筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

卒業研究論文

触覚フィードバックを付与した VR向け日本語フリック入力

川口 航平

指導教員　志築 文太郎

2020年2月

概要

仮想現実（VR）に表示される物体の選択には，専用のコントローラやユーザ自身の手指が用いられる．例えば，コントローラならびにユーザ自身の手指を選択したい物体に触れることにより，物体を選択できる．また，この物体選択を用いて VR 空間内における文字入力もできる．本研究において，VR 向けの日本語フリック入力へ触覚フィードバックを付与することの効果について調査した．この調査を行うために，まず触覚フィードバックを与える手法として，ユーザ自身の掌をなぞることによりフリック入力を行う手法（掌を用いる手法）および，ユーザの身の回りにある平面をなぞることによりフリック入力を行う手法（平面を用いる手法）の 2 手法を開発した．これら 2 手法を用いて触覚フィードバックを与えない手法（従来手法）との比較を行った．その結果，掌を用いた手法はセンサの認識精度の影響を受けやすく，入力性能を正確に調査できなかった．また，平面を用いる手法は従来手法と比べて誤入力が多いが素早く入力できることがわかった．

目 次

第 1 章　序論 **1**
1.1 背景 1
1.2 目的およびアプローチ 3
1.2.1 掌を用いる手法 3
1.2.2 平面を用いる手法 4
1.3 貢献 6
1.4 本論文の構成 6

第 2 章　関連研究 **7**
2.1 VR 空間におけるコントローラを用いる文字入力手法 7
2.2 VR 空間におけるユーザ自身の手指を用いる文字入力手法 7
2.3 タッチパネルや物理キーボードを VR 空間上の文字入力に使用した手法 . . . 8
2.4 触覚フィードバックの効果 9

第 3 章　実験 1 : 掌を用いる手法の性能評価 **10**
3.1 機器 10
3.2 実験参加者および実験環境 10
3.3 実験用アプリケーション 10
3.3.1 入力方法 11
3.3.2 フリックキーボードの設計 11
3.4 評価指標 12
3.5 手順 14
3.6 結果 15
3.7 考察 15

第 4 章　実験 2 : 平面を用いる手法の性能評価 **17**
4.1 機器 17
4.2 実験参加者および実験環境 17
4.3 実験用アプリケーション 17
4.3.1 入力方法 18
4.3.2 フリックキーボードの設計 18
4.3.3 接触判定 18

4.4 評価指標 19
4.5 手順 19
4.6 結果 20
4.7 考察 21

第 5 章 議論 **26**
5.1 触覚による効果 26
5.2 キーボードの表示位置 26
5.3 AR 空間上における実装 26
5.4 さらなる性能評価 27

第 6 章 おわりに **28**

謝辞 **29**

参考文献 **30**

著者論文リスト **33**

付 録 A 被験者実験の際に用いた各種書類 **35**
A.1 実験 1 における SUS アンケート 36
A.2 芳賀 [芳賀 96] らが作成した表を基に作成した実験 1 および実験 2 における NASA-TLX の説明書 37
A.3 実験 2 における SUS アンケート. 38
A.4 実験 1 の手順書 43
A.5 実験 2 の手順書 45

図 目 次

1.1 スマートフォン上にて用いられているフリック入力を VR 空間に適応した手法. 2
1.2 ユーザが自身の掌に触れることにより触覚フィードバックを得る手法. . . . 3
1.3 ユーザが身の回りの机や壁等の平面に触れることに触覚フィードバックを得る手法. 4

3.1 粘着テープを用いて Leap Motion が取り付けられた Oculus Rift DK2. . . . 11
3.2 実験 1 における実験環境. 11
3.3 実験時に掌を用いる手法（a）および従来手法（b）を用いて入力している様子. 12
3.4 実験に用いるフリックキーボードの外観. 13
3.5 任意の文字を入力するために，指を 15 mm キーから離している様子. 13
3.6 掌を用いる手法および従来手法における実験参加者の平均 CPM. 16
3.7 掌を用いる手法および従来手法における実験参加者の平均 CER. 16
3.8 掌を用いる手法および従来手法における実験参加者の NASA-TLX 平均スコア. 16
3.9 掌を用いる手法および従来手法における実験参加者の SUS 平均スコア. . . . 16

4.1 粘着テープを用いて Leap Motion が取り付けられた HTC VIVE^{TM}. 18
4.2 ユーザからの入力を検知する装置. 19
4.3 実験 2 における実験環境. 20
4.4 平面を用いる手法および従来手法における実験参加者の平均 CPM. 20
4.5 平面を用いる手法および従来手法における実験参加者の平均 CER. 20
4.6 平面を用いる手法および従来手法における実験参加者の NASA-TLX の平均スコア. 22
4.7 平面を用いる手法および従来手法における実験参加者の SUS の平均スコア. 22
4.8 あ段キーにおけるエラー率を表したヒートマップ.（a）平面を用いる手法,（b）従来手法. 24
4.9 展開されたキーおけるエラー率を表したヒートマップ.（a）平面を用いる手法,（b）従来手法. 25

表 目 次

3.1 実験 1 の課題文. 14

4.1 実験 2 の課題文. 21
4.2 従来手法における入力しようとした文字と実際に入力された文字のあるキーの位置関係. 23
4.3 平面を用いる手法における入力しようとした文字と実際に入力された文字のあるキーの位置関係. 24

第1章　序論

1.1　背景

仮想現実（以降，VR）とは，ユーザがヘッドマウントディスプレイ（以降，HMD）やCAVE [CNSD93] 等の装置を通して知覚できる，人工的に作られた現実である．VRは実世界における物理的な制約の克服が可能な点において，有望であると述べられている [RH17]．例えばユーザは，VRを通じてルーブル美術館に展示されているモナリザを仮想的に鑑賞できる[1]．また，VRを通じて実世界での模擬訓練が困難である医療行為の訓練を行うことができる [MYA+19]．

VR空間内の操作には，専用のコントローラ（例えば，HTC Vive Controller[2]）やユーザ自身の手指（例えば，[石井 18, ZKM+19]）が用いられる．コントローラを用いる物体の選択は，以下の2種類の方法により行われる．1つ目は，コントローラを用いて選択したい物体に触れる方法である．この方法では，ユーザが持っているコントローラがVR空間内に表示され，そのコントローラを選択したい物体に接触させることにより選択できる．もう1つは，レイキャストを用いて選択する方法である（以降，レイキャスト手法）．この方法では，コントローラの先端から発せられる光の筋（レイ）を，選択したい物体に指し示す．また，手指を用いる物体の選択も同様に以下の2種類の方法により行われる．1つ目は，VR空間に表示されている仮想の手指を用いて選択したい物体に触れる方法である [AOSK18]．この方法では，ユーザの手指がVR空間内に表示され，その手指を選択したい物体に接触させることにより選択できる．もう1つは，レイキャスト手法である [Min95]．この方法では，ユーザの指先から発せられるレイを，選択したい物体に指し示す．

任意のキーを対象としたコントローラやユーザ自身の手指を用いる物体選択により，VR空間内における文字入力もできる．このとき，選択する物体は，VR空間内に表示されている任意のキーとなる．コントローラを用いた場合は，VR空間に表示されているコントローラをキーボードのキーに直接触れて選択する手法やレイキャスト手法 [SFZK18] により行われる．対してユーザ自身の手指を用いた場合は，手形状認識により取得されたユーザの手指がキーに触れることにより行われる．特に，日本語文字入力に関しては，スマートフォン上にて用いられているフリック入力をVR空間に適応した手法が提案されている [福仲 19, 喜多 19]．これらの手法を用いて例えば「き」を入力するには，ユーザはまず「か」（入力したい文字の「あ」段）のキー領域を指にて突く（図1.1a）．次に「か」のキー領域の上下左右に表示される「か」行のキーのうち,「き」のキーは左に表示されるため，指を左に移動させる（図1.1b）．

[1] https://arts.vive.com/us/articles/projects/art-photography/mona_lisa_beyond_the_glass/（2020年1月24日最終閲覧）

[2] https://www.vive.com/us/accessory/controller/（2020年1月24日最終閲覧）

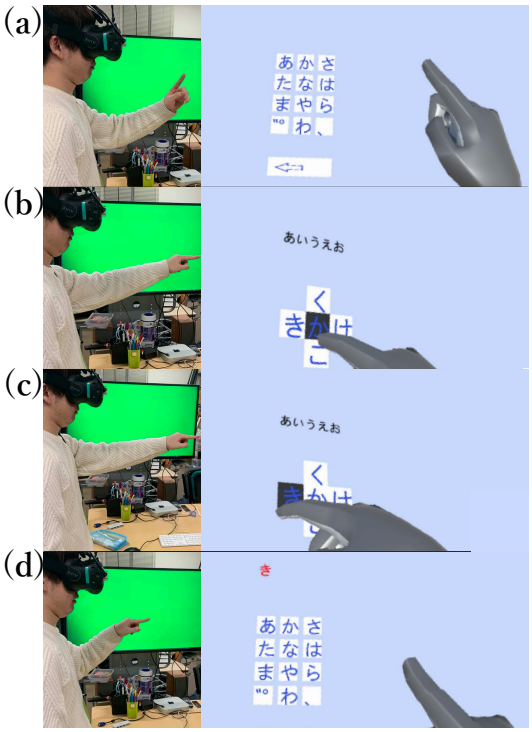


図 1.1: スマートフォン上にて用いられているフリック入力を VR 空間に適応した手法.

最後に，キーから指を離す（図 1.1c）.

文字入力中に，ユーザは自身の指がキーに接しているを視覚情報により判断することになる．例えば，キーを触れたことの判断はキーの色の変化やキーの形状の変化から判断される．そのため，現実世界でのフリック入力にて得ている感覚（つまり，入力装置に触れている感覚）が欠如しているため，それが入力性能に影響を与える可能性がある．例えば，VR 空間内のフリック入力において，指がキーを突き抜けすぎることによって誤入力が発生するとの報告がある [福仲 19]．しかし，現実世界での入力では入力装置に触れているため，指がキーを突き抜けるということは起こり得ない．よって，現実世界での文字入力中に得ている情報（以降，フィードバック）を VR 空間での文字入力に付与することによって，VR 空間での文字入力性能が向上する可能性がある．また，Freeman ら [FBL14] は，ユーザへのフィードバックは操作手法の性能を向上させると述べている．特に，空中における手指を用いた操作時に触覚フィードバック（物体と人体が触れたことのフィードバック）を与えることにより，操作が容易になったことを示している．さらに，Hoggan ら [HBJ08] はスマートフォンへの操作時に触覚フィードバックを提示することによって，文字入力性能が向上したことを報告している．

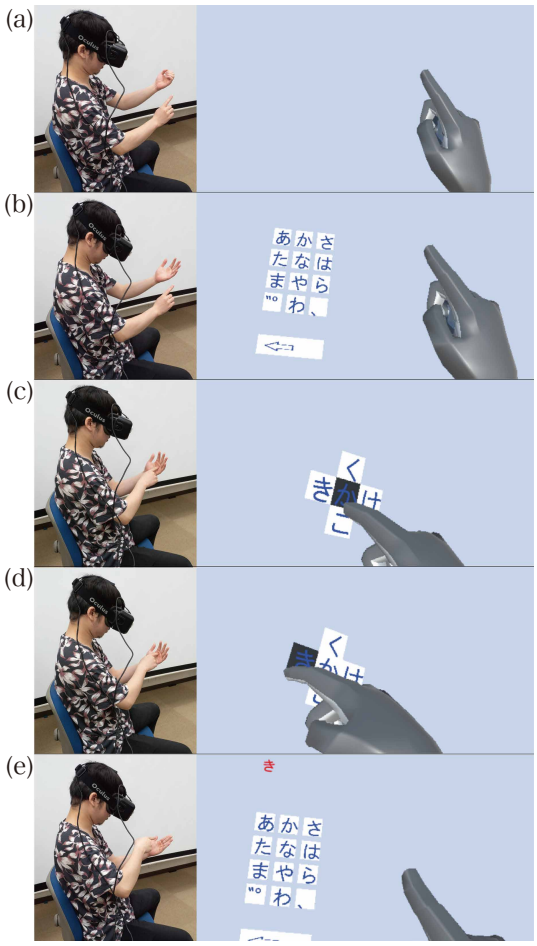


図 1.2: ユーザが自身の掌に触れることにより触覚フィードバックを得る手法.

1.2 目的およびアプローチ

本研究において，VR 空間におけるユーザ自身の手指を用いた日本語入力手法に触覚フィードバックを付与し，触覚フィードバックによる文字入力性能の影響を調査する．そのために，ユーザが触覚フィードバックを得る手法として，ユーザが自身の掌に触れることにより触覚フィードバックを得る手法（以降，掌を用いる手法），および，ユーザが身の回りの机や壁等の平面に触れることにより触覚フィードバックを得る手法（以降，平面を用いる手法）の 2 手法を示す.

1.2.1 掌を用いる手法

掌を用いる手法の操作方法を示す．ユーザは，VR 空間内において，片方の手の掌の上に表示されたフリックキーボードを他方の手指を用いて操作する．掌を用いる手法を用いて「き」

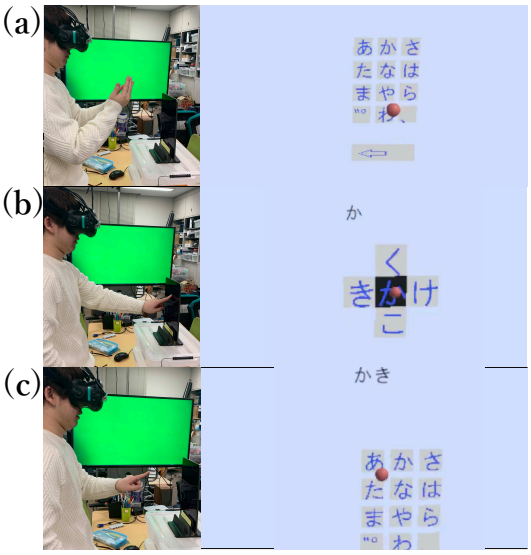


図 1.3: ユーザが身の回りの机や壁等の平面に触れることに触覚フィードバックを得る手法.

を入力する入力手順は以下の通りである.

手順 1 手を HMD の前方に出し（図 1.2a），身体方向に掌を開きフリックキーボードを表示する（図 1.2b）.

手順 2 掌上に表示されたフリックキーボードから「か」を他方の指にて触れ，か行のキーを表示する（図 1.2c）.

手順 3 「か」のキーから左右上下に展開されるキーのうち「き」が表示されている左へ指を動かす（図 1.2d）.

手順 4 掌から指を離すことにより,「き」が入力される（図 1.2e）.

1.2.2 平面を用いる手法

平面を用いる手法の操作方法を示す．ユーザは，VR 空間内において，机上および壁面等の身の回りの平面に重なるように表示されたフリックキーボードを手指を用いて操作する．平面を用いる手法を用いて「き」を入力する入力手順は以下の通りである.

手順 1 机上および壁面等の身の回りの平面に重なるようにフリックキーボードを表示する（図 1.3a）.

手順 2 表示されたフリックキーボードから「か」を他方の指にて触れ，か行のキーを表示する（図 1.3b）.

手順 3 「か」のキーから左右上下に展開されるキーのうち「き」が表示されている左へ指を動かし，平面から指を離すことにより,「き」が入力される（図 1.3c）.

1.3　貢献

本研究の貢献を以下に列挙する．

- 触覚フィードバックを付与した VR 向け日本語フリック入力の設計と実装．
- 触覚フィードバックを付与した VR 向け日本語フリック入力手法の性能結果．

P

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，関連研究を述べる．第 3 章においては，掌を用いる手法の性能を評価するために行った実験を述べる．第 4 章においては，平面を用いる手法の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，本研究にて提案した 2 つの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

本研究の関連研究として，VR 空間におけるコントローラを用いた文字入力手法，VR 空間におけるユーザ自身の手指を用いる文字入力手法，タッチパネルや物理キーボードを VR 空間上の文字入力に使用した手法に関する研究を述べる．さらに，操作手法に触覚フィードバックを付与することによる効果を調査した研究もされているため述べる．

2.1　VR 空間におけるコントローラを用いる文字入力手法

VR 空間内にて文字入力をする際にコントローラを用いる研究がされている [CP17,SFZK18]．Carter ら [CP17] は VR 空間内に表示されている立体的なキー群から構成されているキーボードをコントローラを用いて操作する文字入力手法を提案している．ユーザはコントローラを任意のキーの内部へ移動し，そしてコントローラ上のタッチパッドを触れることにより，文字を入力できる．また，Speicher ら [SFZK18] は，VR 空間内の文字入力手法の性能およびユーザの好みを評価し，VR 空間内の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結論づけた．また，Son ら [SAKL19] は，タッチパネルが搭載されたコントローラを用いた手法を示している．この手法では，ユーザがタッチパネル上の指の位置に応じて動くポインタを動かし，キーボードに対して入力することができる．ユーザはこの入力方法を用いた場合にスマートフォンよりすばやく入力することはできないが，視覚的フィードバックを得ることにより性能が向上したと報告されている．

これらの手法では，ユーザは把持したコントローラを操作することにより文字入力を行う．コントローラには多くのボタンが備わっているため，キーボードの表示・非表示，および移動などの操作がこれらを通じて行うことができる．対して，本論文では，手に何も持たない状態における手指を用いた文字入力手法を扱う．

2.2　VR 空間におけるユーザ自身の手指を用いる文字入力手法

VR 空間内における文字入力にユーザ自身の手指を用いた手法も提案されている．Komiya ら [KN17] はユーザ自身の手指の曲げを用いるひらがな入力手法を提案した．この手法では各指にひらがなが割り振られており，ユーザは指を曲げることによって任意のひらがなの選択を行うことができる．細野ら [細野 14] は子音と母音が表示された 2 つの円形のキーボードを両手にて操作することに基づくひらがな入力手法を提案した．二本松ら [二本 17] はユーザ自身の親指と他の指を接触させることによる文字入力手法を提案した．この文字入力手法で

は親指と接触させる指によって入力される文字が決まる．大西ら [大西 16] は指を用いて空中に簡略化された文字を描く文字入力手法を提案した．

特に，VR 空間における日本語入力に関する研究では，スマートフォン上にて行われているフリック入力を用いた手法が提案されている [福仲 19, 喜多 19]．これらの研究では，VR 空間内において手指を用いたひらがな入力ができるフリックキーボードを開発している．これらの研究のうち，喜多ら [喜多 19] は，QWERTY キーボードはフリックキーボードと比較し，入力の速さおよび入力精度の両方において優れていると報告している．また，フリックキーボードの性能が劣った原因は，フリック時に触覚フィードバックがないため指を移動することが難しかったことであると考察している．福仲ら [福仲 19] は，フリックキーボードは QWERTY キーボードと比較し入力速度は同等以上であるが誤入力の頻度が多いと報告している．この研究では入力に対して視覚的なフィードバックを追加しており，アンケート結果から視覚的なフィードバックが入力の手助けとなったことを報告している．

本論文において提案する手法では，先行研究 [福仲 19, 喜多 19] と同様に，スマートフォンにて広く使われているフリック入力手法を用いている．ただし，これらの研究とは異なりキー入力の際に触覚フィードバックを付与している．これらの研究では視覚的フィードバックを付与した場合の効果を調査されているが，触覚フィードバックの場合の効果は明らかになっていないためである．また，喜多ら [喜多 19] は，キーを深く押し込みすぎることが誤入力の原因になったと報告している．これは，仮想の指がキーに触れた際にキーが押し込まれているように見えることによって引き起こされていると考察している．一方，ユーザは触覚フィードバックを得ることによって，入力時にキーに触れたことを認知できるため，必要以上に指をキーへ押し込むことがなくなると考えられる．

2.3 タッチパネルや物理キーボードを VR 空間上の文字入力に使用した手法

スマートフォン上のタッチパネルや物理キーボード等の現実世界での文字入力に用いている入力装置を VR 空間での文字入力に利用する手法も提案されている．

Knierim ら [KSF+18] は物理キーボードおよびユーザの手と同位置にキーボードおよび手を仮想的に表示し，物理キーボードを触れながら文字入力を行う手法を提案した．また，Pham ら [PS19] は肩にぶらさげた物理キーボードを用いて入力を行う手法を提案した．これらの研究では，入力に物理キーボードを用いているため，仮想キーボードへ入力する際に物理キーボードから触覚フィードバックを得ることができる．Chen ら [CWG+19] はコントローラを用いたレイキャストによる文字入力とスマートフォン上のタッチパネルによる文字入力手法を提案し，比較を行っている．コントローラを用いた手法がスマートフォンを用いた手法より優れた入力性能となったことを報告している．また，VR 空間における文字入力にスマートフォンを用いた手法も提案されている [KK16]．ユーザの指がスマートフォン上のどこに位置するかを視覚化し，さらに指を画面から離す際に入力を確定させることによって入力性能が向上したと報告している．

掌を用いる手法では，タッチパネルや物理キーボードを使用しない．平面を用いる手法では，タッチパネルを用いてタッチの認識を行う．

2.4 触覚フィードバックの効果

スマートフォンの操作時に，ユーザへ触覚フィードバックを与えることによる効果の調査がされている．Freeman ら [FBL14] は，触覚フィードバックは操作に要する時間へ影響を与えなかったが，ユーザは触覚フィードバックがある方を好んだと報告している．また，Hoggan ら [HBJ08] は，文字入力時にユーザへ触覚フィードバックを与えることにより，文字入力の性能が改善され，実際の物理キーボードを用いた文字入力の性能に近づくことを示した．横山ら [横山 13] はスマートフォンのディスプレイ上に微小な段差を設け，文字入力に触覚フィードバックを付与した．この手法は触覚が無い場合と比較して文字入力の誤入力が増えると報告している．Wu ら [WHLS17] は，ユーザの手に取り付けたマイクロスピーカを用いて，VR 空間内における文字入力に触覚フィードバックを適応した．この研究では物理キーボード，仮想キーボードおよび触覚フィードバックがある仮想キーボードの比較を行っている．結果，仮想キーボードの場合は触覚フィードバックを付与した方が性能が高まったと報告している．

これらの研究では，アクチュエータや超音波アレイ等の装置を用いて触覚フィードバックを発生させている．本研究では，追加の装置を必要とせずに自身の身体や，壁および机等の身の回りの物体を触れることにより触覚フィードバックを得ることができる．

第3章　実験１：掌を用いる手法の性能評価

掌を用いる手法の性能を調査するために実験を行った．実験は，1.1.2 節にて説明した掌を用いる手法および 1.1 節にて説明した先行研究にて用いられている空中に浮遊しているフリックキーボードを用いた手法（以降，従来手法）と比較するために行われた．

3.1　機器

実験に用いられた HMD は Oculus Rift DK2 であり，コンピュータは NEW ALIENWARE m15（CPU : Intel(R) Core i7-8750H，メモリ : 16 GB RAM，GPU : NVIDIA(R) GeForce(R) GTX 1060，OS : Windows 10）が用いられた．また，手形状を検出するための機器として Leap Motion[1] を使用した．なお，Leap Motion は図 3.1 のように HMD に装着された．装着には粘着テープを用いており，頭を動かしても Leap Motion の位置がずれないようにしている．

3.2　実験参加者および実験環境

実験参加者は，研究室内の大学生および大学院生の 6 人（21–23 歳，平均年齢 21.8 歳，男性 5 人，女性 1 人，全員右利き）である．また，全実験参加者は日常的にスマートフォンでの文字入力にフリック入力を用いていた．

実験を行った環境を図 3.2 に示す．実験は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行った．

3.3　実験用アプリケーション

実験に用いたシステムを図 3.3 に示す（a : 掌を用いる手法，b : 従来手法）．実験画面は，キーボード，実験参加者が入力すべき文字列（以降，課題文），および実験参加者が入力した文字列（以降，入力文字列）からなる．ユーザが課題文とは異なる文字列を入力した際は，入力文字列全体が赤色にて表示される．

[1] https://www.leapmotion.com/ja/.（2020 年 1 月 24 日最終閲覧）

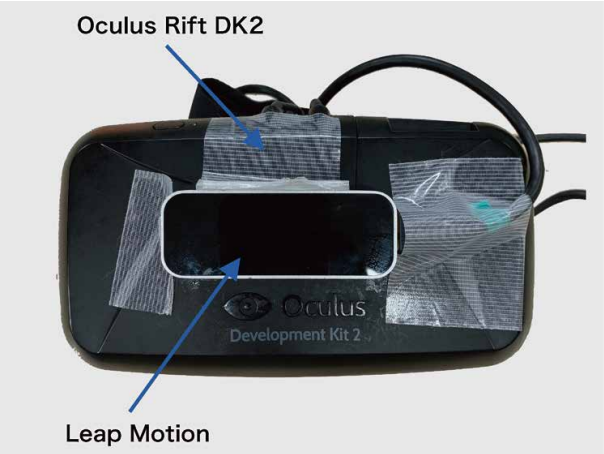


図 3.1: 粘着テープを用いて Leap Motion が取り付けられた Oculus Rift DK2.



図 3.2: 実験 1 における実験環境.

3.3.1 入力方法

ユーザは，LeapMotion を通じて検出された自身の手と対応する位置に表示される仮想の手を用いて文字入力を行う．従来手法および掌を用いる手法それぞれにおける文字入力は，それぞれ 1.1 節および 1.2.1 節に述べた通りである．

3.3.2 フリックキーボードの設計

キーボードの外観を図 3.4 に示す．キーボードは,「あ」–「わ」段を示す 10 個のキー，濁音・半濁音・小文字に変換する文字変換キー，および「,」や「？」等の特殊記号を入力する特殊文字キーの 12 個のキーからなるキー構成とした．なお，キーの配置はスマートフォンに用いられるフリックキーボードを基に配置された．キーボードの位置は「な」キーが掌の中

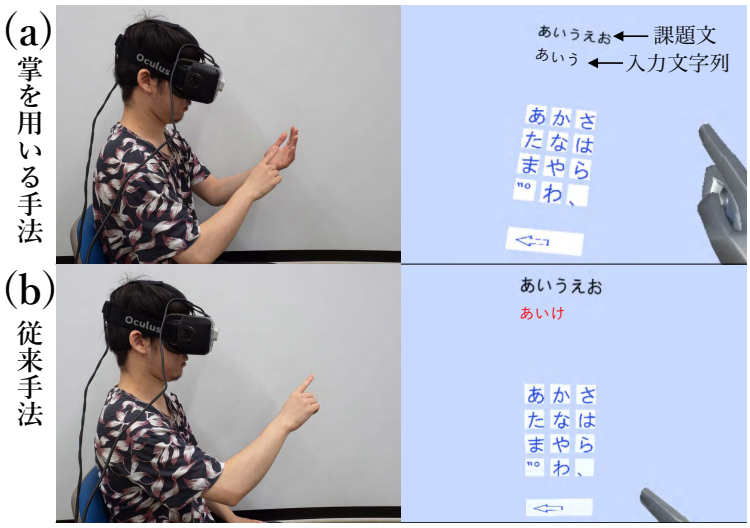


図 3.3: 実験時に掌を用いる手法（a）および従来手法（b）を用いて入力している様子.

心となるようにした．また，1 文字削除するデリートキーをキーボードの下部である腕に配置した．

小澤ら [小澤 15] の研究によって仮想キーボードのキーの大きさは 17.5 mm ないし 26.3 mm が好ましいと述べられている，このことから，各キーを 1 辺 17.5 mm の正方形とした．また，手指検出の精度の影響を受けずに入力しやすくするために，任意の段の選択後に表示されるキー（例えば,「あ」における「あ」,「い」,「う」,「え」，および「お」）の大きさを 26.3 mm の正方形とし，キーを選択するには 50 ms 以上はそのキーに指が滞在する必要があるようにした．各キーの間隔はユーザの掌の大きさとキーの大きさをもとに，キーボードが掌内に収まるように決定した．

キーボードと人差し指が触れていることの検出は，各キーの表面と検出された人差し指の先端それぞれに当たり判定を付けることにより行われる．また，キーボードと人差し指が触れた後に離れたことの検出は，図 3.5 のようにキーから垂直方向に 15.0 mm 指を離すことにより行われる．つまり，子音の選択は，人差し指にてキーボードに触れた後に，人差し指を任意のキーの方向に移動し，垂直方向に 15.0 mm 移動する事により行うことができる．

3.4 評価指標

評価に用いる尺度は，文字入力速度を計測するための CPM，文字誤入力率を計測するための Corrected Error Rate [SM04]（CER），ワークロード評価のための NASA Task Load Index（NASA-TLX），およびユーザビリティ評価のための System Usability Scale（SUS）である．CPM は式 3.1 によって定義されている．

$$\mathrm{CPM} = \frac{\text{入力文字数} - 1}{\text{1 文字目を入力しはじめてから入力し終わるまでの時間 } [m]} \tag{3.1}$$

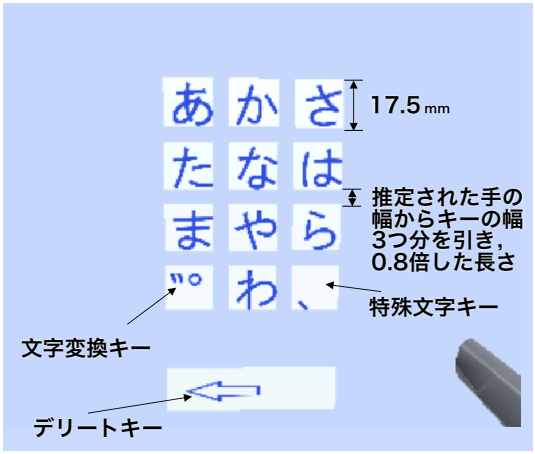


図 3.4: 実験に用いるフリックキーボードの外観.

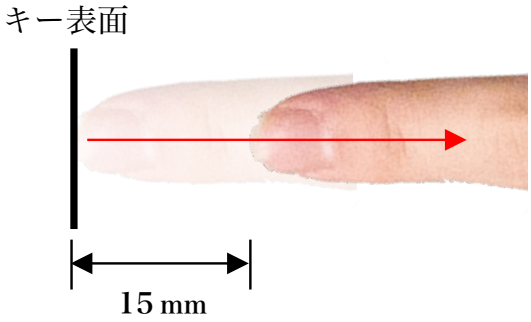


図 3.5: 任意の文字を入力するために，指を 15 mm キーから離している様子.

なお，CPM は大きいほど，速く入力できることを示す．CER は，式 3.2 によって定義されている．

$$\mathrm{CER} = \frac{\text{修正された文字数}}{\text{課題文の文字数} + \text{修正されなかった文字数} + \text{修正された文字数}} \times 100 \qquad (3.2)$$

本研究の実験にて行うタスクは，入力を指示した課題文とユーザが入力した文字が完全一致になるように設計されている．よって，修正されなかった文字数は必ず 0 になるため，式 3.2 は式 3.3 と等価になる．

$$\mathrm{CER} = \frac{\text{修正された文字数}}{\text{課題文の文字数} + \text{修正された文字数}} \times 100 \qquad (3.3)$$

例えば,「つねならむ」と入力を指示した際に「た X つねならむ」（ここで，X はデリートキーの入力を示す）と入力された場合の CER は 17%となる．この場合の修正された文字数は 1，課題文の文字数は 5 となる．なお，CER は大きいほど，修正済みの誤入力が多いことを示す．NASA-TLX および SUS はアンケートを用いて評価する．実験に用いたアンケートおよびア

ンケートの説明は付録に掲載する．なお，NASA-TLX は大きいほど作業負荷が高いことを示し，SUS は大きいほどユーザビリティが高いことを示す．

3.5 手順

表 3.1: 実験 1 の課題文．

ID	文	文字数
1	ぎゅうにゅうかう	8
2	あしたかいぎ	6
3	れぽーとしめきり	8
4	かいぎしりょう	7
5	しりょういんさつ	8
6	すいどうだい	6
7	ごごきゅうこう	7
8	あしたはやすみ	7
9	びでおへんきゃく	8
10	ろんぶんよむ	6
11	どようのみかい	7
12	れんしゅうなし	7
13	あさってしめきり	8
14	いんたらくしょん	8
15	かいぎりまいんだ	8
16	さぼてんにみず	7
17	すけじゅーる	6
18	せんたくものほす	8
19	ろくがよやく	6
20	ぺっとぼとる	6
21	かんとりーまあむ	8
22	やさいじゅーす	7
23	あるみほいる	6
24	ごめんなさい	6

各手法を用いた実験は以下の手順にて行われた．まず，実験参加者には各手法を用いた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 を装着するよう指示した．加えて，従来手法を用いた実験では，実験中のキーボードの位置を固定するため， 実験参加者を基準として空中のどの位置にキーボードを配置するか決定した．その後，実験参加者に左手を閉じた状態においてキーボードを移動し，キーボードを固定したい場所にて手

を開くように指示した．掌を用いる手法においては，実験参加者全員が右利きであることから，左手の開閉によりキーボードの表示を行い，右手にてフリック入力を行うように指示した．この際に，掌に触れることによって全てのキーが入力できることを確認するように指示し，できなかった場合には掌とキーボードの距離を調節した．

その後，練習タスクとして濁音･半濁音を含む全ひらがな，捨て仮名，および伸ばし棒（「ー」）の入力練習を 5 分間行った．練習タスクが終了した後，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に休憩を開始した．本番タスクは，ランダムに出題される 24 文章の入力を行うことである．また，24 文章の入力を 2 セッションに区切り，セッション間に 3 分間の休憩を設けた．この文章は，深津ら [深津 13] が用いたフレーズセットである（表 3.1）．なお，各文章を入力し終わってから，再び入力し始める間には自由に休憩を取ってよいこととした．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．本番タスクが終了した後に，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指示した．アンケート記入後 5 分の休憩を設け，もう一方の手法を用いた実験を行った．順序効果を取り除くために，3 人の実験参加者は掌を用いる手法から実験を開始し，他の 3 人の実験参加者は従来手法から実験を開始した．

3.6 結果

各手法における平均 CPM を図 3.6 に示す．平均 CPM は掌を用いる手法において 25.3 CPM（SD = 4.38），従来手法において 42.8 CPM（SD = 2.9）であり，t 検定の結果，両者の間に有意差が検出された（$p = 0.000 < 0.001$）．また各手法における平均 CER を図 3.7 に示す．平均 CER は掌を用いる手法において 37%（SD = 9.0），従来手法において 15%（SD = 2.7）であり，t 検定の結果，両者の間に有意差が検出された（$p = 0.001 < 0.01$）．次に各手法における NASA-TLX の平均スコアを図 3.8 に示す．平均スコアは掌を用いる手法において 60.1（SD = 9.1），従来手法において 42.2（SD = 14.5）であり，t 検定の結果，両者の間に有意差が検出された（$p = 0.000 < 0.001$）．各手法における SUS の平均スコアを図 3.9 に示す．掌を用いる手法において 61.7（SD = 9.9），従来手法において 71.7（SD = 12.2）であり，t 検定の結果，両者の間に有意差が見られなかった（$p = 0.109 > 0.05$）．なお，図 3.6，図 3.7，図 3.8，および図 3.9 中に示すエラーバーは標準偏差を表している．

3.7 考察

CPM および CER の両方において従来手法が高くなった．この原因として，誤った手形状認識によるものがあると推測する．実験中の様子を観察すると，掌を用いる手法を用いた文字入力時に手認識の誤りが多く発生していた．これも掌を用いる手法の性能が低くなった原因の 1 つであると考える．Leap Motion は内蔵する赤外線カメラから手の映像を取得し，手

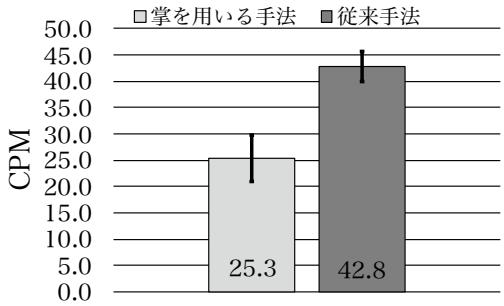


図 3.6: 掌を用いる手法および従来手法における実験参加者の平均 CPM.

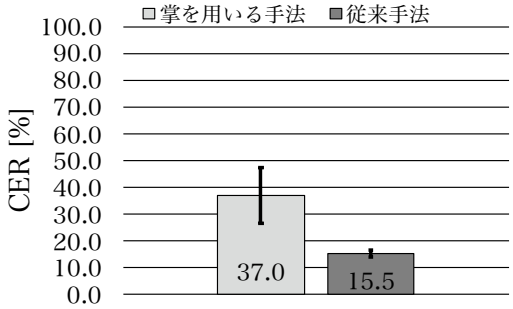


図 3.7: 掌を用いる手法および従来手法における実験参加者の平均 CER.

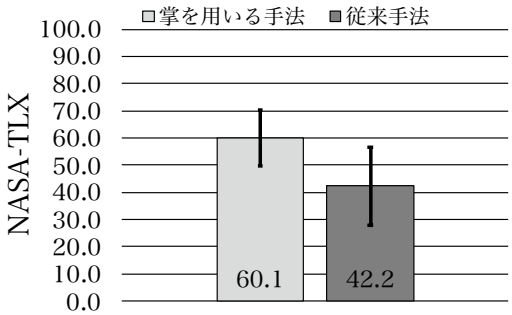


図 3.8: 掌を用いる手法および従来手法における実験参加者の NASA-TLX 平均スコア.

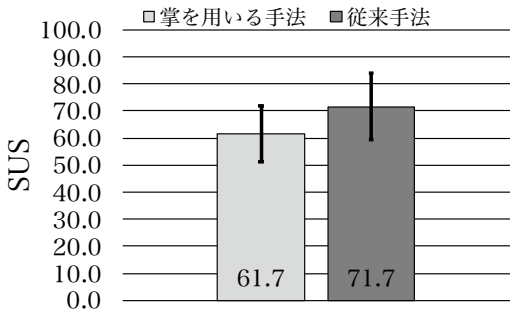


図 3.9: 掌を用いる手法および従来手法における実験参加者の SUS 平均スコア.

の形状を推定する．掌を用いる手法の場合は右手によって左手が隠れるため，誤認識の要因になっていると考えられる．

また，掌を用いる手法では触覚フィードバックがある点の他にキーボードの位置および角度が入力中に変更できる点が従来手法と異なる．従来手法ではキーボードが空中に直立しているが，対して従来手法では常に掌上に表示されるようになっており，掌の位置および角度によってキーボードの位置および角度が変わる．よって，キーボードの位置および角度が入力性能の差に影響している可能性がある．自由記述アンケートの結果の中に，従来手法では腕や肩が疲れる等の意見が多かった．従来手法においてキーボードを正面に配置しよとすると，自然と目線に近い高さにキーボードが配置される．そのため，ユーザは右腕を上げて入力する必要があり，従来手法を用いた文字入力時の疲労に影響を与えたと考えられる．

SUS のスコアは従来手法と掌を用いる手法との間に有意差はなかった．しかし，各手法のスコアは CPM，CER，および NASA-TLX と同様に従来手法の方が優れた傾向が見られた．

第4章　実験2：平面を用いる手法の性能評価

実験 1 では手指の認識が原因として，触覚フィードバックの影響を正確に調査できなかった．そこで，認識の影響によらない調査によって，触覚フィードバックの影響を調査する．実験は，1.3 節にて説明した平面を用いる手法および従来手法と比較するために行われた．

4.1　機器

実験に用いられた HMD は HTC VIVE^{TM} であり，コンピュータは NEW ALIENWARE m15（CPU : Intel(R) Core i7-8750H，メモリ : 16 GB RAM，GPU : NVIDIA(R) GeForce(R) GTX 1060，OS : Windows 10）が用いられた．実験 2 では VIVE トラッカーを介して平面の位置を取得する．VIVE トラッカーを使用するには HTC VIVE^{TM} を使用する必要があるため，HMD に HTC VIVE^{TM} を使用した．また，ユーザの手形状を検出するための機器として Leap Motion を使用した．なお，Leap Motion は図 4.1 のように HMD に装着した．装着には粘着テープを用いており，頭を動かしても Leap Motion の位置がずれないようにしている．平面と指先とのインタラクション（触れる，指を離す，なぞる）を誤認識を少なく感知するために，iPad Pro を用いた．図 4.2 に示すように iPad Pro が垂直な平面となるように設置した．

4.2　実験参加者および実験環境

実験参加者は，研究室内の大学生および大学院生の 4 人（22–23 歳，平均年齢 22.5 歳，男性 4 人，全員右利き）である．また，全実験参加者は日常的にスマートフォンでの文字入力にフリック入力を用いていた．

実験を行った環境を図 3.2 に示す．実験は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行った．

4.3　実験用アプリケーション

実験に用いるアプリケーションは実験 1 と同じ仕様のものを用いた．

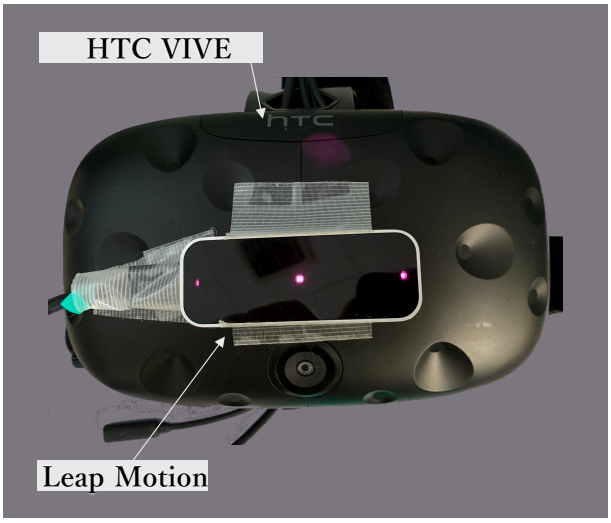


図 4.1: 粘着テープを用いて Leap Motion が取り付けられた HTC VIVE^{TM}.

4.3.1 入力方法

ユーザは，LeapMotion を通じて検出された自身の指先と同様の位置に表示される球状のポインタを用いて文字入力を行う．従来手法および平面を用いる手法それぞれにおける文字入力は，それぞれ 1.1 節および 1.2.2 節に述べた通りである．

4.3.2 フリックキーボードの設計

3 章の設計にて述べたものに変更を加えた．具体的には，人差し指との接触判定を人差し指がキーボードから垂直方向に 15.0 mm 離れるのを待たずにした．つまり，指がキーボードから離れると直ちに入力を確定させた．

4.3.3 接触判定

ユーザがタブレットに対しタッチおよびスワイプしたことを示す情報は，UDP を用いてタブレットから Unity に送信される．したがって使用するタブレットは平面としての役割，接触感知の役割，および UDP サーバとの役割を持つ．端末側の実装には Xcode 11.2 beta および Swift 5 を用いた．

Unity 内において，UDP サーバから送られてきた情報と Leap Motion から送られてきた情報を基にどのキーを入力するかを決める．UDP サーバから送られてきた情報はキーボードと指先との接触判定に用いており，Leap Motion から送られてきた情報は仮想空間上における指先の位置を把握するのに用いている．



図 4.2: ユーザからの入力を検知する装置.

4.4 評価指標

評価指標には 3 章と同じ CPM，CER，NASA-TLX，および SUS を用いた．

4.5 手順

各手法を用いた実験は以下の手順にて行われた．まず，各手法を用いた文字入力方法および実験システムの使用方法を説明し，実験参加者には立った姿勢において HMD を装着するよう指示した．なお，壁面を模した iPad Pro の前に立つように指示した．

その後，ひらがなおよび伸ばし棒（「ー」）の入力練習を 5 分間行った．実験 2 では実験 1 と異なり，濁音の入力は行っていない．練習タスクが終了した後，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．本番タスクは，ランダムに出題される 24 文章の入力を行うことである．また，24 文章の入力を 2 セッションに区切り，セッション間に 3 分間の休憩を設けた．この文章は，実験 2 用に作成した（表 4.1）．ID1-8 はいろは歌を文毎に分割した文章であり，ID9-24 は VR 環境においてゲーム体験時に使用することを想定した文章である．なお，各文章を入力し終わってから，再び入力し始める間には自由に休憩を取ってよいこととした．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．本番タスクが終了した後に，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指示した．アンケート記入後 5 分の休憩を設け，もう一方の手法を用いた実験を行った．順序効果を取り除くために，3 人の実験参加者は平面を用いる手法から実験を開始し，他の 3 人の実験参加者は従来手法から実験を開始した．



図 4.3: 実験 2 における実験環境.

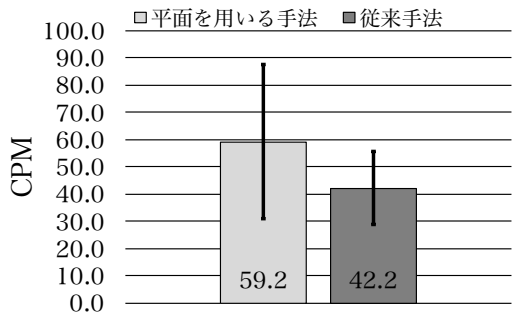


図 4.4: 平面を用いる手法および従来手法における実験参加者の平均 CPM.

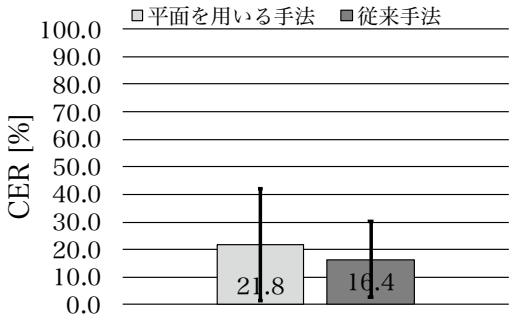


図 4.5: 平面を用いる手法および従来手法における実験参加者の平均 CER.

4.6 結果

各手法における平均 CPM を図 4.4 に示す．平均 CPM は平面を用いる手法において 59.2（SD = 16.9），従来手法において 42.2（SD = 7.2）であった．また各手法における平均 CER を図 4.5 に示す．平均 CER は平面を用いる手法において 21.8%（SD = 10.4），従来手法において 16.4%（SD = 1.5）であった．次に各手法における NASA-TLX の平均スコアを図 4.6 に示す．平均スコアは平面を用いる手法において 64.2（SD = 12.7），従来手法において 65.9（SD = 16.1）であった．各手法における SUS の平均スコアを図 4.7 に示す．平均スコアは平面を用いる手法において 71.3（SD = 13.3），従来手法において 64.4（SD = 6.6）であった．なお，図 4.4，図 4.5，図 4.6，および図 4.7 中に示すエラーバーは標準偏差を表している．

表 4.1: 実験 2 の課題文.

ID	文	文字数	備考
1	いろはにほへと	7	いろは歌
2	ちりぬるを	5	
3	わかよたれそ	6	
4	つねならむ	5	
5	ういのおくやま	7	
6	けふこえて	5	
7	あさきゆめみし	7	
8	えひもせす	5	
9	えねみー	4	ゲーム向けの用語
10	えんかうんと	6	
11	おもい	3	
12	ねおち	3	
13	らいふ	3	
14	つーる	3	
15	めんてなんす	6	
16	あたりはんてい	7	
17	かんすと	4	
18	めおし	3	
19	すらいむ	4	
20	つかみ	3	
21	のーみす	4	
22	あいてむ	4	
23	おちもの	4	
24	すてーたす	5	

4.7 考察

平面を用いる手法が従来手法より CPM が高くなった．これは，平面を用いる手法では指をキーボードから離しやすく，スマートフォンでの操作に近い感覚の操作ができるためだと考えられる．平面を用いる手法では，指を弾くように動かすと自然に指が平面から離れ入力が行われる．対して，従来手法では自分の指がどの程度キーから突き抜けているかわからないため，このように指を弾くのは難しく指を抜くような動作になりやすい．指を抜くより，指を弾く動作の方が素早く行えるため，CPM が高くなった可能性がある．

各手法における入力エラーの起こり方に特徴が無いか調べた．まず，行毎（あ行，か行，さ行,...，わ行）のエラー率をヒートマップを用いて表現した．平面を用いる手法におけるヒートマップを図 4.8a に，そして従来手法におけるヒートマップを図 4.8b に示す．両手法におい

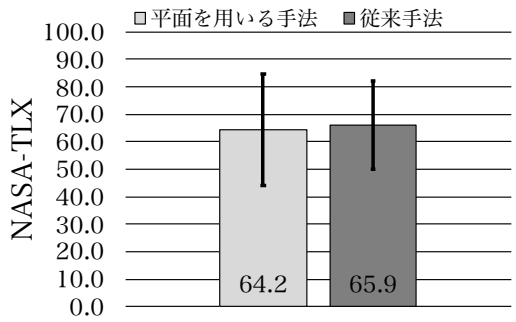


図 4.6: 平面を用いる手法および従来手法における実験参加者の NASA-TLX の平均スコア.

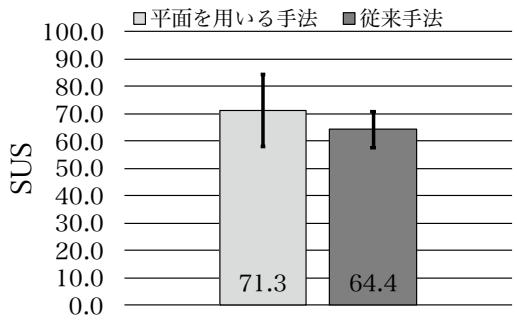


図 4.7: 平面を用いる手法および従来手法における実験参加者の SUS の平均スコア.

て，各キーのエラー率に偏りがないことが分かった．手指とキーの接触によってキーが展開された場合における，展開された各キーのエラー率をヒートマップを用いて表現した．平面を用いる手法におけるヒートマップを図 4.9a に，そして従来手法におけるヒートマップを図 4.9b に示す．従来手法では中心に配置されたキーのエラー率が最も高い．これは，中心に配置されたキーは指を引き抜く際に周囲のキーに誤って触れてしまう確率が最も高いためと考えられる．対して，平面を用いる手法では右側に配置されたキーのエラー率が最も高い．これは，実験参加者全員が右利きであることから右方向のスワイプが難しかったためと考えられる．しかし，例えば,「け」の入力を行おうとしたときに,「か」のキーではなく「さ」のキーに触れてしまいエラーとなった可能性もある．つまり，エラーの要因は意図しているあ段のキーが押せていない，もしくは意図しているあ段のキーは押せているが別のキーを入力してしまっているの 2 つに分類される．

ここで，エラー回数が多い順に上位 15 個を抽出した入力しようとした文字と実際に入力された文字のあるキーの位置関係を示した表を示す．表 4.3 が平面を用いる手法のものであり，表 4.2 が従来手法のものである．なお，表 4.2 および 4.3 中における**同行**は同じ行に属するひらがな（例えば,「あ」,「い」,「う」,「え」,「お」）を表し，**隣接**はキー配置上にて隣接しているひらがな（例えば,「あ」と「か」,「あ」と「き」，および「あ」と「な」）を表している．また，**遠隔**は**同行**および**隣接**以外の関係を表してる．

従来手法では，意図しているあ段のキーが押せていない要因が全体の 43%であり，意図しているあ段のキーは押せているが別のキーを入力してしまっている要因が全体の 57%であった．平面を用いる手法では，意図しているあ段のキーが押せていない要因が全体の 75%であり，意図しているあ段のキーは押せているが別のキーを入力してしまっているの要因が全体の 25%であった．従来手法と比べて平面を用いる手法では，意図しているあ段のキーに触れにくく，あ段のキーを触れた際に展開されるキーを入力しやすいことが分かった．これは，平面を用いる手法ではあ段のキーに触れてからは指が平面とが接地する状態になるため，指の震えによる影響を受けにくいためだと考えられる．

また，平面を用いる手法ではあ段のキーを押してから一方向に指を動かすと入力を確定さ

表 4.2: 従来手法における入力しようとした文字と実際に入力された文字のあるキーの位置関係.

順位	入力を指示された文字	実際に入力した文字	間違えた回数	入力を指示した回数	1 入力あたり間違えた回数	キーの位置関係
1	を	わ	4	1	4.0	同行
2	め	ま	8	3	2.7	同行
3	け	か	2	1	2.0	同行
4	み	濁音キー	8	4	2.0	隣接
5	そ	、	2	1	2.0	同行
6	め	わ	6	3	2.0	隣接
7	わ	や	2	1	2.0	隣接
8	わ	、	2	1	2.0	隣接
9	む	つ	5	3	1.7	隣接
10	め	た	5	3	1.7	隣接
11	み	わ	6	4	1.5	隣接
12	め	て	4	3	1.3	隣接
13	ん	ゆ	7	6	1.2	隣接
14	け	な	1	1	1.0	隣接
15	け	ふ	1	1	1.0	隣接
16	し	わ	2	2	1.0	遠隔

せていたが，従来手法では一方向に指を動かしたあとに別の方向に指を動かすことも許容していた．これは実験 1 の段階から許容されており，指の震えやセンサのノイズ等の意図しない操作が起こり意図していない方向に指を動かしたとシステムに判定されないように許容していた．平面を用いる手法でも，一方向に指を動かしたあとに別の方向に指を動かすことを許容することによってエラー率が下がる可能性がある．

NASA-TLX には大きな差は見られなかったため，作業負荷に大きな違いはないと考えられる．これは両手法共に入力する姿勢に大きな差が無いためだと考えられる．また，SUS は提案手法の方が高い傾向となった．これは，平面に対する操作が普段スマートフォンを用いる操作と親和性があったためだと考え得る．

表 4.3: 平面を用いる手法における入力しようとした文字と実際に入力された文字のあるキーの位置関係.

順位	入力を指示された文字	実際に入力した文字	間違えた回数	入力を指示した回数	1 入力あたり間違えた回数	キーの位置関係
1	ひ	は	4	1	4.0	同行
2	や	ゆ	3	1	3.0	同行
3	な	の	5	2	2.5	同行
4	ま	濁音キー	2	1	2.0	隣接
5	け	れ	1	1	1.0	遠隔
6	け	へ	1	1	1.0	隣接
7	を	わ	1	1	1.0	同行
8	の	よ	3	3	1.0	隣接
9	さ	ふ	1	1	1.0	隣接
10	く	ぬ	1	1	1.0	隣接
11	く	お	1	1	1.0	隣接
12	ほ	は	1	1	1.0	同行
13	へ	は	1	1	1.0	同行
14	へ	ほ	1	1	1.0	同行
15	よ	や	1	1	1.0	同行

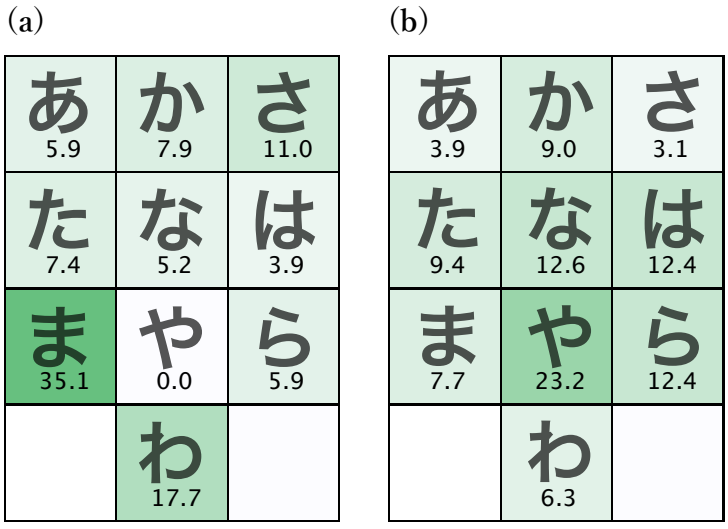


図 4.8: あ段キーにおけるエラー率を表したヒートマップ.（a）平面を用いる手法,（b）従来手法.

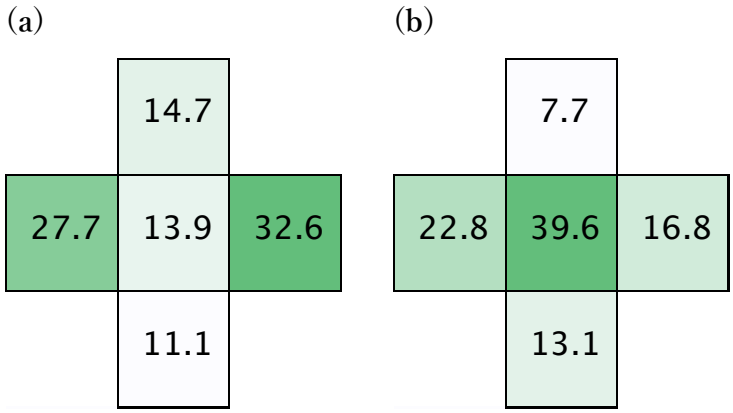


図 4.9: 展開されたキーおけるエラー率を表したヒートマップ.（a）平面を用いる手法,（b）従来手法.

第5章　議論

本章において，実験1および2を基に議論および今後の展望を述べる．

5.1　触覚による効果

触覚がある場合では，指を引き抜く際に別のキーに触れにくくなるため，エラー率が低まると予測していた．しかし，実験1および2において，従来手法のエラー率が低い結果となった．実験中にユーザがどのようにキーから指を引き抜いていたかは，実験中に取得したユーザの手指の軌跡を分析することによって明らかにすることが出来る．実験によって得たユーザの手指の軌跡情報から，手指の動きとエラー率の関係を明らかにし，触覚がエラー率に与える効果を調査していく必要がある．

5.2　キーボードの表示位置

本研究では，掌および現実世界上の平面と同じ位置にフリックキーボードを表示し，そのキーボードに対して入力を行う手法について提案した．掌を用いる手法では，手を利用できる場面においてはいつでも入力可能である．対して，平面を用いる手法では身の回りに使用できる平面がある場合に限られる．このように，表示する場所によって，使用場面の制約が変わってくるという性能の差が現れる．よって，本研究では使用していない場所を使用することによって，更に入力性能を向上させられる可能性がある．例えば，膝の側面を用いることによって，腕を上げずに入力ができる可能性がある．

5.3　AR空間上における実装

平面を用いる手法では，VR空間内での使用に制約がある．ユーザはHMDを着用すると現実世界が見えなくなるため，その状態において使用する平面を見つけるのは難しい．一方，AR空間内では常に現実世界を目視できるため，身の回りから平面を見つけるのは容易である．現在販売されているARグラス（例えば，HoloLens 2[1]）では現実世界を認識するためのセンサが付属しているため，このセンサを用いて平面を認識し，その平面上にキーボードを表示することによってAR空間上でも同様な操作を行うことができる．このような使用法が可能なため，平面を用いた手法はAR空間での文字入力においてより有望であると考えられる．

[1]https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens/hardware（2020年1月24日最終閲覧）

5.4　さらなる性能評価

本実験ではユーザの属性が性能に与える影響については調査しなかった．例えば，スマートフォンやタブレット等の端末においてフリック入力が速くできるユーザは，VR 空間内においても速く入力できる可能性がある．また，VR 空間を日常的によく体験しているユーザのほうが，VR システムの扱いにより速く慣れる可能性がある．これらのような，入力性能に影響を与える可能性がある属性を加味した性能評価を行う必要がある．

第6章　おわりに

本研究において，VR 向けの日本語フリック入力へ触覚フィードバックを付与することの効果について調査した．この調査を行うために，まず触覚フィードバックを与える手法として，ユーザ自身の掌をなぞることによりフリック入力を行う手法（掌を用いる手法）および，ユーザの身の回りにある平面をなぞることによりフリック入力を行う手法（平面を用いる手法）の 2 手法を開発した．これら 2 手法を用いて触覚フィードバックを与えない手法（従来手法）との比較を行った．その結果，掌を用いた手法に比べ従来手法が優れた性能となることがわかった．一方，自由記述のアンケート結果から従来手法を用いた場合は，腕や肩が疲労する等の意見が多く，掌を用いる手法に身体的負荷が軽減する効果があることが示唆される結果を得た．掌を用いる手法では手指の認識が原因として，触覚フィードバックの影響を正確に調査できなかった．そこで，認識の影響なく触覚フィードバックの影響を調査するために，平面を用いる手法を設計し，従来手法との比較を行った．結果は，平面を用いる手法は誤入力が多いが素早く入力できることがわかった．これは，平面を用いる手法では指が平面に接地するため，指の震えによる影響を受けなかった可能性がある．実験によって得たユーザの手指の軌跡情報から，手指の動きとエラー率の関係を明らかにし，触覚がエラー率に与える効果を更なる調査を行っていく．

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に関する丁寧かつ熱心なご指導を頂きました．さらに，研究に関して相談に乗って頂き，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．また，インタラクティブプログラミング研究室の同期，先輩方には多方面においてお世話になりました．特に WAVE チームの皆様にはチームゼミにおけるご意見や論文の添削といった研究に関する多くの支援を頂いただけでなく，進路や人との関わり方など人生についても相談に乗って頂きました．深く感謝いたします．とりわけ，礒本俊弥氏には研究方針，実験，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．心からお礼申し上げます．最後に，研究生活に限らず学生生活において支えて頂いた方々，精神面を支えてくださった家族や友人に深く感謝申し上げます．

参考文献

[AOSK18] Takumi Azai, Mai Otsuki, Fumihisa Shibata, and Asako Kimura. Open Palm Menu: A Virtual Menu Placed in Front of the Palm. In *Proceedings of the 9th Augmented Human International Conference*, AH '18, pp. 17:1–17:5, New York, NY, USA, 2018. ACM.

[CNSD93] Carolina Cruz-Neira, Daniel J. Sandin, and Thomas A. DeFanti. Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE. In *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '93, p. 135–142, New York, NY, USA, 1993. Association for Computing Machinery.

[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. ACM.

[CWG+19] Sibo 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. 233:1–0233:6, New York, NY, USA, 2019. ACM.

[FBL14] Euan Freeman, Stephen Brewster, and Vuokko Lantz. Tactile Feedback for Above-device Gesture Interfaces: Adding Touch to Touchless Interactions. In *Proceedings of the 16th International Conference on Multimodal Interaction*, ICMI '14, pp. 419–426, New York, NY, USA, 2014. ACM.

[HBJ08] Eve Hoggan, Stephen A. Brewster, and Jody Johnston. Investigating the Effectiveness of Tactile Feedback for Mobile Touchscreens. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '08, pp. 1573–1582, New York, NY, USA, 2008. ACM.

[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. ACM.

[KN17] K. Komiya and T. Nakajima. A Japanese Input Method using Leap Motion in Virtual Reality. In *Proceedings of 10th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Network*, ICMU '17, pp. 1–2. IEEE, 2017.

[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, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.

[Min95] Mark R. Mine. Virtual environment interaction techniques. Technical report, University of North Carolina at Chapel Hill, USA, 1995.

[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, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.

[PS19] Duc-Minh Pham and Wolfgang Stuerzlinger. HawKEY: Efficient and Versatile Text Entry for Virtual Reality. In *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '19, 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, p. 787–795, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.

[SAKL19] Jeongmin Son, Sunggeun Ahn, Sunbum Kim, and Geehyuk Lee. Improving Two-thumb Touchpad Typing in Virtual Reality. In *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '19, pp. LBW2217:1–LBW2217:6, New York, NY, USA, 2019. ACM.

[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. 647:1–647:13, New York, NY, USA, 2018. ACM.

[SM04] R. William Soukoreff and I. Scott MacKenzie. Recent Developments in Text-entry Error Rate Measurement. In *Extended Abstracts of the 2004 CHI Con-*

ference on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '04, pp. 1425–1428, New York, NY, USA, 2004. ACM.

[WHLS17] Chien-Min Wu, Chih-Wen Hsu, Tzu-Kuei Lee, and Shana Smith. A Virtual Reality Keyboard with Realistic Haptic Feedback in a Fully Immersive Virtual Environment. Vol. 21, No. 1, pp. 19–29, 2017.

[ZKM+19] Yang Zhang, Wolf Kienzle, Yanjun Ma, Shiu 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, 10 2019.

[横山 13] 横山牧, 蜂須拓, 佐藤未知, 福嶋政期, 梶本裕之. 視触覚クロスモーダル現象を用いたタッチパネルへの触覚フィードバックの付加. 電子情報通信学会技術研究報告: 信学技報, Vol. 112, No. 483, pp. 93–98, 2013.

[喜多 19] 喜多修太郎, 小倉加奈代, Bahadur Bista, Bhed, 高田豊雄. Leap Motion を用いた VR 上での文字入力手法の検討. 情報処理学会研究報告, 第 2019-HCI-181 巻, pp. 1–7, 2019.

[細野 14] 細野敬太, 笹倉万里子, 田邊浩亨, 川上武志. Leap Motion を用いたジェスチャ操作による文字入力方法の提案. 第 28 回全国大会論文集. 人工知能学会, 2014.

[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, 第 14 巻, pp. 389–390. 電子情報通信学会・情報処理学会, 2015.

[深津 13] 深津佳智. 携帯情報端末のタッチパネルにおけるアイズフリーな片手かな文字入力方式. 卒業論文. 筑波大学情報メディア創成学類, 2013.

[石井 18] 石井晃, 阿達拓也, 島佳吾, 中前秀太, 志築文太郎, 高橋伸. カードボード vr のための空中操作を用いたターゲット選択手法. コンピュータ ソフトウェア, 第 35 巻, pp. 64–78. 日本ソフトウェア科学会, 2018.

[大西 16] 大西未来, 渡辺大地. Leap Motion を使用した文字入力方法の提案. コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学（CG）, 第 2016-CG-165 巻, pp. 1–4. 情報処理学会, 2016.

[二本 17] 二本松拓哉, 中村喜宏. VR 環境におけるピンチ動作を用いた視覚に頼らない文字入力方法の検討. 第 79 回全国大会講演論文集, pp. 309–310. 情報処理学会, 2017.

[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.

著者論文リスト

本論文に関する論文および発表

- 川口航平，儀本俊弥，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 論文集，pp. 676-682，ヒューマンインタフェース学会，京都，2019.

付 録 A　被験者実験の際に用いた各種書類

被験者実験の際に使用した書類一覧を以下に示す.

A.1　実験 1 における SUS アンケート

System Usability Scale

1. このシステムをしばしば使いたいと思う

　（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

2. このシステムは不必要なほど複雑であると感じた

　（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

3. このシステムは容易に使えると思った

　（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

4. 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

　（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

5. このシステムにあるさまざまな機能がよくまとまっていると感じた

　（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

6. このシステムでは，一貫性のないところが多くあったとおもった

　（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

7. たいていのユーザは，このシステムの使用方法について，すばやく学べるだろう

　（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

8. このシステムはとても扱いにくいと思った

　（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

9. このシステムを使うのに自信があると感じた

　（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

10. 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

　（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

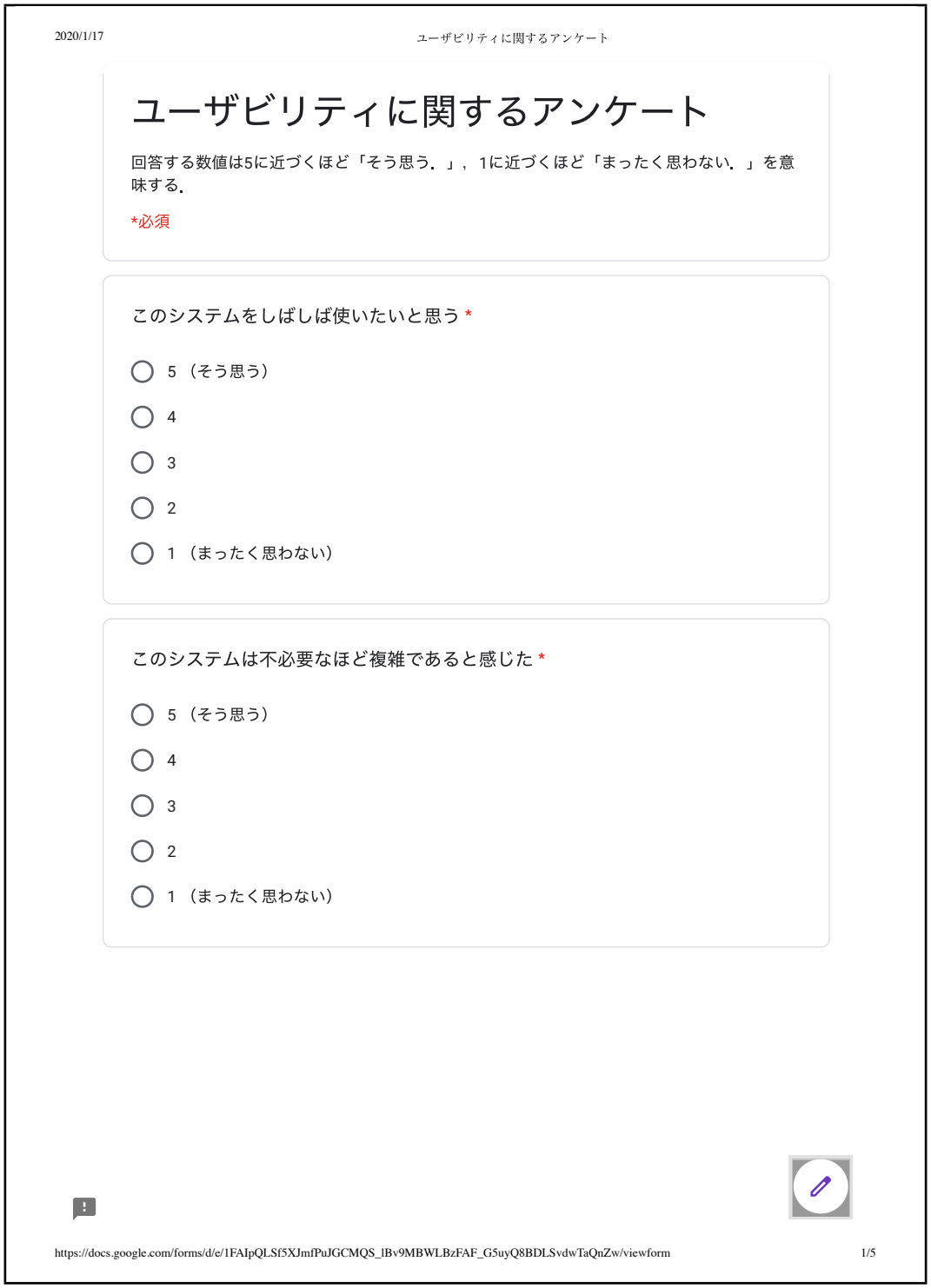
自由記述欄（思ったことがあれば自由に記述してください）

A.2 芳賀 [芳賀 96] らが作成した表を基に作成した実験 1 および実験 2 における NASA-TLX の説明書

NASA-TLXのアンケート項目は下記を参考にして下さい

尺度名(終端点)	説明文（上段は一対比較，下段は負担評価の際に用いる）
精神的要求 (小さい/大きい)	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）を必要とするか．課題がやさしいか難しいか，単純か複雑か，正確さが求められるか大ざっぱでよいか
	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
身体的要求 (小さい/大きい)	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）を必要とするか．作業がラクかキツイか，ゆっくりできるかキビキビやらなければならないか，休み休みできるか働きづめか
	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か，休み休みできましたか働きづめでしたか
時間的圧迫感 (弱い/強い)	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がどの程度か．ペースはゆっくりとして余裕があるものか，それとも速くて余裕のないものか
	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
作業達成度 (良い/悪い)	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考えるか．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るか
	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
努力 (少ない/多い)	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らないか
	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か．
不満 (低い/高い)	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るか．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るか
	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

A.3　実験 2 における SUS アンケート．



2020/1/17　　ユーザビリティに関するアンケート

ユーザビリティに関するアンケート

回答する数値は5に近づくほど「そう思う．」，1に近づくほど「まったく思わない．」を意味する．

*必須

このシステムをしばしば使いたいと思う *

- 5（そう思う）
- 4
- 3
- 2
- 1（まったく思わない）

このシステムは不必要なほど複雑であると感じた *

- 5（そう思う）
- 4
- 3
- 2
- 1（まったく思わない）

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSf5XJmfPuJGCMQS_lBv9MBWLBzFAF_G5uyQ8BDLSvdwTaQnZw/viewform　　1/5

このシステムは容易に使えると思った *

- 5（そう思う）
- 4
- 3
- 2
- 1（まったく思わない）

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 *

- 5（そう思う）
- 4
- 3
- 2
- 1（まったく思わない）

このシステムにあるさまざまな機能がよくまとまっていると感じた *

- 5（そう思う）
- 4
- 3
- 2
- 1（まったく思わない）





このシステムでは，一貫性のないところが多くあったとおもった *

- 5（そう思う）
- 4
- 3
- 2
- 1（まったく思わない）

たいていのユーザは，このシステムの使用方法について，すばやく学べるだろう *

- 5（そう思う）
- 4
- 3
- 2
- 1（まったく思わない）

このシステムはとても扱いにくいと思った *

- 5（そう思う）
- 4
- 3
- 2
- 1（まったく思わない）





このシステムを使うのに自信があると感じた *

- 5（そう思う）
- 4
- 3
- 2
- 1（まったく思わない）

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 *

- 5（そう思う）
- 4
- 3
- 2
- 1（まったく思わない）

自由記述欄（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

名前 *

回答を入力





手法 *

- ○ 触覚有り
- ○ 触覚無し

送信

Google フォームでパスワードを送信しないでください。

このコンテンツは Google が作成または承認したものではありません。 不正行為の報告 - 利用規約 - プライバシーポリシー

Google フォーム





A.4　実験１の手順書

実験手引書

実験準備

- 実験を始める前にLeapMotionを拭く．
- LeapMotionが取れなさそうか確認．
- まず，HMDを着用し手が認識されることを確認してみて下さい．右手が認識されると右手の位置にハンドモデルが表示されます．
- 紐を調節するひか聞く．
- もし，手の認識が外れ手が表示されなくなれば，掌を顔の方向に向けて下さい．
- ピント合わせるか聞く．
- 姿勢は深く腰掛けずにお願いします．

実験1: 空中に浮遊するキーボード

1. 左手をグーの形にするとキーボードの位置を移動でき，そしてパーの形にすると位置を固定することが出来ます．
2. 位置を固定するので入力しやすい位置になれば教えて下さい
3. キーボードは右手の人差し指を用いて選択し入力することが出来ます．このとき指はまっすぐにしてください．
4. 指をキーボードから自分の方向に引き抜くと選択が決定されます．
5. まずは，練習タスクとしてキーボードの上部に表示されているひらがなを入力してください．文字を入力すると，その下部に入力中の文字列が表示されます．
6. 入力を始めたら，その入力はなるべく正確に，すばやくしてください．ただし，入力する前，つまり一文字を入力をしていない状態であればいくら休んでも大丈夫です．
7. また，間違った文字を入力した場合は入力を指示している文字が赤くなります．それに気付いたら，直ちに修正してください．
8. 修正にはキーボードの下部にあるdeleteキーを使用してください．
9. また変換はキー左下の変換キーから出来ます．
10. （練習タスクが終了）5分休憩してください．
11. 練習タスクと同じように指示されている文章を入力して下さい．
12. 残り12個になったら休憩を挟む
13. （本番タスクが終了）2つのアンケートに答えて下さい．その後に5分間の休憩を取って下さい．

実験2: 掌の上に表示されるキーボード

1. 左手の掌を開くと掌の上にキーボードが表示されます．左手を動かすと追従します
2. 左手はこんなかんじにやや斜めにすると入力がしやすいです．
3. キャリブレーションを行います．全てのキーに触れることが出来るか確認してください．
4. キーボードは右手の人差し指を用いて選択し入力することが出来ます．このとき指はまっすぐにしてください．また，掌に触れて入力を行うようにしてください．
5. 指をキーボードから自分の方向に引き抜くと選択が決定されます．
6. まずは，練習タスクとしてキーボードの上部に表示されているひらがなを入力してください．文字を入力すると，その下部に入力中の文字列が表示されます．
7. 入力を始めたら，その入力はなるべく正確に，すばやくしてください．ただし，入力する前，つまり一文字を入力をしていない状態であればいくら休んでも大丈夫です．
8. また，間違った文字を入力した場合は入力を指示している文字が赤くなります．それに気付いたら，直ちに修正してください．
9. 修正にはキーボードの下部にあるdeleteキーを使用してください．
10. また変換はキー左下の変換キーから出来ます．
11. （練習タスクが終了）5分休憩してください．
12. 練習タスクと同じように指示されている文章を入力して下さい．
13. 残り12個になったら休憩を挟む
14. （本番タスクが終了）2つのアンケートに答えて下さい．その後に5分間の休憩を取って下さい．

A.5　実験 2 の手順書

卒業研究実験2 実験手引き

事前準備

- [ ] Systemへ実験者名を入力（P0~Pn 但しnは自然数）
- [ ] Leap Motionをメガネ拭きを使って拭く
- [ ] Leap Motionが固定されていることを確認
- [ ] 立ち位置がマーキングされているか確認
- [ ] Vive Trackerのデバイス番号を正しく指定できているか確認
- [ ] ピントが合うか確認

実験手順

- [ ] SystemをTabletop/Fixedに指定し，操作する手法を選択する．
- [ ] HMDが頭にフィットするか確認

- 操作準備
  - [ ] 足元にあるマーキングの位置に立つように指示．
  - [ ] 実験中はそこから移動しないように指示．
  - [ ] 右手を顔の前に出すように指示
  - [ ] 右手の指先に赤いポインタが指先に出ていることを確認するように指示
  - [ ] 右手をそのままの状態において，左手を顔の前に出し，右手を閉じるようにして，キーボードが表示されたことを確認するように指示．
- 操作説明
  - [ ] 指をキーボードから離すと選択が決定されると説明．
  - [ ] 文字を入力すると，その下部に入力中の文字列が表示されると説明．
  - [ ] 間違った文字を入力した場合は入力を指示している文字が赤くなると説明．
  - [ ] 間違った入力の修正にはキーボードの下部にあるdeleteキーを使用するように指示．
- タスク説明
  - [ ] 文字が赤くなっていることに気付いたら，直ちに修正するように指示．
  - [ ] 入力する前，つまり一文字を入力をしていない状態であれば休憩することが可能であると説明
  - [ ] 実験中における入力は正確に，すばやくするように指示．
- 練習タスク
  - [ ] 5分間，練習タスクとしてキーボードの上部に表示されているひらがなを入力するように指示．
  - [ ] 5分間のタイマーを開始する．
  - [ ] 練習タスクを開始してから5分間の経過，もしくは練習タスクが終了した場合に3分間の休憩を取る．
  - [ ] 実験アプリを落とす
- 本番タスク
  - [ ] 練習タスクと同じように指示されている文章を入力して下さい．
  - [ ] 入力すべき短文数が残り12個になったら3分間の休憩を挟む．休憩中に実験アプリを再起動する．
  - [ ] 2つのアンケートに答えるように指示．
  - [ ] 5分間の休憩を取る．