて，空中タップあるいは画面タッチにより文字を入力できる．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文字を入力する．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，文字を入力する．

実装した空中仮想キーボードおよび文字入力手法を用いて，文字入力の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．

1.2 貢献

本研究の貢献は以下の通りである．

- スマートフォンのみを用いて，スレート AR 環境における空中仮想キーボードおよび文字入力手法を実装した．
- スレート AR 環境における空中仮想キーボードおよび文字入力手法の性能調査を行った．

- 性能調査の結果, ScreenTouch 手法は, ThumbTrigger 手法よりも文字入力性能が高いことを示した. 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文字入力性能が高いことを示した.

1.3 本論文の構成

第1章では, 背景, 本研究の目的およびアプローチを示した. また, 本研究の貢献, および本論文の構成を示した. 第2章では, 本研究に関連のある研究を述べ, 本研究の位置付けを示す. 第3章では, スレート AR 環境における空中仮想キーボードおよび文字入力手法の実装, および入力方法を述べる. 第4章では, 空中仮想キーボードおよび文字入力手法の性能調査のための評価実験について, その内容および実験結果を述べる. 第5章では, 評価実験の結果に対して, 空中仮想キーボードおよび文字入力手法の改善に関する議論を示す. 第6章では, 本研究の今後の予定を述べる. 第7章では, 本研究の結論を述べる.

第2章 関連研究

本研究の目的は、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である。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（以降、HMD）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 [1] 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。Lee [2] は、AR モバイルゲームである、The Secret Investigation を実装し、学生の外国語学習に対する姿勢に対して、紙に印刷された問題解決型ゲームと比較および調査を行った。結果として、参加者は、両ゲームに対して、関心および満足度などに関する肯定的な姿勢を示した。一方、有用性の面では、紙に印刷されたゲームが、AR モバイルゲームと比べて、高く評価された。

弓部ら [3] 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。Li ら [4] は、都市の地下パイプラインネットワークのライフサイクル運用および管理支援のためのスレート AR に基づく可視化フレームワークを紹介した。Um ら [5] は、建物内の配管メンテナンス作業を支援するための低コストなスレート AR プロトタイプを実装した。これにより、ユーザは、3D 深度カメラを用いて配管の状態を詳細に確認し、スレートデバイスを通して可視化された仮想配管オブジェクトを用いて、必要な保守作業を容易に計画できる。

スレートデバイスを用いた AR プロトタイピングアプリケーションの研究がある。Ye ら [6] 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 [7] 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。

これらのスレート AR 環境にて、例えば、AR オブジェクトを配置するために文字入力によってメモを残すことが想定される。そこで、本研究は、これらのスレート AR 環境におい

て、文字を入力する際の空中仮想キーボードおよびそのキーボードを用いた2つの文字入力手法を取り上げ、それらの文字入力性能を調査する。

2.2 ヘッドマウントディスプレイを用いたAR環境における文字入力

スレートAR環境ではなく、HMDを装着したAR環境においては、文字入力手法の研究が行われている。

Xuら[8]は、HMDを装着した環境にて、4種類のポインティング方法（コントローラ、頭、手、頭および手のハイブリッド）およびタップあるいはスワイプの2種類を組み合わせた8つの文字入力方法について、体系的に文字入力性能およびユーザの好みを調査した。結果として、コントローラを使用した方法が他のデバイスを用いない方法と比べて文字入力性能およびユーザの好みに関して優れていることが示された。しかし、スレートAR環境において、アクセシビリティの観点から、外部デバイスであるコントローラを用いることは望ましくない。そこで我々は、スレートAR環境にて、外部デバイスを用いず、ユーザの手を用いた文字入力の性能を調査する。

Kernら[9]は、仮想現実（VR）用およびビデオシースルー型AR用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[10]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を入力する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。スレートAR環境において、ユーザは、スレートデバイスを把持しながら空間を自由に移動するため、両手あるいは外部デバイスを用いることは望ましくない。

また、キーボードを用いない文字入力手法の研究もある。Leeら[11]は、AR環境にて、確率的空間モデルおよび言語モデルを用いることにより、ハンドジェスチャにて表示される文字および単語を文字を選択可能なHIBEYを実装した。8日間毎日行われた文字入力タスクの結果から、HIBEYを用いた文字入力は、最終日に1分あたり平均13.19単語の入力速度を記録した。HIBEYは、キーボードを必要としないため、画面占有率が低い。しかし、文字入力速度に関して、空中キーボードを用いた文字入力が優れていることが示された。そのため、本研究では、スレートAR環境にて、空中仮想キーボードを用いた文字入力手法の性能を調査する。

これらの研究は、HMDを装着した環境にて文字入力手法を調査している。しかし、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把持した状態におけるAR環境を想定する。

2.3 スレートデバイスを用いた文字入力

Zhuら[12]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を用いた文字入力は3日間の練習ののち1分あたり37.9単語の入力

速度を記録した。

RearType, Back Keyboard, Sandwich Keyboard および BackSwipe [13, 14, 15, 16] は、スレートデバイスの背面を用いた文字入力手法である。しかし、これらの入力方法は、スレートデバイスの背面に物理的な入力インタフェースを取り付ける、あるいはスレートデバイスの背後にて指を用いてジェスチャ操作を行うことにより文字およびコマンドを入力する。そのため、物理インタフェースおよび指が、AR 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 [17, 18] および Okada ら [19] 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、スレート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、このインタフェースは、外部カメラおよび PC を必要とする。また、ユーザが変わると認識精度が低下してしまう。

Yin ら [20] は、任意のパネルに印刷されたキーボード上のユーザのタイピング動作を認識、追跡することにより文字を入力するカメラベースシステムである CamK を実装した。CamK を用いた文字入力は、スマートフォンのオンスクリーンキーボードを用いた入力と比べて、1.25 倍の入力速度であった。また、ランダムな文字列を入力するタスクでは、2.5 倍の入力速度であった。

タブレットデバイス用の画面占有率の低いキーボードを実装した研究もある。1Line Keyboard [21] は、QWERTY キーボードのキーを 1 行に配置したものである。このキーボードの高さは、iPad のオンスクリーンキーボードの 40% であり、画面占有率が低い。1Line Keyboard を用いた文字入力速度は、合計 20 分の練習後に、1 分あたり平均 30.7 単語であった。

また、Li ら [22] は、透明な適応型キーボードである、ResType を実装した。ResType は、タブレットデバイスの画面上に配置されたユーザの指に対して、自動的にキーボードの位置を適応する。よって、ユーザは、タブレットデバイスの画面において低い画面占有率にて、タッチタイピングできる。ResType を用いた文字入力の速度は、タブレットのオンスクリーンキーボードを用いた場合と比べて、13.5% 高速であった。また、物理キーボードを用いた場合の 86.7% であった。これらのキーボードを用いた文字入力は、スレートデバイスを机に配置した状態において両手を用いて行われる。しかし、スレート AR 環境では、ユーザはスレートデバイスを把持した状態にて作業するため、机上のみに限定された入力方法は好ましくない。

スレートデバイス用のアイズフリーかつ片手によって入力可能なキーボードを実装した研究もある。Banovic ら [23] は、モバイルデバイスの画面上の異なる領域に親指を置き、フリックジェスチャを用いて文字を入力するための、Escape-Keyboard を実装した。ユーザは、領域ごとの割り振られたキーの位置を覚えることにより、キーボードを見ずに入力ができる。また、Lai ら [24] は、親指を初期位置から特定の方向にストロークさせることにより、その方向に割り当てられた文字を入力する ThumbStroke を実装した。これらのアイズフリーなキー

ボードは、スレートデバイスの画面の広い領域をキーボードとして用いるため、画面占有率が高い。

これらのスレートデバイス用のキーボードおよび文字入力手法は、メールの送信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 空間上に実装した空中仮想キーボードを用いた片手による文字入力手法の性能調査を目的とする。

第3章 実装

本章では、実装環境、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方法、および入力方法を述べる。

3.1 実装環境

実装環境の詳細は以下のとおりである。

- MacBook Pro (15-inch 2019)
 - OS : macOS Ventura 13.5
 - プロセッサ : 2.3GHz 8 コア Intel Core i9
 - RAM : 16GB
- iPhone12
 - OS : iOS 16.3.1
 - 画面サイズ : 幅 7.2 cm × 高さ 14.7 cm
 - 画面解像度 : 1170 × 2532 ピクセル
- Unity 2021.3.18f1
- AR Foundation Remote 1.4.34-release.0

3.2 空中仮想キーボード

本節では、空中仮想キーボードのレイアウト、キーボードサイズおよび配置を述べる。

3.2.1 キーボードレイアウト

図 3.1 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みが表示される。このレイアウトは、Dudley ら [25] が行ったキーボードオクルージョンの最小化に関する実験にて採用されていた、各キーに対応するアルファベットおよ

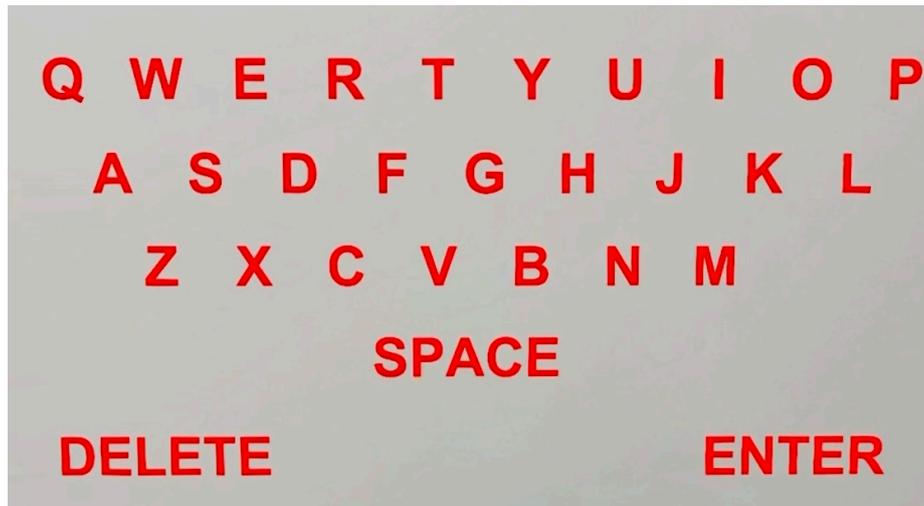


図 3.1: 空中仮想キーボード.

びアウトラインを除いた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.

3.2.2 キーボードサイズおよび配置

本研究では, 空中仮想キーボードのサイズを2つ設計した. サイズの大きいキーボードは, スマートフォンのカメラを原点として, 奥行方向に0.7mの位置に配置され, 縦15.2cm × 横39.2cmの大きさ(以降, キーボードサイズ大)である. また, サイズの小さいキーボードは, 奥行方向に0.7mの位置に配置され, 縦9.12cm × 横23.52cmの大きさ(以降, キーボードサイズ小)である. この大きさは, キーボードサイズ大の60%である. この比率にした理由は, Yiら[26]によって定められたキーボードの大きいサイズおよび小さいサイズの比率が約60%なためである.

3.3 ThumbTrigger 手法

スレートAR環境において, AR体験の質を向上させる可能性がある入力手法として, ThumbTrigger 手法を実装した. この手法において, ユーザは, スレートデバイスの背面にて, 空中タップにより, AR空間上の空中仮想キーボードのキーを入力する. そのため, スレートデバイス用の文字入力手法に採用されている画面タップによる入力と比べて, AR体験の一環として文字入力可能であると考えた. 本節では, ThumbTrigger 手法の実装および入力方法を述べる.

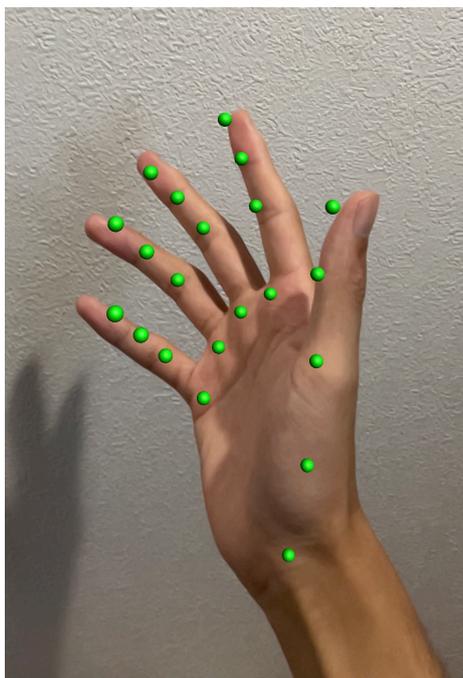


図 3.2: ハンドトラッキングによって指の先端および各関節に配置された球体オブジェクト。

3.3.1 ハンドトラッキング

ThumbTrigger 手法を用いる様子を図 3.3 に示す。ThumbTrigger 手法において、ユーザが、スレートデバイスの背後の空間に片手を配置することにより、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。

ハンドトラッキングには、MediaPipe [27] を用いる。トラッキングされると、図 3.2 のように、カメラの視野角内にある指の先端および各関節に対応する球体オブジェクトが配置される。

3.3.2 トラッキング精度

ハンドトラッキングの精度向上のため、トラッキングによって指の先端および各関節に配置された球体オブジェクトの座標に対してフィルタリングを行い、オブジェクトのジッタに対する影響を比較した。

このとき用いたフィルタは、1 ϵ フィルタ [28] である。このフィルタは、信号におけるノイズであるジッタおよび信号の遅延のバランスを調整し、より少ない遅延にてジッタを減らすためのフィルタである。1 ϵ フィルタにて用いられる 2 つのパラメータである β および $f_{c_{min}}$ に関して、 β を 5 とし、 $f_{c_{min}}$ を 1.0 から 0.1 に調整した。 β を大きくすると、オブジェクトの高速運動における遅延は小さくなるが、ジッタが大きくなる。一方、 $f_{c_{min}}$ を小さくすることにより、遅延は大きくなるが、オブジェクトの低速運動におけるジッタを小さくできる。



図 3.3: ThumbTrigger 手法を用いているユーザ.

人差し指の先端のオブジェクトに対して $f_{c_{min}} = 1.0$ としたときの 1ϵ フィルタを適用した際の x 座標の結果を図 3.4 に, $f_{c_{min}} = 0.1$ としたときの結果を図 3.5 に示す.

図から, 1ϵ フィルタにおける $f_{c_{min}}$ を 0.1 のときのオブジェクトの座標は, $f_{c_{min}}$ を 1.0 のときと比べて, 座標推移が滑らかになっており, かつ遅延が小さいことがわかる. この結果から, ThumbTrigger 手法におけるハンドトラッキングの精度向上のために, β を 5 とし, $f_{c_{min}}$ を 0.1 とした 1ϵ フィルタを用いることとした.

3.3.3 入力方法

図 3.6a 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を入

力する (図 3.6b)。このように入力できるのは、トラッキングによって人差し指の先端に配置されたオブジェクトから、空中仮想キーボードに向けて伸びるレイがキーに衝突することにより、入力判定が行われるためである。

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ことにより検出される。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文字を削除する機能を追加した (図 3.6c, d)。この機能は、Yi [26] 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。

3.4 ScreenTouch 手法

本節では、ScreenTouch 手法の入力方法および実装を述べる。ScreenTouch 手法を用いる様子を図 3.7 に示す。ScreenTouch 手法において、ユーザは、図 3.7 のように、画面タッチによって文字を入力する。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 [12, 21, 22, 23, 24]。

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。その際に、画面内のタッチポイントから奥行き方向に伸びるレイが空中仮想キーボードと衝突することにより、ユーザがキーをタップしたと判定される。

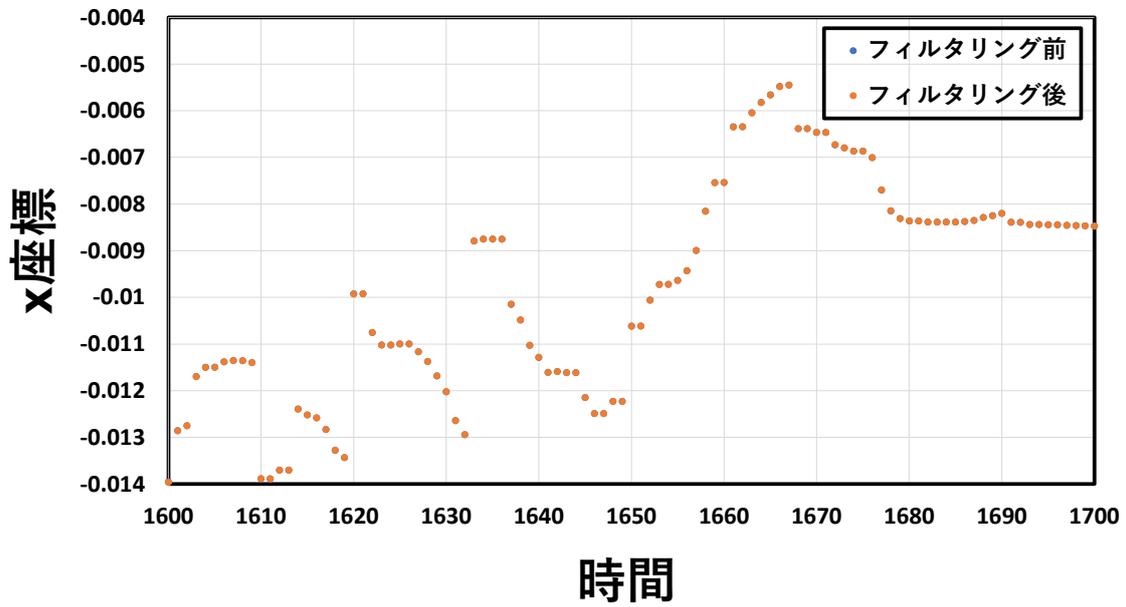


図 3.4: $f_{c_{min}}$ を 1.0 としたときの 1€ フィルタをオブジェクトに適用した結果.

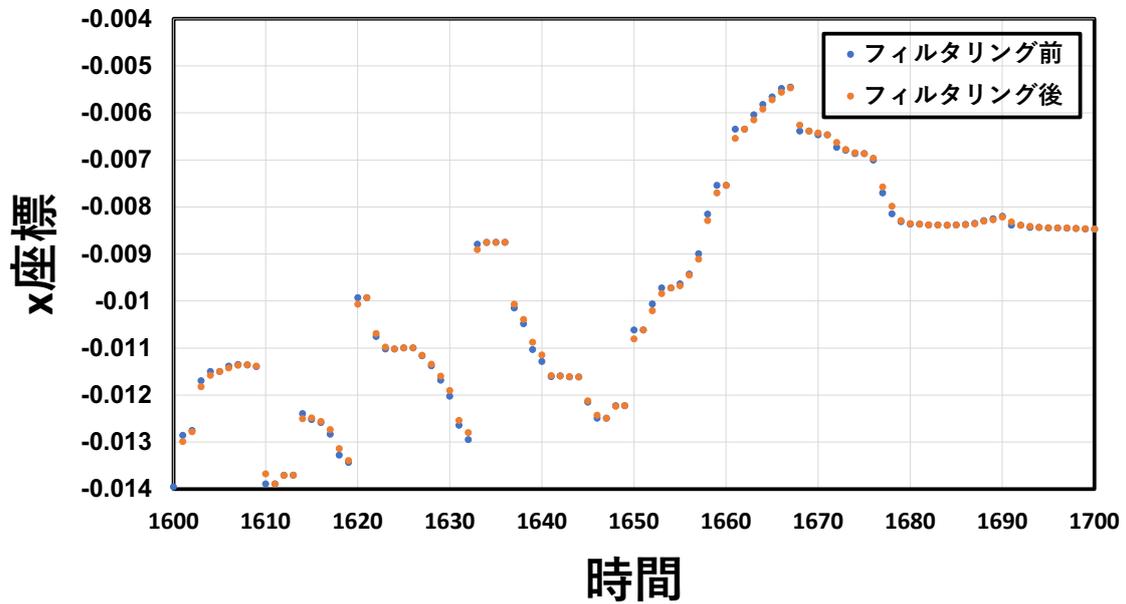


図 3.5: $f_{c_{min}}$ を 0.1 としたときの 1€ フィルタをオブジェクトに適用した結果.

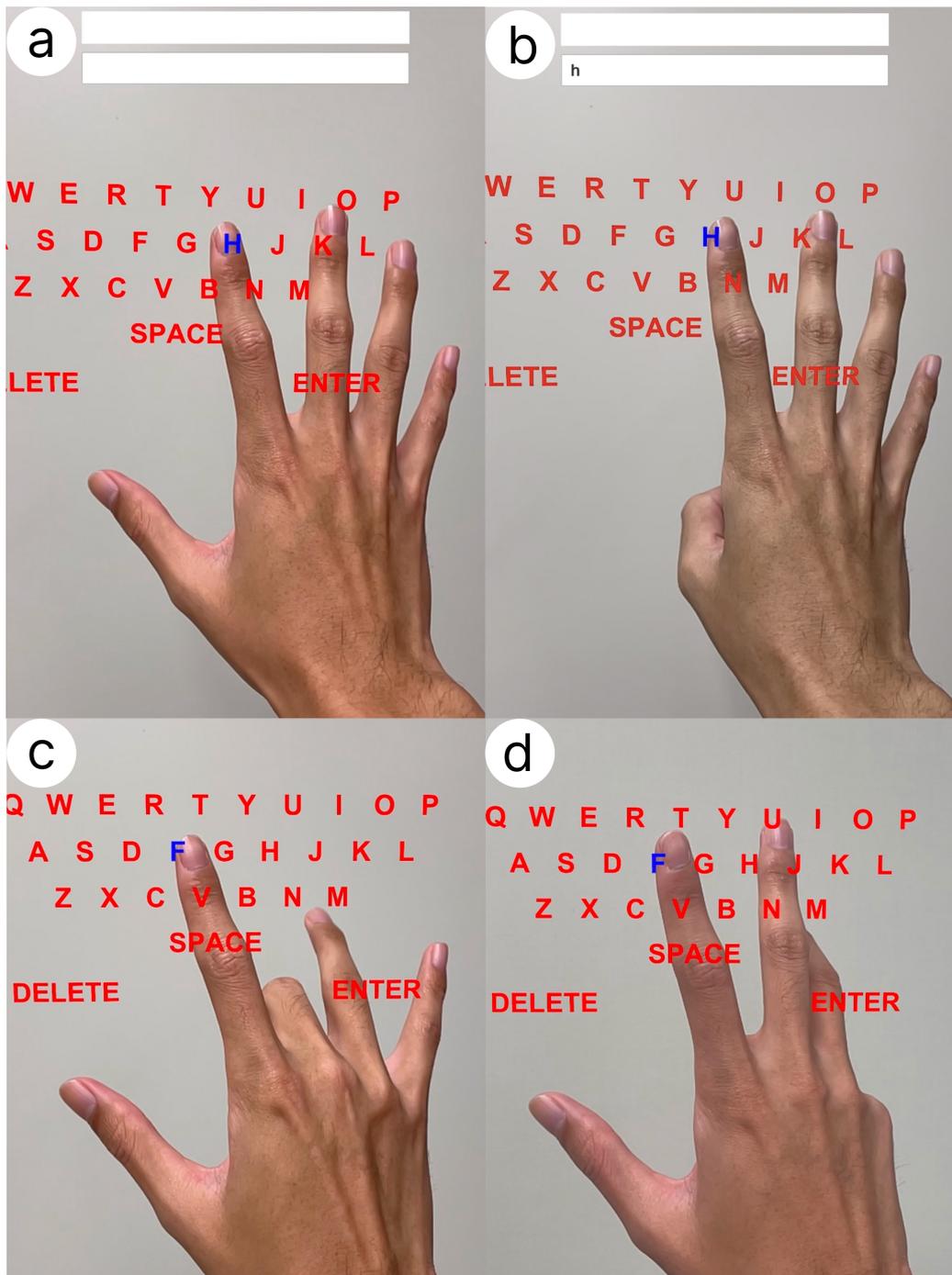


図 3.6: ThumbTrigger 手法を用いた文字入力. a) ユーザは、入力したいキーに人差し指を重ねる. このとき、キーが青くハイライトされる. b) 入力のために、親指を折り曲げる様子. c) スペース入力のために中指を折り曲げる様子. d) 文字を削除するために小指を折り曲げる様子.



図 3.7: ScreenTouch 手法を用いているユーザ.

第4章 評価実験

3.2.2 節にて述べた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評価実験を行った。文字入力タスクによって得られたデータを用いて、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、参加者は、主観評価のためのアンケートによって、ユーザビリティ、腕の疲労感の評価、および各タスク条件の順位付けを行った。本章では、実験内容および結果を述べる。また、実験結果に基づいた解析結果および考察を述べる。

4.1 参加者

参加者は、研究室内の大学生および大学院生8名（全員男性、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を、5段階評価（5：毎日使用する、4：週に1度程度使用する、3：月に1度程度使用する、2：年に1度程度使用する、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の使用頻度を、5名が2、2名が1、1名が3と回答し、HMDを用いたARの使用頻度に対して、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 実験装置および環境

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幅7.2cm×高さ14.7cmであった。

4.3 条件

実験に用いた条件は、キーボードサイズ2条件（サイズ大およびサイズ小）×文字入力手法2条件（ThumbTrigger 手法および ScreenTouch 手法）から成る合計4つの条件である。それぞれを以下のように表す。

- 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)

4.4 タスク

実験に用いたタスクは、表示された入力すべき文章をなるべく速く正確に入力するタスクである。このとき、先行研究 [8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 21, 22, 23, 24, 26, 29] と同様に、MacKenzie and Soukoreff のフレーズセット [30] を使用した。このフレーズセットを用いることにより、文字入力速度およびエラー率に関して、より信頼性の高いデータを得ることができる [31]。

4.5 評価指標

実験にて用いた評価指標として、文字入力速度は Words Per Minute (以降, WPM) [32] として、エラー率には、Total Error Rate (以降, TER) [32] として計測された。

WPM は、式 4.1 として定義される。式 4.1 中における T は最終的に入力された合計の文字数 (スペースを含む)、および S は 1 文字目が入力されてから最後の単語が入力されるまでの時間 (秒) である。このとき、1 文字目の入力を考慮しないために、T から 1 を引く。なお、英単語に関して、1 つの単語はスペース、数字、および他の印字可能文字も含めて平均 5 文字であるため、WPM は合計の文字数を時間によって割ったものに 5 分の 1 を掛けることにより求められる。

$$\text{WPM} = \frac{|T| - 1}{S} \times 60 \times \frac{1}{5} \quad (4.1)$$

TER は、式 4.2 として定義される。式 4.2 中における INF は最終的に入力された文字のうち、修正されなかった文字数である。IF は入力文字の中における、入力を誤ったため、修正された文字の数である。すなわち、デリートキーを押した、あるいは小指による削除ジェスチャを行った回数である。C は最終的に入力された文字のうち、正しい文字の数である。

$$\text{TER} = \frac{\text{INF} + \text{IF}}{\text{C} + \text{INF} + \text{IF}} \times 100\% \quad (4.2)$$

また、ユーザビリティおよび作業負荷に関して、System Usability Scale (以降, SUS) [33] および NASA-Task Load Index (以降, NASA-TLX) [34] のアンケートを用いて評価した。SUS は、10 項目の質問により構成され、各手法のユーザビリティを 0 から 100 のスケールによって評価する。このスコアが高いほどユーザビリティが良いことを示す。NASA-TLX は、精神的負荷、身体的負荷、時間的負荷、努力、パフォーマンスおよびフラストレーションの 6 つの項目により構成され、主観的な作業負荷を 0 から 100 のスケールによって評価する。このスコアが高いほど作業負荷が高いことを示す。

さらに、各条件の腕の疲労感および順位付けに関するアンケートによって、各条件を評価する。

4.6 実験手順

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。順序効果無くするため、条件の順序はラテン方格によってカウンターバランスされた。

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感、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。

4.7 実験結果および考察

本節では、実験によって得られた各条件における文字入力速度およびエラー率の結果、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、その結果から得られる考察を述べる。また、腕の疲労感および4条件の順位付けに関するアンケート結果を示す。なお、統計解析において、有意水準を0.05とした。

4.7.1 文字入力速度

条件ごとの全参加者のWPMの平均値を図4.1に示す。BT条件のWPMの平均値は5.56 WPM ($SD=0.70$ WPM)、ST条件は4.34 WPM ($SD=1.33$ WPM)、BS条件は16.51 WPM ($SD = 2.41$ WPM) およびSS条件は11.29 WPM ($SD = 2.58$ WPM)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

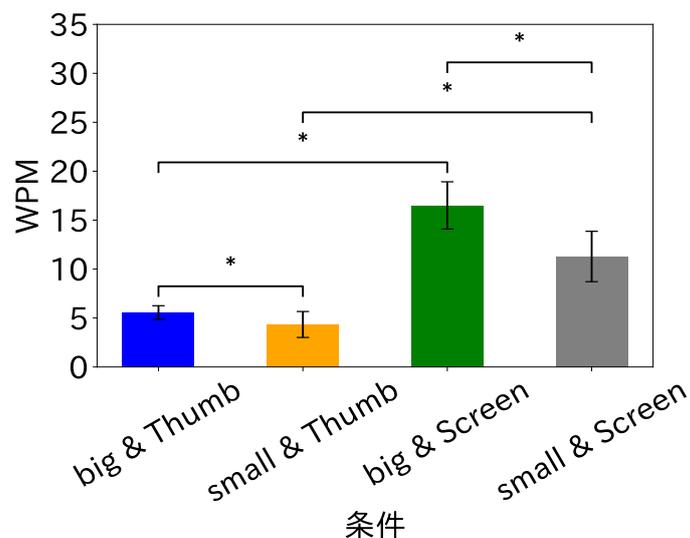


図 4.1: 各条件における WPM の平均値.

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 ($p = 1.80 \times 10^{-6} < 0.05$) にて有意差があった.

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.

4.7.2 エラー率

条件ごとの全参加者の TER の平均値を図 4.2 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.

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

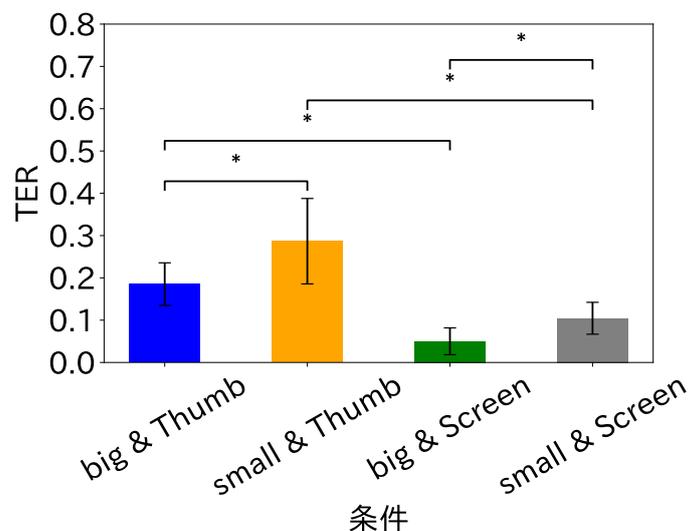


図 4.2: 条件におけるトータルエラー率の平均値.

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。

4.7.3 ユーザビリティ

SUSのアンケート結果を図4.3に示す。各条件のスコアの平均値はそれぞれ、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： $p = 7.93 \times 10^{-4} < 0.05$ ）。

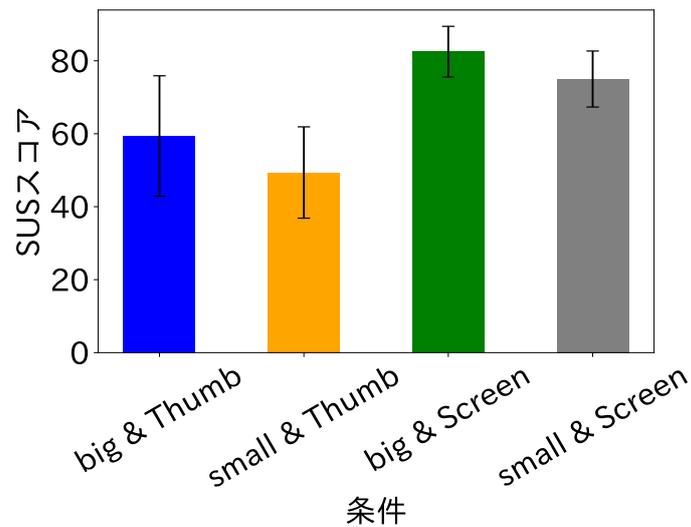


図 4.3: 各条件における SUS の平均値.

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、Thumb-Trigger 手法は、ScreenTouch 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、Thumb-Trigger 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も、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。

4.7.4 作業負荷

NASA-TLX のアンケート結果を図 4.4 に示す。各条件のスコアの平均値はそれぞれ、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 スコアにおいて、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

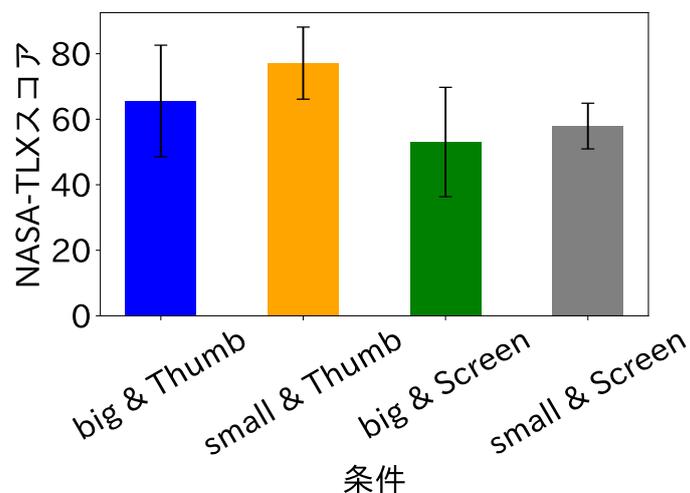


図 4.4: 各条件における NASA-TLX の平均値.

用において、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。

4.7.5 腕の疲労感

参加者に、各条件の腕の疲労感を 5 段階（5：非常に疲れている，1：全く疲れていない）にて評価を行ってもらった。その結果を図 4.5 に示す。

各条件の疲労感の平均値は、BT 条件は 4.00 ($SD = 0.87$)，ST 条件は 4.63 ($SD = 0.70$)，BS 条件は 2.625 ($SD = 1.11$) および SS 条件は 2.625 ($SD = 0.70$) であった。腕の疲労感について、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感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感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感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

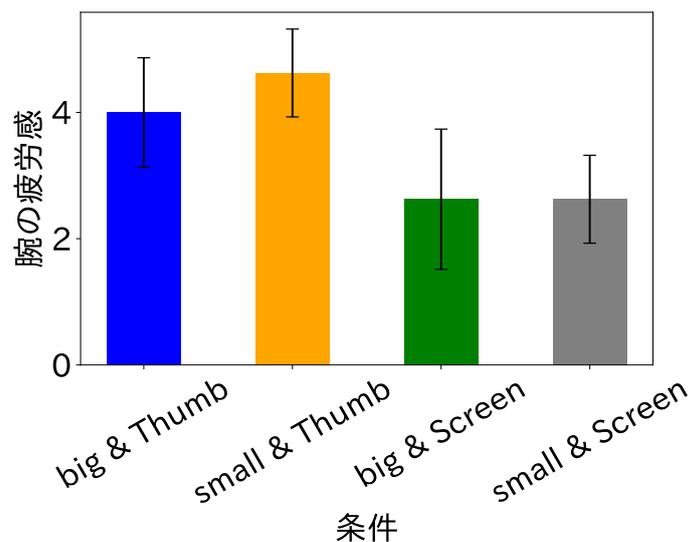


図 4.5: 各条件における腕の疲労感 (5 段階評価) の平均値.

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 手法に関して、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感が高くなっている。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。

4.7.6 各条件の順位

条件の順位に関して、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」などと回答した。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」と回答した。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、大きな個人差があることが考えられる。

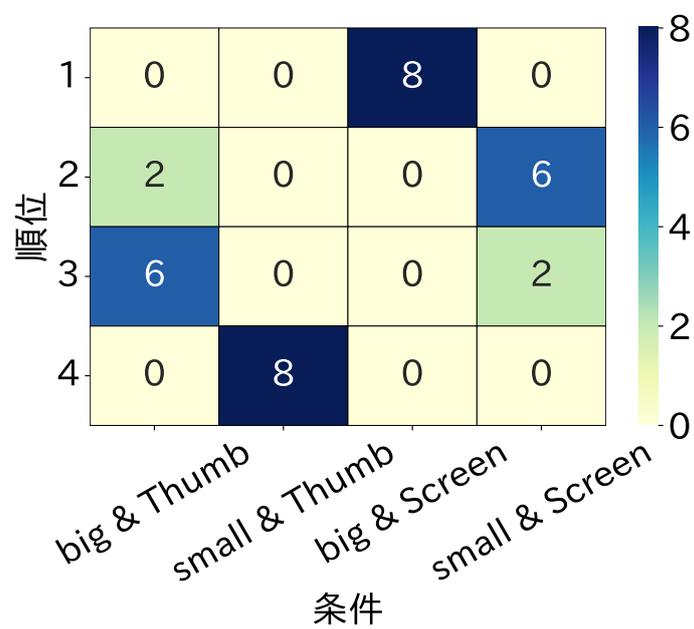


図 4.6: 参加者による各条件の順位. 色が濃いほど多くの参加者がその順位を選んだことを表す. また, 数字はその順位を選んだ参加者の数を表す.

第5章 議論

本章では、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 手法の課題および改善案に関する議論を述べる。

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参加者に、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」などの回答があった。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 [29] 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を入力することにより、文字入力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関して尋ねると、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回答が得られたと考える。

5.2 ThumbTrigger 手法の課題および改善案

ThumbTrigger 手法を用いることにより、キーボードサイズが小さい場合、WPM の低下が少ない可能性がある。また、仮説として、ThumbTrigger 手法は、スレート AR 環境において、AR 体験の質を向上させる可能性があると考えられる。そのため、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 手法に関して、「慣れると入力しやすくなるかもしれない」と回答した。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することにより、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 8.20 WPM、ST 条件にて 9.70 WPM 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

4.7.6 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、参加者のアンケートの回答から示された。身体の疲労により、入力に用いる腕の姿勢を維持することが難しくなり、再び手が画角内から外れてしまうため、正確なハンドトラッキングが難しくなる。よって、参加者ごとにスマートフォンのカメラの視野角を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を入力する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

タスク後アンケートおよび実験後アンケートにおける、ThumbTrigger 手法の腕の疲労感に関する回答をまとめる。また、それらの回答をもとに、ThumbTrigger 手法の基本姿勢を改善することを考える。

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」という回答が得られた。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」という回答および、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」という回答が得られた。

これらの回答から、ThumbTrigger 手法の基本姿勢を自然な姿勢とすることにより、疲労感が大きく低下する可能性が示唆された。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、図 5.1a のように手の甲を手前に向けた姿勢ではなく、図 5.1b のように、腕を回転させ、手のひらを手前に向けた姿勢を基本姿勢

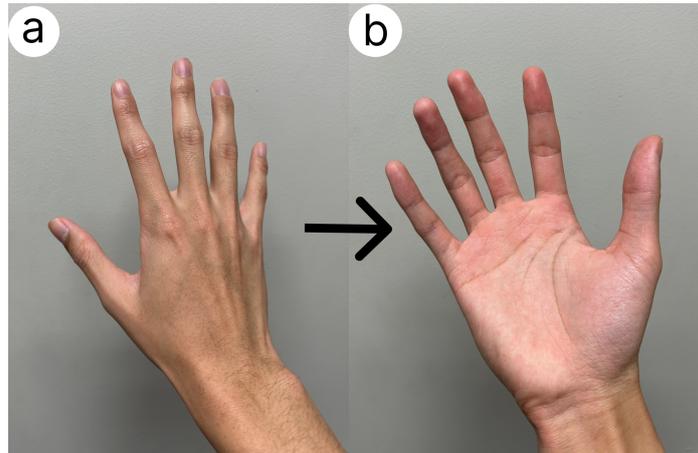


図 5.1: ThumbTrigger 手法の基本姿勢の改善. a) 現在の ThumbTrigger 手法における手の姿勢.
b) 手のひらを手前に向けた姿勢.

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することができるため、疲労が軽減されることが考えられる。

第6章 今後の予定

本章では、本研究の今後の予定を述べる。

6.1 実験参加者の多様化

本論文における実験の参加者は、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人と少なかったため、今後、実験を行う場合、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。

6.2 空中仮想ワードジェスチャキーボードの実装

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、文字入力のパフォーマンス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動作を行う必要がある。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、ワード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、入力できる。これにより、疲労感を軽減できると考える。

6.3 実際のスレート AR 環境を想定したユーザ実験の実施

本研究では、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、空中仮想キーボードおよび文字入力手法のパフォーマンスを調査したが、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。例として、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を入力する。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り調査する。

第7章 結論

本研究の目的は、スレート AR 環境における、空中仮想キーボードおよびそのキーボードを用いた2つの文字入力手法の性能調査である。性能調査のために、スマートフォンに実装した空中仮想キーボードおよび2つの入力手法である、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、腕の疲労感に関して有意に文字入力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文字入力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の議論を行った。今後、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、ユーザ実験を行う予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、志築文太郎先生、川口一画先生、高橋伸先生には多大なご意見とご指導を頂きました。心から感謝いたします。特に、志築文太郎先生には、研究の進め方、論文執筆をはじめとした研究の基礎をご指導いただきました。さらに、研究の相談および研究生活に関して多くのご助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

インタラクティブプログラミング研究室の同輩、先輩方には研究生活においてお世話になりました。また、WAVEチームの皆様にはチームゼミにおけるご意見および論文の添削といった研究に関する多くの支援だけでなく、研究室においても多くのご助言を頂きました。深く感謝いたします。特に、小西智樹氏には研究方針および論文執筆など本研究における重要な部分において多くのアドバイスを頂き大変お世話になりました。多大なご協力に心からお礼申し上げます。

最後に、学生生活においてお世話になった皆様、そして、私の学生生活を支えて頂いた家族に深く感謝申し上げます。

業績リスト

本論文に関する業績を以下に示す.

- 公表済み論文
 - 佐藤玲生, 小西智樹, 志築文太郎. 片手用空中キーボードのスレートデバイス AR 空間上への構築. 第 31 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 (WISS 2023), 日本ソフトウェア科学会, 2023 年 12 月, 3 pages.
 - 佐藤玲生, 小西智樹, 志築文太郎. 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. 第 206 回ヒューマンコンピュータインタラクション研究会 (HCI206), 情報処理学会, 2024 年 1 月, 8 pages.

参考文献

- [1] Shwetha Rajaram and Michael Nebeling. 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, pp. 382:1–382:16, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [2] Juhee Lee. Problem-based gaming via an augmented reality mobile game and a printed game in foreign language education. In Education and Information Technologies, Vol. 27, pp. 743–771, USA, 2022. Kluwer Academic Publishers.
- [3] 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 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , 第 2016-HCI-166 巻, pp. 1–8, 2016.
- [4] Minghao Li, Xin Feng, Yang Han, and Xudu Liu. Mobile augmented reality-based visualization framework for lifecycle O&M support of urban underground pipe networks. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 136, pp. 1–21, 2023.
- [5] Jumyung Um, Joung min Park, Seo yeon Park, and Gokcen Yilmaz. Low-cost mobile augmented reality service for building information modeling. Automation in Construction, Vol. 146, pp. 1–16, 2023.
- [6] Hui Ye and Hongbo Fu. 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, pp. 130:1–130:14, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [7] Zeyu Wang, Cuong Nguyen, Paul Asente, and Julie Dorsey. 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, pp. 34:1–34:15, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [8] Wenge Xu, Hai-Ning Liang, Anqi He, and Zifan Wang. Pointing and selection methods for text entry in augmented reality head mounted displays. In 2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), pp. 279–288, Los Alamitos, CA, USA, 2019. IEEE Computer Society.

- [9] Florian Kern, Florian Niebling, and Marc Erich Latoschik. Text input for non-stationary xr workspaces: Investigating tap and word-gesture keyboards in virtual and augmented reality. In IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 29, pp. 2658–2669, Los Alamitos, CA, USA, 2023. IEEE Computer Society.
- [10] Chen Liang, Chi Hsia, Chun Yu, Yukang Yan, Yuntao Wang, and Yuanchun Shi. DRG-Keyboard: Enabling subtle gesture typing on the fingertip with dual IMU rings. In In Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, Vol. 6, pp. 170:1–170:30, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [11] Lik Hang Lee, Kit Yung Lam, Yui Pan Yau, Tristan Braud, and Pan Hui. HIBEY: Hide the keyboard in augmented reality. In 2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom), pp. 1–10, Los Alamitos, CA, USA, 2019. IEEE Computer Society.
- [12] Suwen Zhu, Tianyao Luo, Xiaojun Bi, and Shumin Zhai. Typing on an invisible keyboard. In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI ’18, pp. 439:1–439:13, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [13] James Scott, Shahram Izadi, Leila Sadat Rezai, Dominika Ruszkowski, Xiaojun Bi, and Ravin Balakrishnan. Reartype: Text entry using keys on the back of a device. In Proceedings of the 12th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services, MobileHCI ’10, pp. 171–180, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.
- [14] Hwan Kim, Yea-kyung Row, and Geehyuk Lee. Back keyboard: A physical keyboard on backside of mobile phone using qwerty. In Proceedings of the 12th Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA ’12, pp. 1583–1588, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [15] Oliver Schoenleben and Antti Oulasvirta. Sandwich keyboard: Fast ten-finger typing on a mobile device with adaptive touch sensing on the back side. In Proceedings of the 15th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, MobileHCI ’13, pp. 175–178, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [16] Wenzhe Cui, Suwen Zhu, Zhi Li, Zheer Xu, Xing-Dong Yang, IV Ramakrishnan, and Xiaojun Bi. Backswipe: Back-of-device word-gesture interaction on smartphones. In Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI ’21, pp. 196:1–196:12, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.

- [17] Masakazu Higuchi and Takashi Komuro. AR typing interface for mobile devices. In Proceedings of the 12th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia, MUM '13, pp. 14:1–14:8, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [18] Masakazu Higuchi and Takashi Komuro. 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, pp. 1235–1240, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [19] Masae Okada, Masakazu Higuchi, Takashi Komuro, and Kayo Ogawa. Recognition of typing motions on AR typing interface. In Proceedings of the 16th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia, MUM '17, pp. 429–434, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [20] Yafeng Yin, Qun Li, Lei Xie, Shanhe Yi, Edmund Novak, and Sanglu Lu. CamK: Camera-based keystroke detection and localization for small mobile devices. In IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 17, pp. 2236–2251, Los Alamitos, CA, USA, 2018. IEEE Computer Society.
- [21] Frank Chun Yat Li, Richard T. Guy, Koji Yatani, and Khai N. Truong. The 1line keyboard: A QWERTY layout in a single line. In Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '11, pp. 461–470, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [22] Zhuojun Li, Chun Yu, Yizheng Gu, and Yuanchun Shi. ResType: Invisible and adaptive tablet keyboard leveraging resting fingers. In Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '23, pp. 722:1–722:14, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [23] Nikola Banovic, Koji Yatani, and Khai N. Truong. Escape-Keyboard: A sight-free one-handed text entry method for mobile touch-screen devices. In International Journal of Mobile Human Computer Interaction, Vol. 5, pp. 42–61, USA, 2013. IGI Global.
- [24] Jianwei Lai, Dongsong Zhang, Sen Wang, Isil Doga Yakut Kilic, and Lina Zhou. Thumbstroke: A virtual keyboard in support of sight-free and one-handed text entry on touchscreen mobile devices. In ACM Transactions on Management Information Systems, Vol. 10, pp. 11:1–11:19, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [25] John J. Dudley, Keith Vertanen, and Per Ola Kristensson. Fast and precise touch-based text entry for head-mounted augmented reality with variable occlusion. In ACM Transactions on Computer-Human Interaction, Vol. 25, pp. 30:1–30:40, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.

- [26] Xin Yi, Chen Liang, Haozhan Chen, Jiuxu Song, Chun Yu, Hewu Li, and Yuanchun Shi. 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, pp. 38:1–38:25, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [27] Camillo Lugaresi, Jiuqiang Tang, Hadon Nash, Chris McClanahan, Esha Uboweja, Michael Hays, Fan Zhang, Chuo-Ling Chang, Ming Yong, Juhyun Lee, Wan-Teh Chang, Wei Hua, Manfred Georg, and Matthias Grundmann. MediaPipe: A framework for perceiving and processing reality. In Third Workshop on Computer Vision for AR/VR at IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) 2019, pp. 1–4, 2019.
- [28] Géry Casiez, Nicolas Roussel, and Daniel Vogel. 1 € filter: A simple speed-based low-pass filter for noisy input in interactive systems. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '12, pp. 2527–2530, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [29] Junxiao Shen, Jinghui Hu, John J. Dudley, and Per O. Kristensson. Personalization of a mid-air gesture keyboard using multi-objective Bayesian optimization. In 2022 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), pp. 702–710, Los Alamitos, CA, USA, 2022. IEEE Computer Society.
- [30] I. Scott MacKenzie and R. William Soukoreff. Phrase sets for evaluating text entry techniques. In CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp. 754–755, New York, NY, USA, 2003. Association for Computing Machinery.
- [31] Per Ola Kristensson and Keith Vertanen. Performance comparisons of phrase sets and presentation styles for text entry evaluations. In Proceedings of the 2012 ACM International Conference on Intelligent User Interfaces, IUI '12, pp. 29–32, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [32] Ahmed Sabbir Arif and Wolfgang Stuerzlinger. Analysis of text entry performance metrics. In 2009 IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity (TIC-STH), pp. 100–105. IEEE Computer Society, 2009.
- [33] John Brooke. SUS: A quick and dirty usability scale. Usability Evaluation in Industry, pp. 189–194, 1996.
- [34] 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, Advances in Psychology, Vol. 52, pp. 139–183. North-Holland, 1988.

付録A 評価実験において用いたアンケート

本研究にて用いた、実験前アンケート、タスク後アンケート、SUS アンケート、NASA-TLX アンケートおよび実験後アンケートを示す。

A.1 実験前アンケート

実験前アンケート

rsato@iplab.cs.tsukuba.ac.jp [アカウントを切り替える](#)

共有なし

* 必須の質問です

被験者ID *

回答を入力

メールアドレス *

回答を入力

性別 *

男性

女性

回答しない

年齢 *

回答を入力

図 A.1: 実験前アンケート-Part 1. 実験の説明を受けたのち、参加者情報、AR および QWERTY キーボードの使用経験に関する質問に回答する。

利き手 *

右利き

左利き

両利き

スマートフォンおよびタブレット端末を用いたARの経験 *

参考：2年に一度程度使用, 3月に一度程度使用, 4週に一度程度使用

1 2 3 4 5

全く使用しない 毎日使用する

HMDを用いたARの経験 *

参考：2年に一度程度使用, 3月に一度程度使用, 4週に一度程度使用

1 2 3 4 5

全くない 毎日使用する

QWERTYキーボードの使用経験 *

参考：2年に一度程度使用, 3月に一度程度使用, 4週に一度程度使用

1 2 3 4 5

全くない 毎日使用する

Google フォームでパスワードを送信しないでください。

このフォームは 筑波大学システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻インタラクティブプログラミング研究室 内部で作成されました。不正行為の報告

Google フォーム

図 A.2: 実験前アンケート-Part 2.

A.2 タスク後アンケート

タスク後アンケート

自由記述の項目に関して、できるだけ記入をお願いします。

rsato@iplab.cs.tsukuba.ac.jp [アカウントを切り替える](#)

共有なし

*** 必須の質問です**

被験者ID *

回答を入力

腕の疲労度 *

1 2 3 4 5

全く疲れていない 非常に疲れている

感想（他の手法と比較してでも構いません） *

回答を入力

次へ [フォームをクリア](#)

Google フォームでパスワードを送信しないでください。

このフォームは 筑波大学システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻インタラクティブプログラミング研究室 内部で作成されました。 [不正行為の報告](#)

Google フォーム

図 A.3: 各実験条件のタスク終了後にその条件に関する腕の疲労感に関する質問に回答する。また、条件に対する感想を記述する。

A.3 SUS アンケート

無題のセクション

今回の条件*

キーボードサイズ大&ThumbTrigger手法
 キーボードサイズ小&ThumbTrigger手法
 キーボードサイズ大&ScreenTouch手法
 キーボードサイズ小&ScreenTouch手法

このシステムをしばしば使いたいと思う*

1 2 3 4 5
全く思わない そう思う

このシステムは不必要なほど複雑であると感じた*

1 2 3 4 5
全く思わない そう思う

このシステムは容易に使えと思った*

1 2 3 4 5
全く思わない そう思う

このシステムを使うのに技術専門家のサポートを必要とするかもしれない*

1 2 3 4 5
全く思わない そう思う

このシステムにある様々な機能がよくまとまっていると感じた*

1 2 3 4 5
全く思わない そう思う

図 A.4: SUS アンケート-Part 1. 条件のユーザビリティに関する質問に5段階尺度にて評価する。

このシステムでは、一貫性のないところが多くあったと思った *

1 2 3 4 5

全く思わない そう思う

たいていのユーザは、このシステムの使用方法について、素早く学べるだろう *

1 2 3 4 5

全く思わない そう思う

このシステムはとても扱いにくいと思った *

1 2 3 4 5

全く思わない そう思う

このシステムを使うのに自信があると感じた *

1 2 3 4 5

全く思わない そう思う

このシステムを使い始める前に多くのことを学ぶ必要があった *

1 2 3 4 5

全く思わない そう思う

その他意見や思ったことがあれば、自由に記述してください。

回答を入力

[戻る](#) [送信](#) [フォームをクリア](#)

Google フォームでパスワードを送信しないでください。

このフォームは 筑波大学システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻インタラクティブプログラミング研究室 内部で作成されました。不正行為の報告

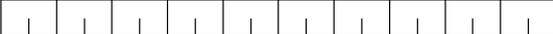
Google フォーム

図 A.5: SUS アンケート-Part 2.

A.4 NASA-TLX アンケート

タスクアンケート - パート 1

タスクの経験に最も近い各スケール上のポイントをクリックしてください

知的・知覚的要求	
	
小さい	大きい
身体的要求	
	
小さい	大きい
タイムプレッシャー	
	
弱い	強い
作業成績	
	
良い	悪い
努力	
	
少ない	多い
フラストレーション	
	
低い	高い

どの程度の知的・知覚的活動（考える、決める、計算する、記憶する、見るなど）を必要としましたか、課題はやさしかったですか難しかったですか、単純でしたか複雑でしたか、正確さが求められましたか大ざっぱでよかったですか

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

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はどの程度でしたか、ペースはゆっくりとして余裕があるものでしたか、それとも速くて余裕のないものでしたか

作業指示者（またはあなた自身）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思いますか、目標の達成に関して自分の作業成績にどの程度満足していますか

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

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、あるいは逆に、安心感、満足感、充足感、楽しさ、リラックスをどの程度感じましたか

図 A.6: NASA-TLX アンケート -Part 1. 6つの項目に対する回答を行う。

タスクアンケート - パート 2

タスクのワークロード（作業負荷）へのより重要な要因を表す要素をクリックしてください

作業成績	作業指示者（またはあなた自身）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思いますか。目標の達成に関して自分の作業成績にどの程度満足していますか
or	
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ましたか、あるいは逆に、安心感、満足感、充足感、楽しさ、リラックスをどの程度感じましたか

図 A.7: NASA-TLX アンケート-Part 2. Part 1 に示した6つの項目のうち、ランダムに表示される2つの項目のどちらが重要な要因であるかを選択する。この選択を、全通りに対して行う。例として、「作業負荷」および「フラストレーション」が表示された場合の画面を示す。

A.5 実験後アンケート

実験後アンケート

rsato@iplab.cs.tsukuba.ac.jp [アカウントを切り替える](#)

共有なし

*** 必須の質問です**

被験者ID *

回答を入力

本実験にて用いた4つの条件を順位付けしてください。ただし、1位=最も好む *

	1位	2位	3位	4位
サイズ大 &ThumbTrigger手法	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
サイズ小 &ThumbTrigger手法	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
サイズ大 &ScreenTouch手法	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
サイズ小 &ScreenTouch手法	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

この順位にした理由（簡潔で構いません） *

回答を入力

図 A.8: 実験後アンケート-Part 1. すべての条件タスクが終了したのち、4つの条件の順位付けに関する質問および実験全体を通して得られた感想などを回答する。

各キーボードサイズ（大と小）の画面占有率（スマートフォンの画面に対するキーボードが占める割合）に関して感じたことはありますか。
 例）キーボードサイズが大きいと、～であると感じた、キーボードサイズが小さい方が、～だと感じた。

回答を入力

キーボードデザイン（大きさや配置、レイアウトなど）に対して、改良案はありますか、無い場合は「特になし」と回答してください。

回答を入力

普段のスマートフォン用標準QWERTYキーボードと比べて、空中キーボードを用いて入力する際の違いはありますか。（普段、スマートフォンで標準QWERTYキーボードを使わない方はその旨を書いてください。）

回答を入力

実験全体に対する感想があれば自由に記述してください。

回答を入力

[フォームをクリア](#)

Google フォームでパスワードを送信しないでください。

このフォームは 筑波大学システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻インタラクティブプログラミング研究室 内部で作成されました。 [不正行為の報告](#)

Google フォーム

図 A.9: 実験後アンケート-Part 2.