

筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

卒業研究論文

実物体の表面を用いた VR / MR 向け
文字入力手法

平井李音

指導教員 志築文太郎, 川口一画

2021年2月

概要

一般的なデスクトップ環境と同様に仮想現実（VR）システムにおいても，ウェブブラウザにおける検索ワードやログイン画面におけるユーザ名の入力などの場面において文字入力が必要される．その時，ユーザはコントローラ，あるいはユーザ自身の手指を用いた仮想オブジェクト（例えば仮想キーボードのキー）の選択によって文字入力を行う．本研究ではVRシステムの文字入力に関してユーザの周囲にある実物体表面を用いて触覚を付与する手法を示し，その効果を調査した．この調査を行うためにまず，VR用の頭部装着ディスプレイ（HMD）に搭載されたハンドトラッキングセンサによって取得した五指の指先の座標から3次スプライン補間を用いてユーザが手で触れている実物体表面を推定し，それに合わせて仮想キーボードを配置する手法を示した．この手法を用いて仮想キーボードを空中（従来手法），壁，机，およびユーザのももに配置した場合の4条件における文字入力性能の比較を行った．その結果，空中，壁，机，およびもものそれぞれの入力性能に有意な差はなかった．

目次

第1章	序論	1
1.1	VRシステム上での文字入力	1
1.2	目的およびアプローチ	2
1.3	貢献	3
1.4	本論文の構成	3
第2章	関連研究	4
2.1	VRシステムにおけるコントローラを用いた文字入力手法	4
2.2	VRシステムにおける手指を用いた文字入力手法	4
2.3	VRシステムにおける物理キーボード，あるいはタッチスクリーンを用いた文字入力手法	6
2.4	VRやMRにおける実物体の表面を認識することで入力面として用いる手法	7
第3章	実物体表面を用いた文字入力手法	8
3.1	想定する使用環境	8
3.2	配置手順	8
3.3	実装	9
3.3.1	実物体表面の推定	9
3.3.1.1	3次スプライン補間の概要	10
3.3.1.2	三角形メッシュ面の概要	11
3.3.2	仮想キーボードの設計	13
第4章	実験：実物体表面を用いる手法の性能評価	15
4.1	実験設計	15
4.1.1	機器	15
4.1.2	実験参加者および実験環境	15
4.1.2.1	キーボードの配置条件	15
4.2	評価指標	17
4.3	実験手順	17
4.4	結果	18
4.4.1	WPM	18
4.4.2	Total ER	18

4.4.3	NASA-TLX	19
4.4.4	SUS	19
4.5	考察	20
第 5 章	議論	22
5.1	触覚による効果	22
5.2	キーボードの表示位置による影響	22
5.3	実物体の表面形状による影響	22
5.4	今後の展望	23
第 6 章	結論	24
	謝辞	25
	参考文献	26
付 録 A	実験の際に用いた各種書類	30
A.1	実験に使用した NASA-TLX アンケート	31
A.2	実験に使用した SUS アンケート	36
A.3	実験に用いた実験手順書	40
A.4	自由記述欄の回答	42

目次

1.1 ユーザの手指を用いて仮想キーボードに触れることにより入力を行う様子. . .	2
3.1 想定する使用環境の例. 左: VR 使用時に想定している環境. 右: MR 使用時に想定している環境.	8
3.2 実物体の平面にキーボードを表示している様子. a: ピンチジェスチャをしている様子. b: 実物体表面に掌を合わせている様子. c: 仮想キーボードが配置される様子.	9
3.3 手の開き具合で拡張が行われるキーボード. 左: 指を大きく開いた場合. 右: 指を閉じた場合.	10
3.4 仮想キーボードの文字入力方法. a: 人差し指が何にも触れていない初期状態. b: 人差し指がキーに触れ, キーの色が赤色へ変化し, キーに対応する文字が入力される. c: 人差し指をキーから離すと, キーの色が白色に戻る.	10
3.5 3次スプライン補間の例.	12
3.6 与えている指先の座標.	12
3.7 三角形メッシュによって構成された面.	12
3.8 実物体表面を推定している例. 実物体表面に触れている手の各指先の座標(青色の丸)を用いた3次スプライン補間(青色の曲線)によって得られた座標を与えることにより, 実物体表面の形状に合わせた三角形メッシュ面を生成する.	13
3.9 仮想キーボードの外観. 左:左手用の Half-QWERTY. 右:右手用の Half-QWERTY.	14
3.10 入力文の表示例.	14
4.1 実験環境. 左: 実験参加者を正面から見た様子. 右: 実験参加者を左後ろから見た様子.	16
4.2 4つの実験条件における文字入力の様子. a: 空中に配置したキーボードにて入力している様子. b: 壁に配置したキーボードにて入力している様子. c: 机に配置したキーボードにて入力している様子. d: ももに配置したキーボードにて入力している様子.	16
4.3 4つの配置条件における平均 WPM.	19
4.4 4つの配置条件における平均 Total ER.	19
4.5 4つの配置条件における平均 NASA-TLX スコア.	20
4.6 4つの配置条件における平均 SUS スコア.	20

4.7 各条件における身体的要求の平均.	21
5.1 Oculus Quest のハンドトラッキングにおいて取得されている手の座標点. . .	23

第1章 序論

仮想現実（以下，VR）とは、「みかけは現実ではないが，実質的には，現実であること」である [日本 11]。VR においては，頭部装着ディスプレイ（以下，HMD）等の人間の視覚および聴覚に感覚提示を行うデバイスを用いて，人工的に作り出された現実に近い感覚がユーザに提示される。また，この人工的な感覚と現実の感覚を混合させ，現実のモノと仮想的なモノがリアルタイムで影響しあう新たな空間を構築する技術全般を複合現実（以下，MR）と呼ぶ [dSeSS09]。VR および MR は，実世界に存在する物理的な制約を克服できるという点において有望であるとされている [RH17]。そのため，アミューズメント分野（例えば，[Goo17, HY18]），医療分野（例えば，[MYA+19, 辻下 17]），および研究分野（例えば，[JRF+20]）などの多種多様な分野で注目されつつある。

1.1 VR システム上での文字入力

一般的なデスクトップ環境と同じように VR システム内においても，ブラウザにおける検索ワードの入力，アプリケーションにおけるログイン時のユーザ名，およびパスワード入力などの場面においてユーザは文字入力を要求される。VR システムにおける文字入力時には，HMD に対応する専用のコントローラ，あるいはユーザ自身の手指（例えば，[Ocu19]）を用いるのが一般的であり，コントローラを用いる場合は主に以下の2種類の手法がとられる。1つ目は，仮想オブジェクト（例えば，キーボードの文字キー）に触れる方法である。ユーザが持っているコントローラと文字入力用のインタフェースオブジェクトが VR システム内に表示され，コントローラを任意のオブジェクトに接触させることにより入力を行う。2つ目は，レイキャストを用いる方法である。コントローラから直線に発せられる光の筋（レイ）の先を任意のキーへ向けることにより入力を行う。手指を用いる場合にも主に以下の2種類の手法がとられる。1つ目は，コントローラと同様に仮想オブジェクトに触れる方法である（例えば，[DBWK19]）。この場合は，コントローラの代わりにハンドトラッキングセンサによって取り込まれたユーザの手指が VR システム内に表示され，表示された手指を任意のキーに接触させることにより入力を行う（図 1.1）。もう1つは，カーソルを用いる方法である。手の位置姿勢と連動したカーソルにより任意のキーを選択することにより入力を行う。MR システムにおいても同様の方法で入力を行う。

これら4種類の方法の内，ユーザの手指を用いる方法はコントローラのような追加デバイスを必要としないため HMD のみによってシステムが完結する。その中でも，VR システム上に表示されたユーザの手指を任意のキーに接触させることにより入力を行う方法が盛んに研

究されている [喜多 19, 福仲 19, DVK18]. しかし, この手法においてユーザはキーを入力できているかどうかを視覚情報および聴覚情報から判断することになる. 例えば, 手指がキーに触れたことは, キーの色や形状の変化, あるいはキーに触れた瞬間に生じる効果音から判断される. そのため, 現実世界のキーボード入力と異なり, ユーザには仮想キーボードに接触する感覚がなく, 触覚フィードバックの欠如が入力性能に影響を与えている可能性がある. 例えば, VR システム内のフリック入力において指がキーを大きく突き抜けてしまうことにより誤入力が発生するという報告がある [福仲 19]. さらに, 実世界の平面を用いて触覚フィードバックを付与した手法においては誤入力が多いが素早く入力が行えるという報告 [川口 19] および物理キーボードを用いた手法では通常のデスクトップ環境における文字入力速度との間に統計的な差は存在しないという報告もある [KSF⁺18, GWO⁺18]. しかし, これらの手法は触覚フィードバックを付与するために大掛かり, あるいは専用のデバイスを使用するため使用できる状況が限定されやすいという問題を抱えている [KKGS20].

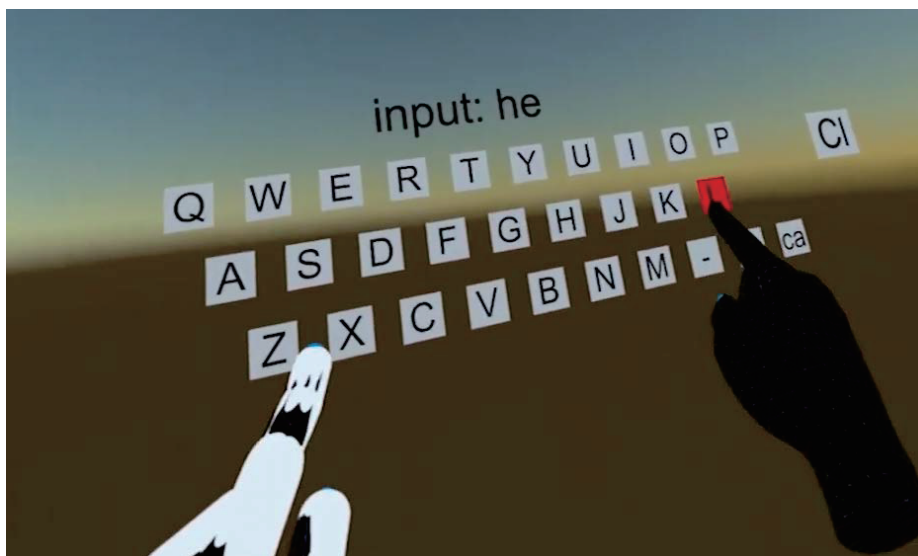


図 1.1: ユーザの手指を用いて仮想キーボードに触れることにより入力を行う様子.

1.2 目的およびアプローチ

本研究では, 実物体の表面を用いて触覚フィードバックを与える VR / MR 向け文字入力手法を設計し, 従来手法と比較することにより本手法の文字入力性能を調査する.

使用するセンサは HMD に搭載されているハンドトラッキングセンサのみであり, そのセンサによって実物体に触れている手の位置姿勢を取得し, その情報から推定した実物体表面に合わせるように文字入力用のインタフェースを表示する. これにより, 専用のデバイス等を必要とすることなく実物体の表面を入力面として使用することを目的とする.

1.3 貢献

本研究の貢献を以下に列挙する.

- 周囲の任意の実物体の表面を用いてユーザに触覚フィードバックを付与する VR / MR 向け QWERTY キーボード (以下, 本手法) を 考案した.
- 本手法の性能評価を行うことにより, 本手法の 特性を示した.

1.4 本論文の構成

本論文の構成を示す. 第 1 章においては, 本研究の背景を示した. 第 2 章においては, 関連研究を述べ, 本研究の位置付けを示す. 第 3 章においては, 本手法の設計および実装を述べる. 第 4 章においては, 本手法の入力性能を評価するために行った実験を述べる. 第 5 章においては, 本手法の改善点および展望を議論する. 第 6 章においては, 本研究の結論を述べる.

第2章 関連研究

本章では、まず、VRシステムにおける既存の文字入力手法として、コントローラを用いた文字入力手法およびVRシステムにおける手指を用いた文字入力手法を述べる。次に、文字入力に触覚フィードバックを付与する手法として、VRシステムにおける物理キーボード、あるいはタッチスクリーンを用いた文字入力手法、およびVRやMRにおいて実物体の表面を認識することで入力面として用いる手法について述べる。また、それらの手法に対する本研究を位置付ける。

2.1 VRシステムにおけるコントローラを用いた文字入力手法

VRシステムにおけるコントローラを用いた文字入力手法が提案されている [CP17, SFZK18, BK19]。Carter・Potter [CP17] は、タッチスクリーンにて使用されるキーボードを基にしたVRシステム用の仮想キーボードを提案している。仮想キーボードのキーは立体的であり、ユーザは手に持ったコントローラを任意のキーの内部へ移動させることによりキーを選択した後、コントローラに搭載されているタッチパッドに親指を用いて触れることにより選んだ任意のキーが入力される。また、Speicherら [SFZK18] は、VRシステムにおける文字入力にて考えられる6つの手法の性能およびユーザの好みを評価し、VRシステムにおける文字入力手法にはレイキャストを用いた手法が適していると述べている。Boletsis・Kongsvik [BK19] はコントローラを用いた4種類のコントローラを用いたVRシステム向け文字入力手法（レイキャスト、Drum-like キーボード、頭部追跡、分割キーボード）の中でレイキャストとDrum-like キーボードの入力性能が優れていると報告した。

これらの手法では、ユーザは手に持ったコントローラを用いて文字入力を行う。コントローラには多くのボタンがあるため、コントローラそのものを動かすだけでなく、キーボードの表示・非表示、および移動、あるいはキー選択の決定などの操作が割り当てられたボタンを押すことにより文字入力を行う。一方、本研究では手に何も持っていない状態におけるユーザ自身の手指を用いた文字入力手法を扱う。

2.2 VRシステムにおける手指を用いた文字入力手法

VRシステム内において文字入力をする際にユーザ自身の手指を用いる手法がある [喜多 19, 福仲 19, DVK18]。喜多ら [喜多 19] および福仲ら [福仲 19] はスマートフォンにおいてよく用いられる日本語入力向けフリックキーボードをVRシステムに応用した手法を提案した。これ

らの研究では、VRシステムにおいて手指を用いた平仮名入力ができるフリックキーボードを開発している。その内、喜多ら [喜多 19] は、QWERTY 配列キーボードとフリックキーボードを比較し、QWERTY 配列キーボードの方が入力速度および入力精度の両方で優れていると報告している。福仲ら [福仲 19] は、既存手法（レイキャスト+QWERTY 配列キーボード）と比較して同等以上の入力速度だが、誤入力の頻度が高くなると報告している。一方、Dudley ら [DVK18] は VR システム向けの QWERTY 配列キーボードを提案した。Dudley ら [DVK18] はタッチスクリーンにおける手指を用いた入力を模倣することにより仮想キーボード上のキーを選択する手法を提案した。ユーザの意図したテキストを推測する統計的なデコーダを併用することにより、最終的には入力速度が平均 17.75 WPM になると報告している。また、ユーザがキーを注視した後に手指で空中をタップするジェスチャを行うことでキーを選択する手法より、手指で直接キーに触れる手法の方がキーをすばやく選択できることを示している。

本研究では、Dudley ら [DVK18] と同様にコンピュータの文字入力において幅広く用いられている QWERTY 配列キーボードを用いている。しかし、先行研究 [喜多 19, 福仲 19, DVK18] ではキーボードが空中に配置されるため、文字入力時にユーザが触覚フィードバックを得ることができないのに対し、本研究ではユーザの周囲の実物体の表面を認識し、認識した表面上にキーボードを配置することにより、ユーザが触覚フィードバックを得ることを可能にする。

また、ユーザの身体上に入力面を配置することにより、ユーザの手指を用いて入力する際に触覚フィードバックを付与する手法が提案されている [川口 19, ZKM⁺19]。川口ら [川口 19] は、Leap Motion を用いて認識したユーザの掌上に日本語フリックキーボードを配置することにより、もう片方の手の人差し指によって入力する際にユーザに触覚フィードバックを与える手法を提案した。提案手法の文字入力速度、エラー率共に従来手法（[喜多 19, 福仲 19]）に劣っており、ハンドトラッキングセンサの精度の問題により入力する手で入力面としていたもう一つの手が隠れたことにより誤った手形状認識が行われたことが原因であると述べられている。Zhang ら [ZKM⁺19] は、リストバンド型の専用デバイスを装着することにより腕の皮膚を RF 導電路とし、それを指で触れたことを認識する手法を示した。また、これにより VR システムにおいてユーザの身体上を入力面とし、それに指を用いて触れて入力することを可能にした。

上記の 2 つの手法 [川口 19, ZKM⁺19] では、片方の手あるいは腕を入力面として使用しているために入力に片手しか使用することができず、入力に使用できる領域も狭いため使用できる文字入力インタフェースがフリックキーボードのような小型なものに限定される。本研究では、ユーザの周囲にある実物体を任意に選び使用する。そのため両手を入力に使用することができ、かつ入力に使用できる領域も広い。

Fashimpaur ら [FKL20] は、親指と他の指によるピンチ操作を用いた文字入力手法を提案した。QWERTY 配列を参考にしたアルファベット群と両手による計 8 種類のピンチ操作を対応させており、ユーザはピンチ操作によりアルファベット群を選択する。そして連続して選択されるアルファベット群から言語モデルによって最も可能性の高い単語を入力結果として表示する。入力速度は平均 12.54 WPM で既存手法 [DBWK19] には及ばないが少ない練習量かつピンチを用いた入力による速度としては優秀であると述べている。しかし、この手法は言

語モデルに存在しない文字列の入力には対応しておらず、不規則な文字列が推奨されるパスワード入力に適していない。本研究では、ユーザは QWERTY 配列キーボードに手指で触れることにより文字入力を行うため任意の文字列を入力することができる。

2.3 VR システムにおける物理キーボード、あるいはタッチスクリーンを用いた文字入力手法

VR システムにおける文字入力に物理キーボードを用いる手法が提案されている [PS19, KSF⁺18, GWO⁺18]。Pham・Stuerzlinger [PS19] は肩から吊るした物理キーボードを用いた入力を行う手法を提案した。着席での使用を前提とする従来の物理キーボードとは異なり物理的な動きを制限することなく、VR システム向けの柔軟性かつ効率的な文字入力を実現したと述べている。Knierim ら [KSF⁺18] は、8 台の OptiTrack カメラと手指およびキーボード上部に取り付けられた専用のマーカによってトラッキングしたユーザの手指と物理キーボードを VR システム内に表示することにより、ユーザが物理キーボードに触れながら文字入力することを可能にした。また、通常の物理キーボードを用いた入力と同等の入力速度にて文字入力することができることを明らかにした。Grubert ら [GWO⁺18] も、ユーザの手指およびキーボードを VR システム内に表示する手法と通常のデスクトップ環境における文字入力と比較して文字入力速度に統計的な差は存在しないと報告している。

VR システムにおける文字入力にスマートフォン、あるいはタブレット PC に搭載されているタッチスクリーンを用いる手法が提案されている [KK16, CWG⁺19]。Kim ら [KK16] は、スマートフォンとそのホバリング機能を用いた VR システム向けの文字入力手法を提案した。ホバリング機能によってキーの位置に対する親指の位置を取得することにより親指の位置と連動したカーソルを VR システム上に表示し、カーソルをキー上へ移動させた後に親指でスマートフォンの画面に触れることでキーの入力を行う。入力速度において従来手法と有意な差は見られなかったが、親指のホバリングを維持することにユーザがストレスを感じていたと報告している。Chen ら [CWG⁺19] はコントローラ、あるいは感圧タッチスクリーンを持つデバイスを用いた VR システム向けのジェスチャによる文字入力手法を提案した。コントローラの場合はレイキャスト、感圧タッチスクリーンの場合は親指を用いてキーボード上の任意のキーをなぞることで入力を行う。入力速度はコントローラを用いた場合が最大 34.2 WPM、スマートフォンを用いた場合が最大 22.4 WPM とコントローラを用いた場合の方が入力速度が速く、また使いやすさやタスク負荷においてもコントローラによるジェスチャ入力をユーザはより好んだと報告されている。

これらの研究では物理キーボードおよびユーザの手指を VR システム内に表示するために、手指や物理キーボードに取り付ける専用マーカ、およびそれらを追跡するための追加のセンサを必要とする。あるいは、スマートフォンやタブレット PC のような追加のデバイスを必要とする。一方で本研究では HMD 搭載のハンドトラッキングセンサのみを利用することによりユーザの手指およびキーボードを VR システム内に取り込むため、HMD 以外の物理キーボードや専用マーカ、追加のセンサを必要としない。

2.4 VR や MR における実物体の表面を認識することで入力面として用いる手法

ユーザが自身の周囲にある平面や日用品を文字入力の入力面として用いることにより触覚フィードバックを得ることを可能にする手法が提案されている [XST⁺18, ZSFK20].

Robert ら [XST⁺18] の MRTouch では, Microsoft HoloLens に搭載されている赤外線深度センサによって認識された実物体の平面に Windows のスタート画面および PDF ビューアなどのインタフェースあるいはコンテンツを表示させる. Zhou ら [ZSFK20] の Gripmarks では, ハンドトラッキングセンサによって認識された日用品を握っている時のユーザの手形状から機械学習を用いて握っている日用品を推定して VR 空間内に描画する. その後, その描画されたオブジェクト上にテンキーおよび方向キーを表示する.

これらの手法では認識できる実物体が極めて限定的である. MRTouch [XST⁺18] は平面のみ, Gripmarks [ZSFK20] は学習している形状の日用品のみ認識可能である. 加えて, MRTouch [XST⁺18] で使用している Microsoft HoloLens および Gripmarks [ZSFK20] で使用している OptiTrack はセンサが高価であり, OptiTrack においてはトラッキング用の専用マーカの取り付けと複数のカメラの配置が必要である. 本研究では, 一般消費者向けの低価格 HMD に内蔵されているハンドトラッキングセンサのみを用いることで実物体の認識を可能とする. また, 実物体に触れている手の位置姿勢からその都度実物体表面を推定するため, 上記の手法 [XST⁺18, ZSFK20] よりも認識可能な実物体の幅は広い.

第3章 実物体表面を用いた文字入力手法

本章では実物体表面を用いた文字入力手法を示す。以下では、まず、この手法の想定する使用環境を述べる。次に本手法に基づくアプリケーションの使用方法を示したのち、その実装の詳細を述べる。

3.1 想定する使用環境

本手法はVRおよびMRで使用することを想定している。VRシステムにおいて使用する場合は、周囲にある机、および壁などの実物体の位置をユーザが把握しており、かつ手の届く範囲に入力に適した実物体が存在する環境を想定している（図3.1左）。また、MRシステムにおいて使用する場合は、ユーザが自由に動き回り任意の実物体を使用することを想定している（図3.1右）。なお、入力面として使用する実物体がユーザに対して相対的に静止していない場合における使用は想定していない。



図 3.1: 想定する使用環境の例。左：VR 使用時に想定している環境。右：MR 使用時に想定している環境。

3.2 配置手順

本手法における仮想キーボードの配置手順を図3.2に示す。ユーザはまず、どちらかの手で親指と人差し指を用いてつまむジェスチャ（以下、ピンチジェスチャ）を行う（図3.2a）。その後、ピンチジェスチャを行った手を仮想キーボードを配置したい実物体に対して掌全体を合わせるように置く（図3.2b）。その状態で3秒間待機することにより実物体表面上に仮想

キーボードが配置される (図 3.2c) . 配置される仮想キーボードは QWERTY 配列キーボードを 2 つに分割したキーボードである . したがって , 右手にてキーボードを配置した場合には QWERTY 配列キーボードの右半分が , 左手にてキーボードを配置した場合には左半分が表示される (図 3.9) . また , キーボードが配置された状態で再度 , 仮想キーボードを配置するための一連の手順を行うと , その場所に新たな仮想キーボードが表示され , 先に表示していた仮想キーボードは全て消滅する .

配置される仮想キーボードの横幅は配置時の掌の親指から小指までの距離と同じになるため , 配置時の手の開き具合によってキーボードおよびキーの大きさを調整することができる (図 3.3) . なお , キーボードの縦幅は横幅によらず一定である .

ユーザは配置された仮想キーボードに対して両手の人差し指を用いて入力することができる (図 3.4) . ユーザの人差し指が何にも触れていない状態 (図 3.4a) からキーに触れることにより , 触れられたキーの文字が入力され , キーの色が白色から赤色に変化する (図 3.4b) . その状態にてキーから人差し指を離すとキーの色が白色に戻る (図 3.4c) .

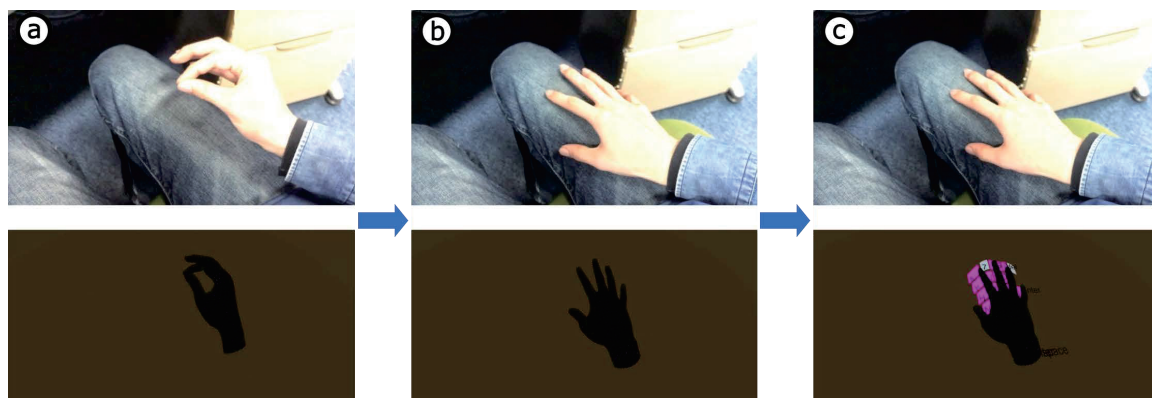


図 3.2: 実物体の平面にキーボードを表示している様子 . a : ピンチジェスチャをしている様子 . b : 実物体表面に掌を合わせている様子 . c : 仮想キーボードが配置される様子 .

3.3 実装

以下に仮想キーボードを配置する実物体平面の推定方法 , および仮想キーボードの設計を述べる .

3.3.1 実物体表面の推定

本手法では , ユーザが掌全体で実物体の表面に触れている時における各指先の座標を用いた 3 次スプライン補間および手の位置姿勢によって実物体表面を推定する . 手の位置姿勢から実物体の大まかな位置姿勢を推定する . 次に , 各指先の座標を用いた 3 次スプライン補間



図 3.3: 手の開き具合で拡張が行われるキーボード. 左: 指を大きく開いた場合. 右: 指を閉じた場合.

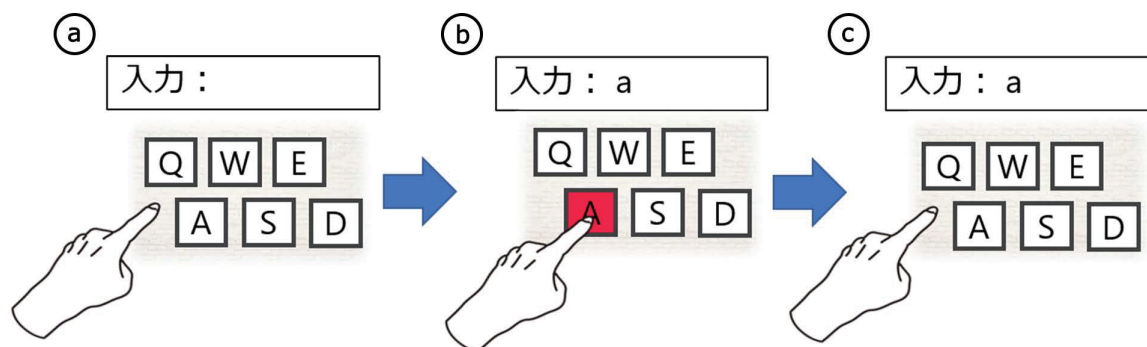


図 3.4: 仮想キーボードの文字入力方法. a: 人差し指が何にも触れていない初期状態. b: 人差し指がキーに触れ, キーの色が赤色へ変化し, キーに対応する文字が入力される. c: 人差し指をキーから離すと, キーの色が白色に戻る.

によって実物体表面の曲がり具合を推定することにより, 実物体表面に合わせてキーボードを配置する (図 3.7).

3.3.1.1 3次スプライン補間の概要

補間する領域をデータ間隔 $[x_i, x_{i+1}]$ に区切り, その近傍の値を用いて低次の多項式でデータ間隔内を近似することを考える際, それぞれの境界で導関数が連続になるように近似する方法をスプライン補間という. その中でも, 各区間での補間に用いる関数が3次関数であるものは3次スプライン補間と呼ばれる.

例えば, $N + 1$ 個のデータ点 $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)$ を与えられた時, 区間 $[x_i, x_{i+1}]$ で3次スプライン補間に用いる関数を $S_j(x)$ とすると, 関数のグラフは図 3.5 のようになる. この時, 隣接する2点のデータ点 $(x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1})$ ($i = 0, 1, 2, \dots, N$) の間はセグ

メントと呼ばれ、区間 $[x_i, x_{i+1}]$ 内の補間に用いる区分多項式 $S_j(x)$ は式 3.1 のように表せる.

$$\begin{aligned} S_i(u) &= a_i u^3 + b_i u^2 + c_i u + d_i \\ u &= x - x_i, 0 \leq u \leq L_i, L_i = x_{i+1} - x_i \end{aligned} \quad (3.1)$$

係数 a_i, b_i, c_i, d_i はセグメントの接続点において、 $S'_i(L_i), S_i(L_i), S'_i(0), S_i(0)$ を与えることで求められる. 式 3.1 をこれら 4 つの値に置き換えると式 3.2 のように表せる.

$$\begin{aligned} S_i(u) &= S_i(0) + S'_i(0)u + [3\{S_i(L_i) - S_i(0)\} - L_i\{2S'_i + S'_i\}]u^2/L_i^2 \\ &+ [2\{S_i(0) - S_i(L_i)\} + L_i S'_i(0) + S'_i(L_i)]u^3/L_i^3 \end{aligned} \quad (3.2)$$

式 3.2 において、 $S_i(0), S_i(L_i)$ はデータ点として与えられるため、 $S'_i(0), S'_i(L_i)$ を求めることで 3 次スプラインを求めることができる. これらの 1 階導関数の値は、各セグメントの接続点において、関数の独立変数に関する 2 階導関数が連続という条件と、データ点列の両端点である $(x_0, y_0), (x_N, y_N)$ において自然スプラインと呼ばれる $S''_1(0) = 0, S''_{N-1}(L_{N-1}) = 0$ という条件を用いた時、自然スプラインのデータ点上における 1 階導関数 S'_i の値は、式 3.3 によって得られる.

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} 4 & 2 & 0 & 0 \\ L_2 & 2(L_1 + L_2) & L_1 & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ & L_{N-1} & 2(L_{N-2} + L_{N-1}) & L_{N-2} \\ 0 & 0 & 2 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S'_1 \\ S'_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ S'_{N-1} \\ S'_N \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 6D_1/L_1 \\ 3(L_1^2 D_2 + L_2^2 D_1)/L_1 L_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ 3(L_{N-2}^2 D_{N-1} + L_{N-1}^2 D_{N-2})/L_{N-2} L_{N-1} \\ 6D_{N-1}/L_{N-1} \end{bmatrix} \quad (3.3) \\ &D_i = y_{i+1} - y_i, (i = 1, 2, \dots, n-1) \end{aligned}$$

式 3.3 を解くことにより、 a_i, b_i, c_i, d_i を求めることができる.

本研究では、ハンドトラッキングによって取得したユーザの五指の指先の座標の内、 x_i 要素として手の横幅方向の座標、および y_i 要素として手の奥行方向の座標をデータ点として与えている (図 3.6).

3.3.1.2 三角形メッシュ面の概要

推定した実物体表面、およびそこに配置する仮想キーボードは図 3.7 のように三角形のポリゴンメッシュ (以下、三角形メッシュ) によって構成された面 (以下、三角形メッシュ面)

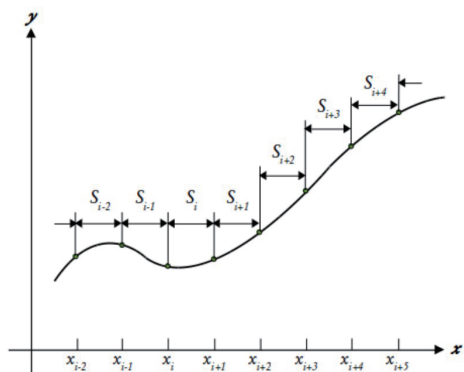


図 3.5: 3 次スプライン補間の例.

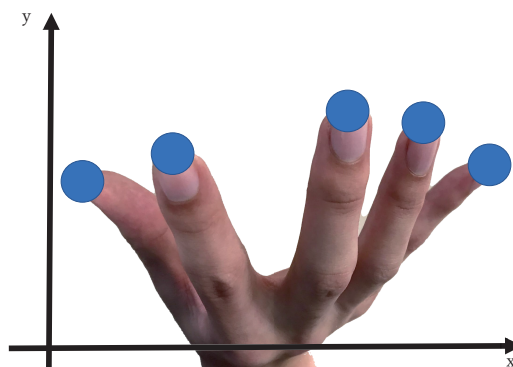


図 3.6: 与えている指先の座標.

として実装されている．この面は三角形メッシュを構成する各頂点の座標によって形状が決定される．ユーザの五指の指先の座標を与えた 3 次スプライン補間によって得られた座標を各頂点の x 座標，および y 座標に与えることで，図 3.8 のように掌で触れている実物体表面を推定し，その表面上に仮想キーボードを配置することができる．ただし，この方法では曲面の推定は球形ではなく円柱形のものに限られる．また，与える座標の x 座標の範囲は親指の x 座標から小指の x 座標となり，これがキーボードの横幅を決定する．そのため，手の開き具合によって，図 3.3 のようにキーの大きさおよびキー間の距離が拡張される．

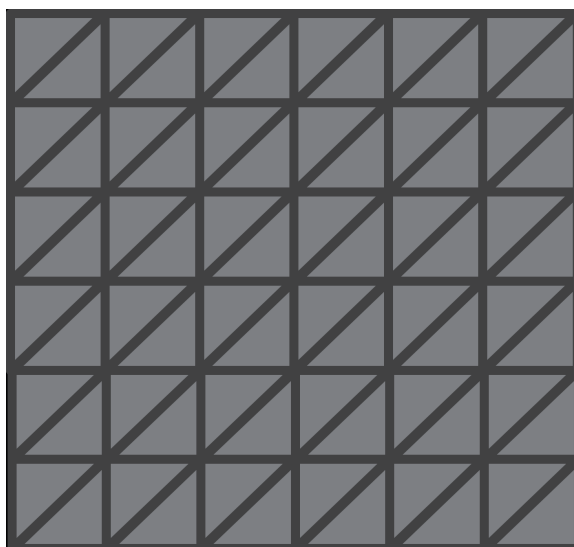


図 3.7: 三角形メッシュによって構成された面.

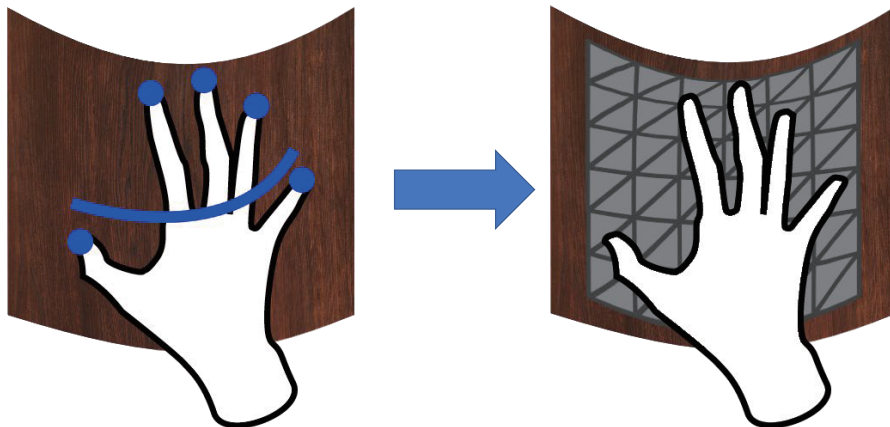


図 3.8: 実物体表面を推定している例。実物体表面に触れている手の各指先の座標（青色の丸）を用いた 3 次スプライン補間（青色の曲線）によって得られた座標を与えることにより、実物体表面の形状に合わせた三角形メッシュ面を生成する。

3.3.2 仮想キーボードの設計

表面の推定を片手の掌で行っているため、配置される仮想キーボードは片手用のものが望ましい。また、2.2 節で述べたように、片方の手や腕を入力面として使うことがないため両手による入力が可能であるということが実物体の平面を用いる利点である。このことから、キーボードの設計には Matias らの Half-QWERTY[MMB94] のキー配列を参考にした (図 3.9)。

小澤ら [小澤 15] は仮想キーボードのキーの大きさは 17.5 mm ないし 26.3 mm が好ましいと述べている。可能な限りキーが大きい方がユーザが入力しやすいと考え、1 辺 26.3 mm の正方形をキーの形状の基準とした。しかし、キーボードおよびキーの横幅はユーザの親指の先から小指の先までの長さによって拡張されるため、同じユーザであっても手の開き具合の違いにより同じ長さの 1 辺の正方形にはならない。Boyle ら [BBB15] がピアノの初心者が手を広げた時の親指から小指までの長さの平均は 208 mm であると報告していることから、20.8 mm がキーボードの横幅となる場合にキーの 1 辺が 26.3 mm になるようにした。三角形メッシュの面の頂点の数を 1 辺 41 個にし、キー一つが占めるメッシュ面の頂点の数を 6 個とすることにより、 $(208 \text{ mm} / 40) \times 5 = 26.0 \text{ mm}$ となる。

Dudley ら [DBWK19] が仮想キーボードでは触覚フィードバックの有無に関係なく、多くの指を使用した方が入力性能が悪くなると報告していたため、入力に使用する指は両手の人差し指のみとした。

既存手法 [CP17, DVK18] のようにキーボード上部に入力文を表示する場合、キーボード同士が接近しすぎると横へ長く伸びた入力文が片方のキーボードや入力文に被るため、入力文をユーザの頭部の位置姿勢と連動させることにより、常にユーザの視界中央の上に表示されるようにしている (図 3.10)。

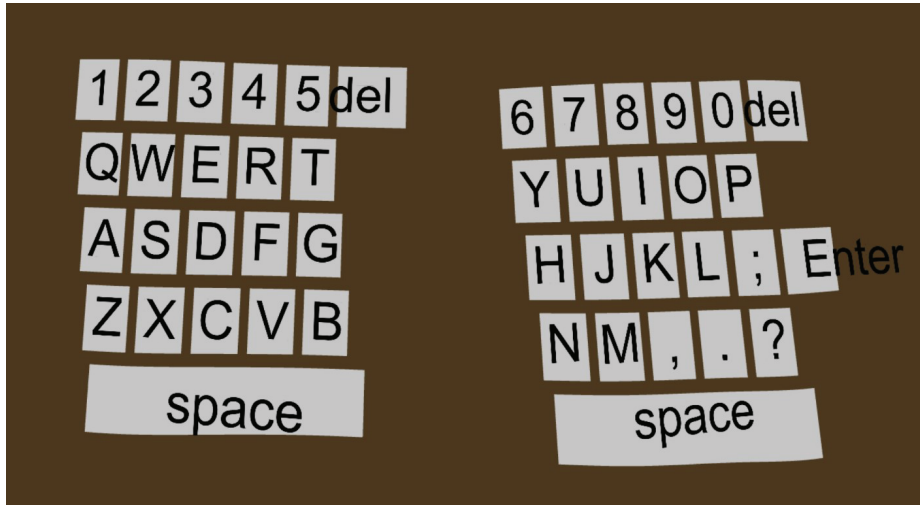


図 3.9: 仮想キーボードの外観. 左: 左手用の Half-QWERTY. 右: 右手用の Half-QWERTY.

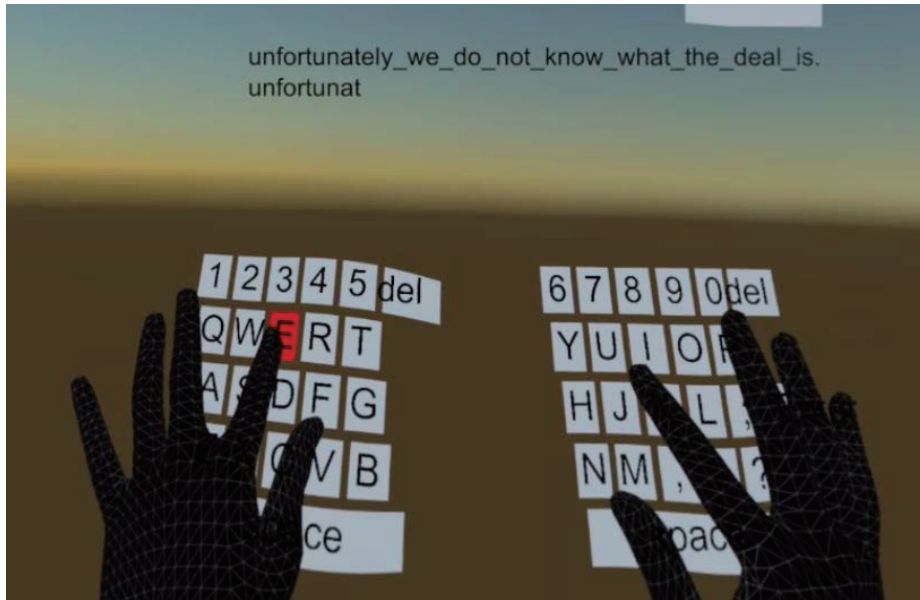


図 3.10: 入力文の表示例.

第4章 実験：実物体表面を用いる手法の性能評価

実物体表面を用いた手法の性能を調査および評価するために実験を行った。本章では、実験設計および手順を述べた後に、実験の結果を述べる。

4.1 実験設計

以下に実験に使用した機器，実験参加者および実験環境，ならびにキーボードの配置条件を述べる。

4.1.1 機器

実験に用いた HMD は Oculus Quest であり，コンピュータは HP OMEN by HP 17-an012TX (CPU: Intel(R) Core i7-7700HQ, メモリ: 16 GB RAM, GPU: NVIDIA(R) GeForce(R) GTX1070, OS: Windows 10 Pro) を用いた。また，ハンドトラッキングには Oculus Quest に標準で搭載されているセンサを用いた。

4.1.2 実験参加者および実験環境

研究室内の 4 名 (22–23 歳，平均年齢 22.25 歳，全員男性，全員右利き) がボランティアとして実験に参加した。全実験参加者は日常的に QWERTY 配列のキーボードを用いて文字入力を行っていた。実験前に 7 段階のリッカート尺度 (高いほど「ある」，低いほど「ない」) にて質問したところ，VR 用 HMD の使用経験には平均 1.5 ($SD = 0.5$)，英文を読み写すことに対する自信は平均 4.0 ($SD = 1.22$) であった。実験を行った環境を図 4.1 に示す。太陽光による外乱の影響を除くために直射日光が当たらない環境にて実験を行った。

4.1.2.1 キーボードの配置条件

キーボードを空中に配置する場合 (図 4.2a)，壁 (床に対して水平な平面) に配置する場合 (図 4.2b)，机 (床に対して垂直な平面) に配置する場合 (図 4.2c)，ユーザのもも (ユーザの周囲にある曲面) に配置する場合 (図 4.2d) の 4 つの配置条件にて実験参加者は文字入力を行った。



図 4.1: 実験環境. 左: 実験参加者を正面から見た様子. 右: 実験参加者を左後ろから見た様子.

キーボードを空中に配置する際、実験参加者は肘を曲げながら手を胸の高さまであげた位置にキーボードを配置する。キーボードを壁に配置する場合も空中に配置する場合と同様に手を胸の高さまであげ、その手が壁に触れるように椅子の位置を調整した。キーボードを机に配置する際に使用する机の高さは JIS S 1010 [日本 78] に従い 70 cm とした。

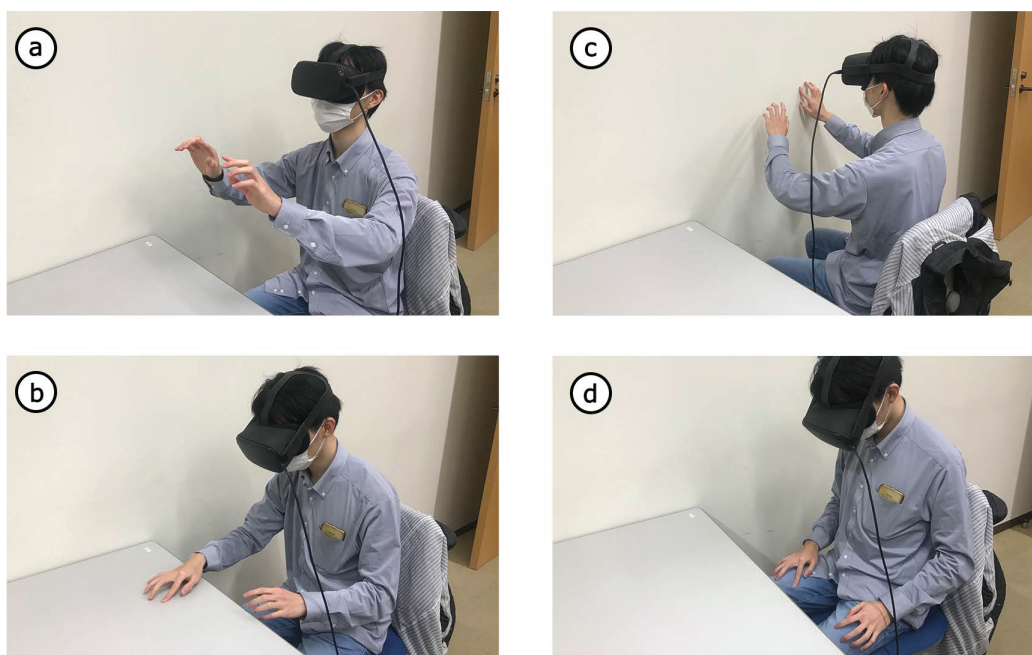


図 4.2: 4つの実験条件における文字入力の様子. a: 空中に配置したキーボードにて入力している様子. b: 壁に配置したキーボードにて入力している様子. c: 机に配置したキーボードにて入力している様子. d: ももに配置したキーボードにて入力している様子.

4.2 評価指標

評価に用いる指標には、文字入力速度を測定するための Words Per Minute (以下, WPM) [AS09], 文字誤入力率を計測するための Total Error Rate (以下, Total ER) [SM03], ワークロード評価のために NASA Task Load Index (以下, NASA-TLX) [芳賀 96], ユーザビリティ評価のための System Usability Scale (以下, SUS) [Bro96] の 4 つを使用した。

WPM は、式 (4.1) 通りに定義される。

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

この T は入力文字数, S は 1 文字目が入力されてからの入力時間 (秒) である。

Total ER は、式 (4.2) 通りに定義される。

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

この C は正しく入力された文字数, INF は誤って入力され修正されなかった文字数, IF 誤って入力された後修正された文字数である。

NASA-TLX および SUS をアンケートを用いて評価する。NASA-TLX のスコアは大きいほど作業負荷が高いことを示し, SUS のスコアは大きいほどユーザビリティが高いことを示す。実験に用いたアンケートおよびその説明は付録に掲載する (付録 A.1, A.2)。

4.3 実験手順

実験は以下の手順にて行われた。まず, 実験参加者には文字入力方法および実験システムの使用方法を説明し, 椅子に座り HMD を装着するように指示した (図 4.1)。

その後, 練習タスクとして, ユーザに 5 分間, 任意の入力およびキーボード配置を行ってもらった。練習タスク終了後, 約 5 分の休憩を設け, 本番タスクを行った。また, 練習タスクが 5 分未満だった場合には, 練習タスクが終わり次第休憩を開始した。本番タスクでは, 4 つの配置条件において, それぞれランダムに表示される短文を 10 文入力した。この短文は Dudley ら [DBWK19] の実験設計に基づき, Vertanen ら [VK11] のフレーズセットの内, 4 語以上かつ 40 文字以内のものを使用している。表 4.1 に実験に用いたフレーズセットの一部を示す。Vertanen らのフレーズセットとは, 実際にメール文にて使用されていること, フレーズを覚えやすいこと, QWERTY 配列キーボードにおける入力に適していることを考慮したフレーズセットである。また, 実験参加者には文字をなるべく正確かつ速く入力するように指示した。1 つの配置条件で 10 文入力し終わるたびに, 実験参加者には NASA-TLX, SUS を調査するためのアンケート, および自由記述のアンケートへの記入を行ってもらい, その後約 5 分間の休憩を設けた。

表 4.1: 実験に用いたフレーズセットの一部. 実装したキーボードでは小文字しか入力できないため大文字を小文字化している. アンダーバーの部分において実験参加者はスペースを入力している.

ID	フレーズ	文字数
1	thanks,_i_will_look_at_it_tonight.	34
2	this_will_be_hard.	18
3	hopefully_it_cheered_you_up_a_bit.	34
4	we_are_working_on_this_as_we_speak.	35
5	how_about_9_in_my_office_on_3825?	33
6	have_a_good_evening.	20
7	sounds_good_to_me.	18
8	yes_i_am_here_actually.	23
9	tonight_is_my_anniversary.	26
10	will_follow_up_today.	21

4.4 結果

独立変数は配置条件であり, 従属変数は WPM, Total ER, NASA-TLX の平均スコア, および SUS の平均スコアである. 分析には, 反復測定一元配置分散分析を用いており, 事後多重比較には Tukey の HSD 検定を用いた. なお検定に用いた有意水準は 5% である. なお, 図 4.3, 図 4.4, 図 4.4, および図 4.5 中に示すエラーバーは標準偏差を表す.

4.4.1 WPM

各配置条件における平均 WPM を図 4.3 に示す. 平均 WPM はキーボードを空中に配置する場合において 10.4 ($SD = 1.70$), 壁に配置する場合において 10.4 ($SD = 0.78$), 机に配置する場合において 10.0 ($SD = 0.93$), ももに配置する場合において 9.9 ($SD = 1.03$) であり, 分析の結果, 条件間には有意な主効果は存在しなかった ($p = 0.726056 > 0.05$).

4.4.2 Total ER

各配置条件における平均 Total ER を図 4.4 に示す. 平均 Total ER はキーボードを空中に配置する場合において 9.7 ($SD = 5.15$), 壁に配置する場合において 10.7 ($SD = 3.43$), 机に配置する場合において 9.4 ($SD = 5.85$), ももに配置する場合において 12.4 ($SD = 3.04$) であり, 分析の結果, 条件間には有意な主効果は存在しなかった ($p = 0.61748 > 0.05$).

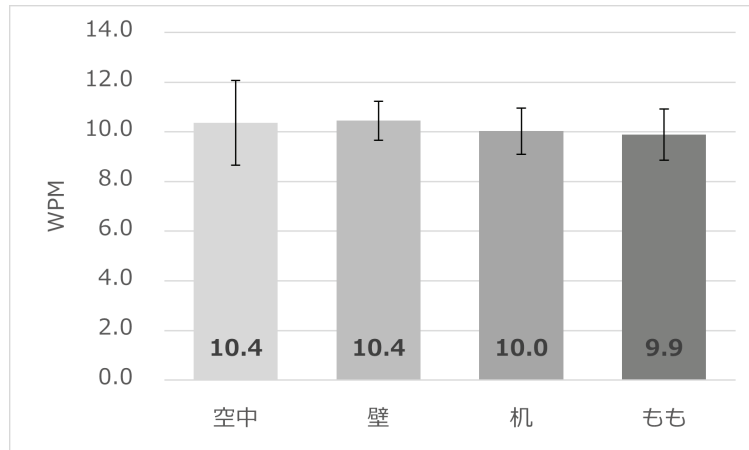


図 4.3: 4 つの配置条件における平均 WPM.

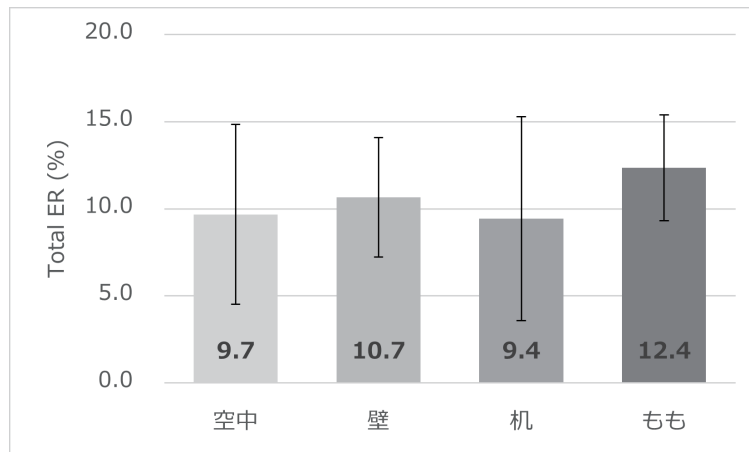


図 4.4: 4 つの配置条件における平均 Total ER.

4.4.3 NASA-TLX

各配置条件における NASA-TLX の平均スコアを図 4.5 に示す。NASA-TLX の平均スコアはキーボードを空中に配置する場合において 43.6 ($SD = 17.74$)，壁に配置する場合において 52.3 ($SD = 5.42$)，机に配置する場合において 39.7 ($SD = 9.23$)，ももに配置する場合において 51.3 ($SD = 16.52$) であり，分析の結果，条件間には有意な主効果は存在しなかった ($p = 0.199150 > 0.05$)。

4.4.4 SUS

各配置条件における SUS の平均スコアを図 4.6 に示す。SUS の平均スコアはキーボードを空中に配置する場合において 77.5 ($SD = 5.30$)，壁に配置する場合において 72.5 ($SD =$

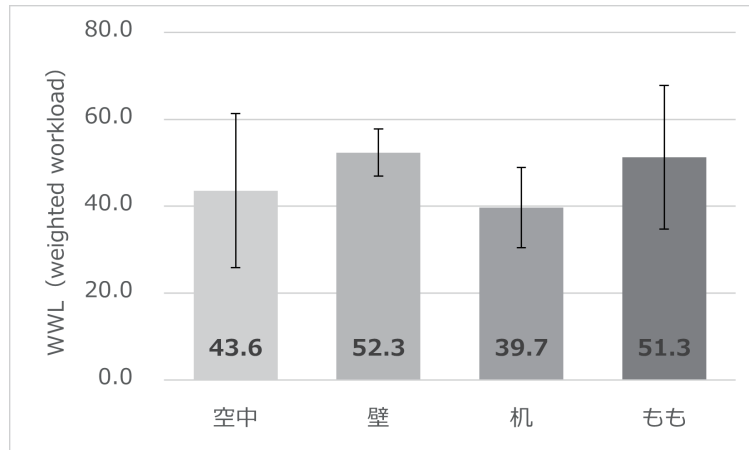


図 4.5: 4 つの配置条件における平均 NASA-TLX スコア.

15.91), 机に配置する場合において 78.8 ($SD = 9.60$), ももに配置する場合において 76.3 ($SD = 9.44$) であり, 条件間には有意な主効果は存在しなかった ($p = 0.73163 > 0.05$).

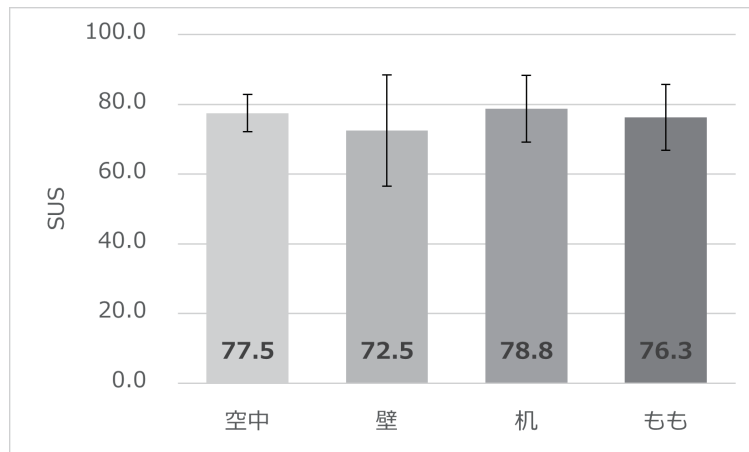


図 4.6: 4 つの配置条件における平均 SUS スコア.

4.5 考察

平均 WPM については, 空中に配置した場合と壁にした場合の WPM が最も高くなったが, 最も低かったももに配置した場合との差が 0.4 であり, 大きな差は見られなかった. Speicher ら [SFZK18] が行った実験によると, VR システムにおける自身の指を用いた QWERTY 配列のキーボードの入力速度は平均 9.77 WPM ($SD = 4.78$) であり, 空中に配置した場合における WPM は妥当であると考えられる. このため, 4 つの配置条件における WPM に大きな差が

なかったのは、キーボードの位置に関係なく実験参加者の人差し指を動かす速度が同じだったためだと推測できる。

平均 Total ER については、ももに配置した場合がその他の配置条件と比べて高かった。この要因として、他の条件と比較して入力面として狭く、そのため配置するキーボードおよびキーが小さくなったことが原因であると考えられる。Jeong ら [KAT⁺13] によると一辺 13 mm のキーによる文字入力ではキーが見えづらく指同士の間隔が不十分になることで入力速度が低下すると述べられている。4つの配置条件の中でももに配置した場合が最も WPM が低い要因も、Total ER が高いことから誤入力が多かったことが原因であると考えられる。

平均 NASA-TLX スコアについては、机に配置した場合が最も低くなった。この要因として、配置場所による身体的負荷の影響が考えられる。NASA-TLX の評価項目の内、身体的負荷を意味する身体的要求の平均スコアを図 4.7 に示す。身体的要求の値は机に配置した場合が最も低く、その他の条件が高かった。この要因として、空中に配置した場合と机に配置した場合においては手を胸の高さまであげる必要があるため疲労が高まったと考えられる。また、ももに配置した場合においては、自由記述アンケートの結果（付録 A.4）にて「首が痛かった.」、「首に疲労を感じた.」という意見が見られたことから、HMD(実験に用いた Oculus Quest は実測で 585.1 g) を装着した状態にてキーボードを見下ろすような姿勢をとり続けたことが身体的負荷に繋がったと考えられる。

平均 SUS スコアについては、机に配置した場合が最も高くなった。この要因として、NASA-TLX の場合と同様に配置場所による身体的負荷の差が考えられる。SUS はユーザビリティの評価であるため、身体的負荷（身体的要求）の低さが SUS スコアにおいても影響を与えたと推測できる。また、平均 NASA-TLX スコアにおける優秀な順と平均 SUS スコアにおける優秀な順が一致している。

4つの場合を比較すると、WPM においては僅差ではあるが空中に配置する場合が最も優れていた。しかし、Total ER, NASA-TLX, SUS においては机に配置する場合が最も優れており、総合的には机に配置する場合が最も優れていたと考えられる。

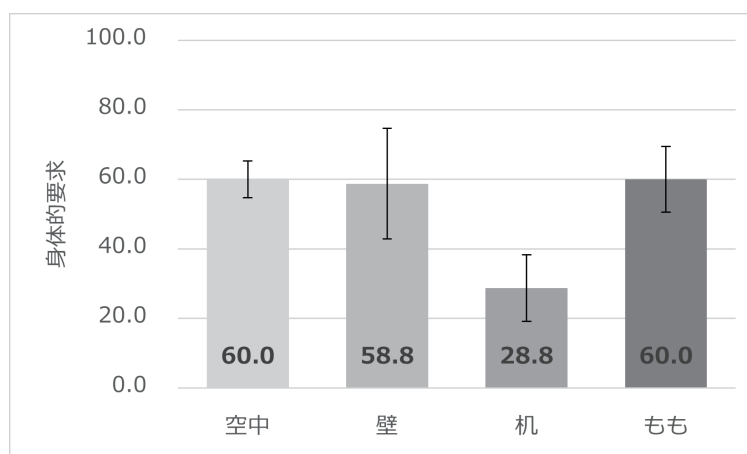


図 4.7: 各条件における身体的要求の平均。

第5章 議論

本章では実験の結果に基づいて触覚による効果，キーボードの表示位置による影響，実物体の表面の形状による影響を議論する。

5.1 触覚による効果

空中に配置した場合と比較すると壁に配置した場合は WPM は同等であった一方で，Total ER，NASA-TLX，および SUS は劣り，触覚フィードバックを付与することにより入力性能が向上するという予測と逆の結果となった。自由記述アンケートによると「キーが壁から浮いていて，キーに触れて入力できたら壁に触れる前にキーから指を話すこともあった。」というコメントがあった。このことから正確に実物体表面上にキーボードを配置できていなかったために Total ER，NASA-TLX，および SUS が低くなった可能性がある。今後，実物体表面に配置したキーボードと実物体表面との間にどの程度のズレがあるかの調査，およびズレを少なくすることを目的としたシステムの改善を行う必要がある。

5.2 キーボードの表示位置による影響

ユーザの身の回りにある入力面として使用できるだけの表面積を持つ実物体は常に同じとは限らない。そのため，使用場面によりキーボードを表示する場所が変化することにより，入力性能に差が現れると考えられる。実物体の表面を入力面として使用している場合において，キーボードの表示位置（使用している実物体の表面）は，腕あるいは手を上げる必要のない地面に対して水平であると入力性能が向上すると考えていた。実験においても机に仮想キーボードを配置した場合が Total ER が最も低く，NASA-TLX スコアが最も低くなり，かつ SUS スコアが最も高い結果となった。このことから入力性能に影響を与えていた要因が触覚フィードバックではなく，仮想キーボードの配置位置および角度であると考えられる。そのため，机に配置した場合と同じ位置の空中に仮想キーボードを配置した場合における入力性能の調査が必要がある。

5.3 実物体の表面形状による影響

本研究で提案した手法では，多様な種類の実物体表面を入力面として使用することができる。しかし，実験結果より，実物体表面が小さいとそれに応じて仮想キーボードおよびキー

も小さくなるために入力性能が低くなる可能性がある。しかし、行った比較が机とももであり、入力性能の低さが実物体表面の大きさによるものなのか、あるいは実物体の曲率によるものなのかが定かではない。同じ実物体に対して、指を大きく広げキーボードを大きくする場合と指を畳みキーボードを小さくする場合で入力性能を比較する必要がある。

5.4 今後の展望

現状、実物体の表面の推定に用いている3次スプライン補間では、円柱状の物体の表面しか推定することはできず、より複雑な物体の表面を推定することが不可能である。しかし、NURBS 曲面 [Far95] を用いた補間により、この問題を解決できる可能性がある。NURBS とは、Non-Uniform Rational B-Spline (非一様有理 B スプライン) の略称であり、コンピュータグラフィックス分野において曲線や曲面を生成するため用いられる一般的な数学的モデルである。ハンドトラッキングでは図 5.1 のように指先以外にも手における多くの座標点 (Oculus Quest の場合は 23 点) を取得している。この座標点を与えて NURBS 曲面を用いた補間を行うことにより、円柱形状や球形状など3次スプライン補間よりも自由な曲面の推定が可能になると考えられる。また、補間に用いる座標点が増えることにより、実物体表面に配置したキーボードと実物体表面の間にあるズレを軽減できる可能性がある。

現状のシステムは VR システムとしてのみ実装している。これを HoloLens をはじめとする MR システムへ移植し、MR システムにおける入力性能の調査を行う。

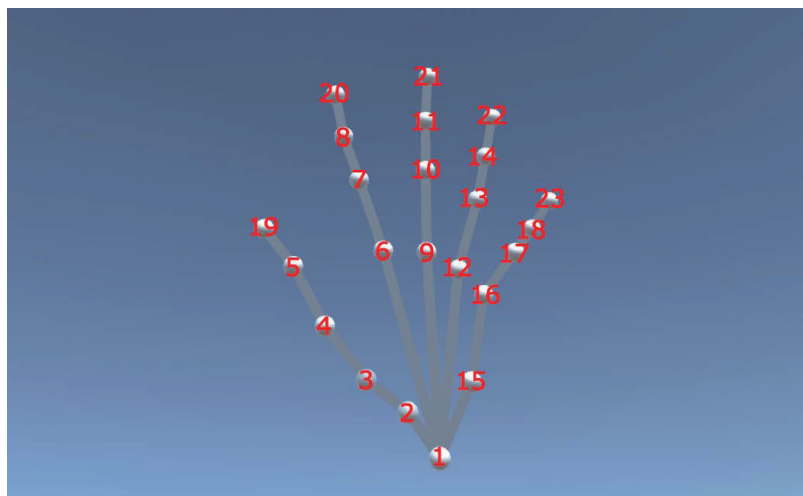


図 5.1: Oculus Quest のハンドトラッキングにおいて取得されている手の座標点。

第6章 結論

本研究において、実物体の表面を用いて触覚フィードバックを与える VR / MR 向け文字入力手法を提案し、その文字入力性能を調査した。提案した手法では、ユーザの五指の指先の座標を用いた3次スプライン補間によって、ユーザの掌全体が触れている実物体の表面の形状を推定し、そこへ仮想キーボードを拡縮しながら配置する。この提案手法を用いて、実物体として壁、机、ももに仮想キーボードを配置して触覚フィードバックを与える場合と、仮想キーボードを空中に配置するために触覚フィードバックがない場合（従来手法）との比較を行った。その結果、4つの条件において、実験参加者間においては有意な主効果があったが、条件間においては有意な主効果が見られなかった。しかし、4つの評価手法の内、Total ER, NASA-TLX, SUS の3つにおいて、机に仮想キーボードを配置した場合が最も優秀な結果となった。これは、触覚フィードバックではなく、仮想キーボードの配置位置および姿勢が影響を与えている可能性がある。今後は、NURBS 曲面を用いた補間を実装することによる更なる自由な実物体表面の推定を可能にするとともに、仮想キーボードの位置姿勢による入力性能の調査、実物体表面に対する仮想キーボードの配置精度の調査、および指の開き具合とそれに対応するキーボードの大きさにおける入力性能の調査を行っていく。

謝辞

本研究を進めるにあたり，志築文太郎先生，高橋伸先生，川口一画先生には多くのご意見とご指導を頂きました。特に志築文太郎先生には，研究の進め方を基礎からご指導いただいたのみならず，研究の相談や論文執筆に関して多くのご助言を頂きました。深く感謝いたします。インタラクティブプログラミング研究室の同輩，先輩方には研究活動において様々なご助言を頂きました。また，WAVE チームの皆様にはチームゼミにおいて的確なご意見を多く頂きました。これらのご意見が研究を進める上で頼れる道標となりました。大変感謝しております。特に，池田凌氏には研究方針や論文執筆など本研究に対して多くの重要なご助言を頂いたのみならず，共著者として数えきれないほどのご協力を頂きました。心よりお礼申し上げます。また，実験に参加していただいた皆様には，ご協力頂きましたことを大変感謝しております。最後に，筆者を育て，様々な面において研究生活を支えてくださった家族，そして研究生活においてお世話になった全ての方々へ心より感謝いたします。

参考文献

- [AS09] Ahmed Sabbir Arif and Wolfgang Stuerzlinger. Analysis of text entry performance metrics. In *2009 IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity (TIC-STH)*, pp. 100–105, 2009.
- [BBB15] Rhonda Boyle, Robin Boyle, and Erica Booker. Pianist Hand Spans: Gender and ethnic differences and implications for piano playing. In *Proceedings of the 12th Australasian Piano Pedagogy Conference*, pp. 1–79, 2015.
- [BK19] Costas Boletis and Stian Kongsvik. Controller-Based Text-Input Techniques for Virtual Reality: An Empirical Comparison. *International Journal of Virtual Reality*, Vol. 19, No. 3, pp. 2–15, 2019.
- [Bro96] John Brooke. SUS ‘A quick and dirty’ usability scale. *Usability Evaluation in Industry*, 1996.
- [CP17] Lewis Carter and Leigh Ellen Potter. Spatial Virtual Keyboard for Wand Based Virtual Reality. In *Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction, SUI ’17*, pp. 161–161, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [CWG⁺19] Sibó Chen, Junce Wang, Santiago Guerra, Neha Mittal, and Soravis Prakkamakul. Exploring Word-Gesture Text Entry Techniques in Virtual Reality. In *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI EA ’19*, pp. 1–6, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [DBWK19] John Dudley, Hrvoje Benko, Daniel Wigdor, and Per Ola Kristensson. Performance Envelopes of Virtual Keyboard Text Input Strategies in Virtual Reality. In *proceedings of 2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2019)*, pp. 289–300, 2019.
- [dSeSS09] Adriana de Souza e Silva and Daniel. M. Sutko. *Digital Cityscapes: Merging Digital and Urban Playspaces*. Peter Lang, 2009.
- [DVK18] John J. Dudley, Keith Vertanen, and Per Ola Kristensson. 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. 1–40, 2018.

- [Far95] Gerald E. Farin. *NURB Curves and Surfaces: From Projective Geometry to Practical Use*. A. K. Peters, Ltd., USA, 1995.
- [FKL20] Jacqui Fashimpaur, Kenrick Kin, and Matt Longest. PinchType: Text Entry for Virtual and Augmented Reality Using Comfortable Thumb to Fingertip Pinches. In *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '20, pp. 1–7, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [Goo17] Google. Google Earth VR. <https://arvr.google.com/earth/>, 2017. (2021年2月19日閲覧) .
- [GWO⁺18] Jens Grubert, Lukas Witzani, Eyal Ofek, Michel Pahud, Matthias Kranz, and Per Ola Kristensson. Effects of Hand Representations for Typing in Virtual Reality. In *Proceedings of 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 151–158, 2018.
- [HY18] Julia Hayes and Kyungjin Yoo. Virtual Reality Interactivity in a Museum Environment. In *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '18, pp. 1–2, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [JRF⁺20] Hans-Christian Jetter, Roman Rädle, Tiare Feuchtner, Christoph Anthes, Judith Friedl, and Clemens Nylandstedt Klokmoose. “In VR, Everything is Possible!”: Sketching and Simulating Spatially-Aware Interactive Spaces in Virtual Reality. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, pp. 1–16, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [KAT⁺13] Jeong Ho Kim, Lovenoor Aulck, Ornwipa Thamsuwan, Michael Bartha, and Peter Johnson. The Effects of Virtual Keyboard Key Sizes on Typing Productivity and Physical Exposures. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Vol. 57, No. 1, pp. 887–891, 2013.
- [KK16] Youngwon R. Kim and Gerard J. Kim. HoVR-Type: Smartphone as a Typing Interface in VR Using Hovering. In *Proceedings of the 22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '16, pp. 333–334, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [KKG20] Pascal Knierim, Thomas Kosch, Johannes Groschopp, and Albrecht Schmidt. Opportunities and Challenges of Text Input in Portable Virtual Reality. In *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '20, pp. 1–8, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.

- [KSF⁺18] Pascal Knierim, Valentin Schwind, Anna Maria Feit, Florian Nieuwenhuizen, and Niels Henze. Physical Keyboards in Virtual Reality: Analysis of Typing Performance and Effects of Avatar Hands. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 1–9, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [MMB94] Edgar Matias, I. Scott MacKenzie, and William Buxton. Half-QWERTY: Typing with One Hand Using Your Two-Handed Skills. In *Conference Companion on Human Factors in Computing Systems*, CHI '94, pp. 51–52, New York, NY, USA, 1994. Association for Computing Machinery.
- [MYA⁺19] Nathan Moore, Soojeong Yoo, Naseem Ahmadpour, Russel Tommy, Martin Brown, and Philip Poronnik. ALS-SimVR: Advanced Life Support Virtual Reality Training Application. In *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '19, pp. 1–2, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [Ocu19] Oculus. Thumbs Up: Hand Tracking On Oculus Quest This Week. <https://www.oculus.com/blog/thumbs-up-hand-tracking-now-available-on-oculus-quest/>, 2019. (2021年2月19日閲覧) .
- [PS19] Duc-Minh Pham and Wolfgang Stuerzlinger. HawKEY: Efficient and Versatile Text Entry for Virtual Reality. In *Proceedings of the 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '19, pp. 1–11, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [RH17] Joan Sol Roo and Martin Hachet. One Reality: Augmenting How the Physical World is Experienced by Combining Multiple Mixed Reality Modalities. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, pp. 787–795, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [SFZK18] Marco Speicher, Anna Maria Feit, Pascal Ziegler, and Antonio Krüger. Selection-Based Text Entry in Virtual Reality. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 1–13, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [SM03] R. William Soukoreff and I. Scott MacKenzie. Metrics for Text Entry Research: An Evaluation of MSD and KSPC, and a New Unified Error Metric. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '03, pp. 113–120, New York, NY, USA, 2003. Association for Computing Machinery.
- [VK11] Keith Vertanen and Per Ola Kristensson. A Versatile Dataset for Text Entry Evaluations Based on Genuine Mobiel Emails. In *Proceedings of the 13th International Conference*

on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services, MobileHCI '11, pp. 295–298, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.

- [XST⁺18] Robert Xiao, Julia Schwarz, Nick Thom, Andrew D. Wilson, and Hrvoje Benko. MR-Touch: Adding Touch Input to Head-Mounted Mixed Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 24, No. 4, pp. 1653–1660, 2018.
- [ZKM⁺19] Yang Zhang, Wolf Kienzle, Yanjun Ma, Shiu S. Ng, Hrvoje Benko, and Chris Harrison. ActiTouch: Robust Touch Detection for On-Skin AR/VR Interfaces. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, pp. 1151–1159, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [ZSFK20] Qian Zhou, Sarah Sykes, Sidney Fels, and Kenrick Kin. Gripmarks: Using Hand Grips to Transform In-Hand Objects into Mixed Reality Input. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, pp. 1–11, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [喜多 19] 喜多修太郎, 小倉加奈代, Bhed Bahadur Bista, 高田豊雄. LeapMotion 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.
- [小澤 15] 小澤宗馬, 梅澤猛, 大澤範高. 空中におけるつまむ動作を用いた効率的な文字入力の検討. 情報科学技術フォーラム講演論文集, Vol. 14, No. 3, pp. 389–390, 2015.
- [川口 19] 川口航平, 磯本俊弥, 志築文太郎, 高橋伸. VR 向けの掌上における日本語フリック入力手法の提案. ヒューマンインタフェースシンポジウム 2019, HIS2019, pp. 676–682, 2019.
- [辻下 17] 辻下守弘. バーチャルリアリティ(VR)技術を用いた高齢者のリハビリテーションに関する文献的研究. 第7巻, pp. 75–81. 奈良学園大学, 2017.
- [日本 78] 日本規格協会. 事務用機の寸法. *JIS S 1010*, pp. 1–3, 1978.
- [日本 11] 日本バーチャルリアリティ学会. バーチャルリアリティ学. 工業調査会, 2011.
- [福仲 19] 福仲伊織, 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.
- [芳賀 96] 芳賀繁, 水上直樹. 日本語版 NASA-TLX によるメンタルワークロード測定. 人間工学, Vol. 32, No. 2, pp. 71–79, 1996.

付録A 実験の際に用いた各種書類

実験の際に使用した書類一覧を以下に示す.

A.1 実験に使用した NASA-TLX アンケート

NASA-TLXアンケート

説明に従って0～100までの値を入力してください

***必須**

1. 名前 *

フルネームをお願いします

2. 実験条件 *

1つだけマークしてください。

空中

壁

机

もも

3. 知的・知覚的要求 *

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雑把でよかったですか

4. 身体的要求 *

どの程度の身体的活動（押す、引く、回す、制御する、動き回るなど）を必要としましたか。作業はラクだっ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

5. タイムプレッシャー *

仕事のペースや課題が発生する頻度のために感じる時間的切迫感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、それとも早くて余裕がないものでしたか

6. 作業成績 *

実験者によって設定された課題の目標をどの程度達成できたと思いますか。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

7. 努力 *

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

8. 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

9. より重要な要因は？ (1/15) *

1つだけマークしてください。

フラストレーション

努力

10. より重要な要因は？ (2/15) *

1つだけマークしてください。

努力

作業成績

11. より重要な要因は？ (3/15) *

1つだけマークしてください。

身体的要求

フラストレーション

12. より重要な要因は？ (4/15) *

1つだけマークしてください。

- 身体的要求
- タイムプレッシャー

13. より重要な要因は？ (5/15) *

1つだけマークしてください。

- タイムプレッシャー
- 努力

14. より重要な要因は？ (6/15) *

1つだけマークしてください。

- 努力
- 身体的要求

15. より重要な要因は？ (7/15) *

1つだけマークしてください。

- 作業成績
- 知的・知覚的要求

16. より重要な要因は？ (8/15) *

1つだけマークしてください。

- フラストレーション
- 知的・知覚的要求

17. より重要な要因は？ (9/15) *

1つだけマークしてください。

知的・知覚的要求

努力

18. より重要な要因は？ (10/15) *

1つだけマークしてください。

タイムプレッシャー

知的・知覚的要求

19. より重要な要因は？ (11/15) *

1つだけマークしてください。

知的・知覚的要求

身体的要求

20. より重要な要因は？ (12/15) *

1つだけマークしてください。

タイムプレッシャー

フラストレーション

21. より重要な要因は？ (13/15) *

1つだけマークしてください。

身体的要求

作業成績

22. より重要な要因は？ (14/15) *

1つだけマークしてください。

- 作業成績
- フラストレーション

23. より重要な要因は？ (15/15) *

1つだけマークしてください。

- 作業成績
- タイムプレッシャー

Google フォーム

A.2 実験に使用した SUS アンケート

System Usability Scaleアンケート

回答する数値は5に近づくほど「そう思う」、反対に1に近づくほど「全く思わない」を意味します

*必須

1. 名前 *

フルネームをお願いします

2. 年齢 *

3. 性別 *

1つだけマークしてください。

- 男性
 女性
 回答しない

4. 利き手 *

1つだけマークしてください。

- 右手
 左手
 その他

5. VR用HMDの使用経験 *

1に近づくほど「ない」、反対に7に近づくほど「ある」

1つだけマークしてください。

	1	2	3	4	5	6	7	
使用しない	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	よく使用する

6. 英文を読み写すことに対する自信 *

1に近づくほど「ない」、反対に7に近づくほど「ある」

1つだけマークしてください。

	1	2	3	4	5	6	7	
自信がない	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	自信がある

7. 実験パターン *

1つだけマークしてください。

- 空中
- 壁
- 机
- もも

8. このシステムをしばしば使いたいと思う *

1つだけマークしてください。

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

9. このシステムは不必要なほど複雑であると感じた *

1つだけマークしてください。

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

10. このシステムは容易に使えると思った *

1つだけマークしてください。

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

11. 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つだけマークしてください。

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

12. このシステムにある様々な機能が良くまとまっていると感じた *

1つだけマークしてください。

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

13. このシステムでは、一貫性のない所が多くあったと思った *

1つだけマークしてください。

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

14. 大抵のユーザは、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つだけマークしてください。

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

15. このシステムはとても使いにくいと思った *

1つだけマークしてください。

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

16. このシステムを利用できる自信がある *

1つだけマークしてください。

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

17. このシステムを利用し始める前に知っておくべきことが多くあると思う *

1つだけマークしてください。

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

18. 自由記述欄

Google フォーム

A.3 実験に用いた実験手順書

実験手引き

事前準備

1. メガネやアレルギーに合わせて色々つけたりはずしたりする
 1. メガネスペーサつける
 2. ラテックスアレルギーなら他の人が使っていないスポンジを使う（その後洗濯）
2. 実験記録用のカメラをつける。電話とかはオフにする
3. フィッティングの説明をする
 1. 基本はHMDの前面を当てて後ろに引っ張る動きを説明する
 2. きつさに関しては「前方向に引っ張ったときに1cmくらいの余裕」とした
 3. IDPは測った大きさに調整
4. 視界に不良がないか（電子的な乱れとかぼやけとか）を聞く
 1. 視界がボケていないか（細かい文字：Questの時刻が読めるか聞く）→不味そうなら水平・垂直方向に少しずらしてもらおう→だめならOculusのFit and Focusをやらせる
 2. 視界が曇っていないか→マスクのフィッティング調整
 3. 電子的な乱れ→スクリーンキャプチャしているときに希に発生。再起動

実験手順

- Unityプロジェクトの「inputtext」の「User_ID」「User_name」「User_test_type」「User_test_size」を設定する
- 椅子を特定の位置（壁 or 机の近く）に配置する

操作準備

- 特定の位置に配置した椅子に座るように指示する
- 指示があるまで椅子から立たないように+椅子を動かさないように指示する
- 両手を顔の前に出すように指示する
- 両手がVR上に表示されたことを確認するように指示する
- キーボード表示動作でキーボードが表示されたことを確認するように指示する

操作説明

- 指をキーから話すと選択が行われることを説明する
- 文字を説明するとキーボード上に表示されることを説明する

- 間違った入力への修正には、キーボード右上の「Del」キーを使用するように指示する

タスク指示

- 入力は正確に、かつ素早くするように指示する
- 誤入力は気づいたら直ちに修正するように指示する

練習タスク

- 最大 5 分間、操作に慣れるまで練習タスクとしてキーボードを自由に配置、及びキーの入力を行うように指示する
- 5 分間のタイマーを開始する
- 練習タスク開始から 5 分経過後、あるいはユーザが練習タスク終了を切り上げたタイミングで 5 分間の休憩をとる

本番タスク

- 事前に決めたパターンに従って、実験参加者にキーボードを配置してもらう
 - この時、配置しづらいようであれば椅子の位置を変える
- キーボード上に表示されている課題文を入力するように指示する
- 規定量の課題文を入力後、2つのアンケートに答えるように指示する
- アンケート終了後、5分間の休憩をとる
- データが取れているか確認する
- 休憩終了後、全てのパターンによる入力が終了するまで上記の項目を繰り返す

A.4 自由記述欄の回答

自由記述欄の回答

- 空中
 - 腕がつかれた特に肘まわり
 - 腕と肩がつかれました
 - 腕に疲れを感じたが空中ほどでもなかったように思える。壁に触ることで腕の固定ができて安定していたように思える
- 壁
 - キーが壁から浮いていて、キーに触れて入力できたら壁に触れる前にキーから指を離すこともあった。
 - 腕の姿勢を維持することが難しく、とても疲れました
- 机
 - ~~tim の文章が見にくい場合があった
 - 手の甲を机に固定できたので手や腕の疲れはなかった。首の疲れもあまりなく全体的に楽だった。しかし物理キーボードと比べてしまい不自由を感じるが多かった（反応しない、場所が把握できない、人差し指しか反応しないなど
- もも
 - 首が痛かったです
 - 首に疲労を感じた。頻出するキーのなかで「E」がとても打ちづらかった。利き手ではない方の手で不自由を感じた。キーボードの赤くなるのが感じられずに多めに打ってしまうことがあったように思える。