

筑波大学大学院博士課程  
理工情報生命学院  
システム情報工学研究群修士論文

ホバーを用いた腕の位置を制限しない  
XR 向け日本語入力手法

加藤進吾  
修士（工学）  
（情報理工学位プログラム）

指導教員 志築 文太郎

2024 年 3 月

## 概要

近年、現実世界と仮想世界を融合し、新たなユーザエクスペリエンスを実現する Extended Reality (XR) の市場は拡大傾向にあり、それに伴って、XR デバイスが注目を集めている。XR デバイス上において情報検索、目的地までのナビゲーションまたはソーシャル・ネットワーキング・サービス (SNS) を介したコミュニケーションを行うためには、スマートフォンと同様に文字入力機能が必須である。市販の XR デバイスに搭載された文字入力手法を利用するためには、腕を上げた状態での操作が必要であり、それに伴って肩周りに疲労が発生する。物理コントローラを利用した文字入力手法があるが、手にコントローラを持って操作する必要がある。本研究では、手首装着型デバイスおよびホバーを利用した日本語入力手法を開発した。予備実験および実験 1 では、参加者の意見を基に本手法を改良した。実験 2 にて本手法の有用性を調査した結果、既存手法と比較して有意に疲労を軽減することはできなかった。一方で、誤入力率はベースラインに近い値を示し、ユーザビリティを調査するアンケートの結果は平均スコア以上であった。また、今後本手法が改良された場合にベースラインより本手法を使いたいのかという質問に対して、全参加者が本手法の利用意思を示した。これらの結果は、改善後の本手法が有用性を示す可能性を示唆している。

# 目次

第1章	はじめに	1
1.1	XR デバイスにおける文字入力 of 課題	1
1.2	目的およびアプローチ	1
1.3	貢献	4
1.4	本論文の構成	4
第2章	関連研究	5
2.1	設置型デバイスを用いた文字入力	5
2.2	指先の検出	5
2.3	XR 上における腕の姿勢がインタラクションに及ぼす影響	5
第3章	本研究におけるベースラインの定義	7
第4章	実装	9
4.1	手首装着型デバイス	9
4.2	画像処理手順	9
4.3	キーレイアウト	9
4.4	文字入力方法	10
第5章	予備実験：キーレイアウトおよびパラメータの調整	11
5.1	参加者	11
5.2	タスク	11
5.3	議論	11
第6章	実験1：本手法における腕の姿勢による影響の調査および性能調査	13
6.1	参加者	13
6.2	タスク	13
6.3	結果	15
6.4	議論	16
第7章	実験2：腕下げホバーの有用性の調査	19
7.1	参加者	19
7.2	タスク	19

7.3	結果 . . . . .	19
7.4	議論 . . . . .	21
第 8 章	議論および今後の課題	22
第 9 章	終わりに	23
	謝辞	24
	参考文献	25
付 録 A	実験に用いた書類	32
A.1	実施書 . . . . .	33
A.2	NASA-TLX アンケート . . . . .	34
A.3	SUS アンケート . . . . .	36
A.4	実験後アンケート . . . . .	41
付 録 B	実験に用いたフレーズセット	47
B.1	練習セッション . . . . .	48
B.2	本番セッション . . . . .	49
付 録 C	実験 1 および実験 2 における練習セッションの結果	50
C.1	実験 1 . . . . .	51
C.2	実験 2 . . . . .	52
付 録 D	実験後アンケートに対する全参加者の回答結果	53
D.1	実験 1 . . . . .	54
D.2	実験 2 . . . . .	63

# 図目次

1.1	本手法を用いた文字入力. a: 手首装着型デバイスを装着して, 腕を下げた状態で文字入力を行う様子. b: XR デバイス上に映された画面. . . . .	2
1.2	手首装着型デバイス. a: 手首に装着した際の様子. b: デバイスに搭載したカメラから取得できる画像. . . . .	2
1.3	キーレイアウト. a: 実験 1 にて使用したもの. b: 実験 2 にて使用したもの. a より各キーサイズを大きくし, 各キーの間隔を狭めた. . . . .	3
3.1	Meta Quest Pro における日本語入力用システムキーボード. . . . .	8
6.1	EMG を測定する様子. . . . .	14
6.2	実験 1 の結果. . . . .	17
7.1	実験 2 の結果. . . . .	20
A.1	実施書. 同書に記載した通りに実験を実施した. . . . .	33
A.2	タスクアンケート-Part 1. 6 つの指標に対する回答を行う. . . . .	34
A.3	タスクアンケート-Part 2. Part 1 に示した 6 つの指標のうち, ランダムに選ばれた 2 つの名前が表示されるため, 重要な要因だと思う方を選択する. これを, 全通りに対して行う. 例として, 「作業負荷」および「知的・知覚的要求」が選ばれた場合の画面を示す. . . . .	35
B.1	練習セッションにて使用したフレーズセット. 実験時には, 各行におけるカンマ以降の平仮名を参加者に入力してもらった. 15 個目 (「けちりすぎた」) 以降のフレーズは, 予備実験でのみ使用した. . . . .	48
B.2	本番セッションにて使用したフレーズセット. 実験時には, 各行におけるカンマ以降の平仮名を参加者に入力してもらった. 13 個目 (「いんたらくしょん」) 以降のフレーズは, 予備実験でのみ使用した. . . . .	49
C.1	実験 1 の練習セッションにおける結果. . . . .	51
C.2	実験 2 の練習セッションにおける結果. . . . .	52

## 表 目 次

6.1	実験後アンケートの質問項目（抜粋）. . . . .	15
6.2	実験 1 における実験後アンケートの結果. . . . .	16
7.1	実験 2 における実験後アンケートの結果. . . . .	21

# 第1章 はじめに

近年、現実世界と仮想世界を融合し、新たなユーザエクスペリエンスを実現する Extended Reality (XR) の市場は拡大傾向にあり、それに伴って、XR デバイスが注目を集めている。XR デバイスの用途は、情報検索、目的地までのナビゲーションまたはソーシャル・ネットワーキング・サービス (SNS) を介したコミュニケーションなど、多岐にわたる。このようなアプリケーションを利用するためには、スマートフォンと同様、文字入力が必要である。

## 1.1 XR デバイスにおける文字入力の課題

市販の XR デバイスで採用されている文字入力手法は、大きく分けて2種類ある。一方は、手で仮想キーボードを直接タッチして文字を入力する手法である。この手法では、HMD に搭載されたカメラの視野角内に手を映して操作する必要がある。カメラは XR デバイスの前面に取り付けられていることが多いため、ユーザは腕を上げて操作する必要がある。そのため、長時間の使用に伴って腕に疲労を感じることもある [YWL<sup>+</sup>22]。この問題は、ゴリラーム問題とよばれる [HRGMI14]。もう一方は、手に持った物理コントローラを操作して文字を入力する手法である。同操作による文字入力手法を提案する研究は複数ある [SFZK18,NBZ20,阿部 22]。この手法では、ユーザは任意の手の位置から文字を入力できる。しかし、コントローラを手を持つ必要があるため、仮想空間または実空間にて手を用いた行動をする際に不便である。

## 1.2 目的およびアプローチ

前節にて述べた課題を解決するため、本研究では手首装着型デバイスおよびホバーを用いる日本語文字入力手法を実装する (図 1.1)。図 1.2 a に示した手首装着型デバイスに搭載したカメラを用いて、文字入力に必要な手の情報を取得する。同デバイスを用いることで、ユーザはコントローラを手を持つ必要や腕の位置を制限することなく、文字を入力できる。また、後述する設置型デバイスを使用した文字入力とは異なり、ユーザは文字を入力する場所を制限されない。同デバイスは、先行研究 [WYY<sup>+</sup>20] で開発されたものを参考に作製した。

文字入力のためのキーボードには、12 個のキーから成る「かなテンキー」 (図 1.3) を採用した。他の日本語入力キーボードとして、五十音キーボードがある。同キーボードは、46 文字分のキーおよび特殊キー (スペース、エンター、デリートなど) で構成されているため、キーボードのサイズが大きくなる。手首装着型デバイスは指の動きの追従には優れるが、腕全体

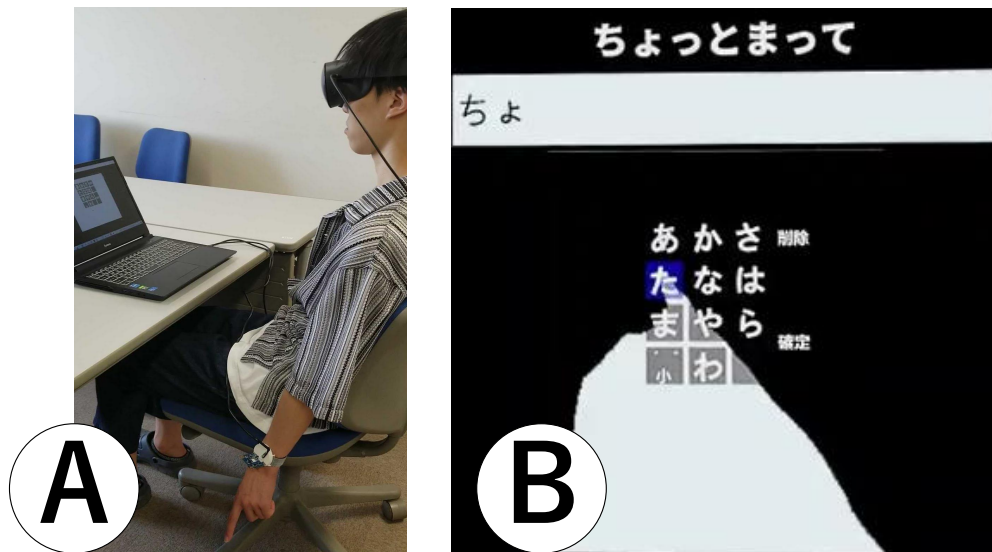


図 1.1: 本手法を用いた文字入力. a: 手首装着型デバイスを装着して, 腕を下げた状態で文字入力を行う様子. b: XR デバイス上に映された画面.

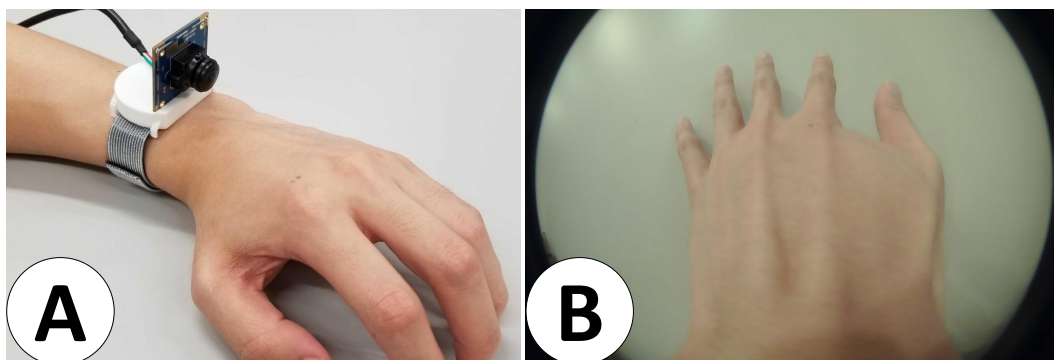


図 1.2: 手首装着型デバイス. a: 手首に装着した際の様子. b: デバイスに搭載したカメラから取得できる画像.



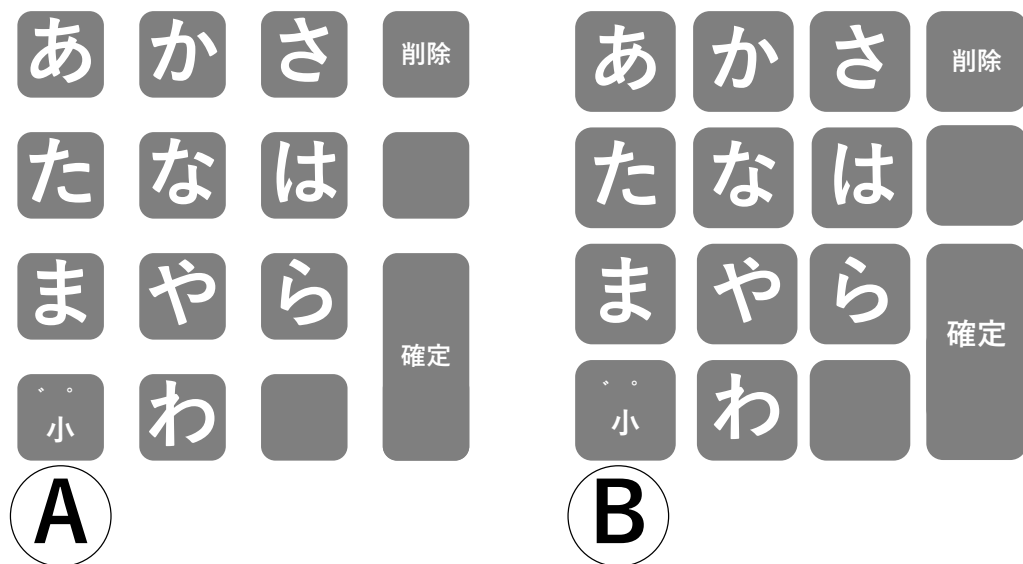


図 1.3: キーレイアウト．a：実験 1 にて使用したもの．b：実験 2 にて使用したもの．a より各キーサイズを大きくし，各キーの間隔を狭めた．

の動きの追従性は劣るため，わずかな指の動きで文字を入力できるようにキーサイズを小さくしたり，疲労を考慮する必要がある．そこで，日本のスマートフォンユーザになじみ深い，かなテンキーを採用した．これにより，キー配置を新規に提案する研究 [細野 14, 井上 19] と比較して，文字入力手法に慣れるまでの時間を必要としない．

文字入力手法の候補についても，候補は複数ある．まず，フリック入力 [RSI20] は，特にスマートフォンユーザからの知名度が高く，操作方法を理解しているユーザも多い．一方で，例えば「い」と入力する場合は人差し指を左上のキーに伸ばした後，さらに左に指をフリックする必要があるため，キーボードサイズ以上に指を動かす必要がある．また，指および手首の可動域を考慮してキーボードサイズを小さくした場合，キーサイズが小さいことによる誤入力の可能性がある．トグル入力は，入力したい文字が含まれるキーを複数回選択するという，フィーチャーフォンにも用いられている入力手法である．文字入力の規則性がシンプルである一方で，お段の文字を入力する際は 5 回の選択操作が必要になるため，疲労度の面で懸念がある．そこで，選択したいキーに指を向け，その状態を一定時間維持するホバー操作を用いた入力手法を採用した．本手法は，キーボードサイズ以上に指を動かす必要がなく，1 回の操作にて文字を入力できる．

### 1.3 貢献

本研究の貢献は以下の通りである．

- ホバーを用いた新規な文字入力手法を実現した．
- 3 回の実験を通して，従来より疲労度を低減した文字入力手法を模索した．
- ユーザビリティテストの結果，本手法は平均スコアとされる数値を上回った．
- 参加者へのアンケート調査の結果から，本手法における改善点を明らかにした．

### 1.4 本論文の構成

本論文の構成を述べる．まず，第 1 章において，本研究の背景，目的およびアプローチならびに貢献を示した．続く第 2 章においては，本研究に関連する研究を述べ，本研究の位置付けを示す．第 3 章において，本研究におけるベースラインの定義を示す．第 4 章において，本手法のシステムおよび使い方を示す．第 5 章において，キーレイアウトおよびパラメータの調整を目的として実施した予備実験の内容を示す．第 6 章において，本手法における腕の姿勢による影響および性能の調査を目的として実施した実験 1 の内容を示す．第 7 章において，腕を下げた状態における本手法を用いた文字入力が有用であるか調査するために実施した実験 2 の内容を示す．第 8 章において，議論および今後の課題を述べる．第 9 章において，本研究の結論を述べる．

## 第2章 関連研究

本章ではまず，設置型デバイスを用いた文字入力手法を述べる．次に，本研究では指を用いて文字入力を行うため，指先の検出に関する研究を述べる．その後，XR 上における腕の姿勢がインタラクションに及ぼす影響を述べる．

### 2.1 設置型デバイスを用いた文字入力

XR デバイス上にて使用可能な文字入力手法として，設置型デバイスである LeapMotion [Ult] または Kinect [Mic] を用いた文字入力がある [KN18,RSI20,喜多 19,小澤 15,大石 21,福仲 19,川口 19,塚田 21]．これらの文字入力手法は，デバイスを特定の位置に固定する必要があり，その有効範囲においてのみ使用できる．XR デバイスがもつ携帯性の高さを考慮すると，場所を制限しない文字入力手法が必要となるケースがある．

### 2.2 指先の検出

我々の手法では，ハンドインタラクションにて文字を入力するために，指先の位置を検出する必要がある．指先の位置を決定する研究は複数ある [WYY<sup>+</sup>20,ZHX<sup>+</sup>20,SNBK22,DH22]．例えば，Back-Hand-Pose [WYY<sup>+</sup>20] のように手形状を推定する方法がある．同研究は，応用例として仮想マウスおよび把持動作の検出システムを紹介しており，文字入力に限らず様々なインタラクションの可能性をもつ．一方で，同研究は機械学習を用いるため，推定誤差が生じる可能性がある．また，機械学習を用いる以上，学習データに存在する手とユーザの手が大きく異なれば，その誤差は大きくなる．本手法にて用いる指の情報は，現時点では人差し指先端の2次元的位置のみである．したがって，本研究では機械学習を用いず，画像処理によるシンプルな指先検出を行う．

### 2.3 XR 上における腕の姿勢がインタラクションに及ぼす影響

腕の姿勢は，XR 空間におけるインタラクションに影響を与える [LZSH22,ILY<sup>+</sup>21,SKWL17,LNV15,BCF<sup>+</sup>20,FKJ<sup>+</sup>23,FNEA13,HPM<sup>+</sup>17,BTHL23]．例えば，異なる腕の姿勢にてターゲット選択タスクを実施し，精度を調査した研究がある [LZSH22]．同研究では，腕を曲げた姿勢は伸ばした姿勢と比較してインタラクション精度が高いことが示されている．

腕の姿勢は、インタラクションを継続するうえで蓄積される疲労度にも影響がある。Iqbalら [ILY<sup>+</sup>21] は、VRにおける腕の疲労を軽減することが重要であると主張し、それを実現するための手法を提案した。提案手法とベースラインを比較した結果、ほとんどの参加者が日常生活においてベースラインよりも提案手法を利用することを望んだ。一方で、この手法は手にコントローラーを持つ必要がある。本研究では手にデバイスを持たず、ハンドインタラクションを用いた直感的な入力手法を開発する。

手にデバイスを持たず、腕を下ろしたままインタラクションを行える手法は複数ある [SKWL17, LNV15, BCF<sup>+</sup>20, FKJ<sup>+</sup>23]。これらは、LeapMotion, スマートウォッチまたはRotoWrist [SPKW<sup>+</sup>21] を使用することで、ハンズフリーなインタラクションを実現している。いずれの研究においても、腕を下ろした状態でのインタラクションは腕を上げた場合よりも疲労度が溜まりにくいことが示されている。

## 第3章 本研究におけるベースラインの定義

市販の XR デバイス上で利用可能な文字入力手法は複数存在するため、本研究においてベースラインとなる手法を決定する必要がある。例えば、図 3.1 に示すような仮想キーボードを指にて直接タッチする方法がある。仮想キーボードはユーザの目の前に表示されるため、文字入力の際には腕を上げて伸ばす必要がある。また、手首から伸びたレイおよび指のピンチ操作を用いる方法がある。関連研究として、同操作による文字入力手法が提案されている [JWDL22]。この方法では、ユーザは上腕を下ろした状態で、主に肘の動きを用いて文字を入力するため、先述の手法よりも疲労度が溜まりにくいと考える。我々の手法の有用性を主張するためには、より疲労度が溜まりにくい既存手法と性能を比較すべきであると考え、手首から伸びたレイおよび指のピンチ操作を用いる方法を本研究におけるベースラインとする。また、本研究では XR デバイスとして Meta Quest Pro [Met] を用いる。

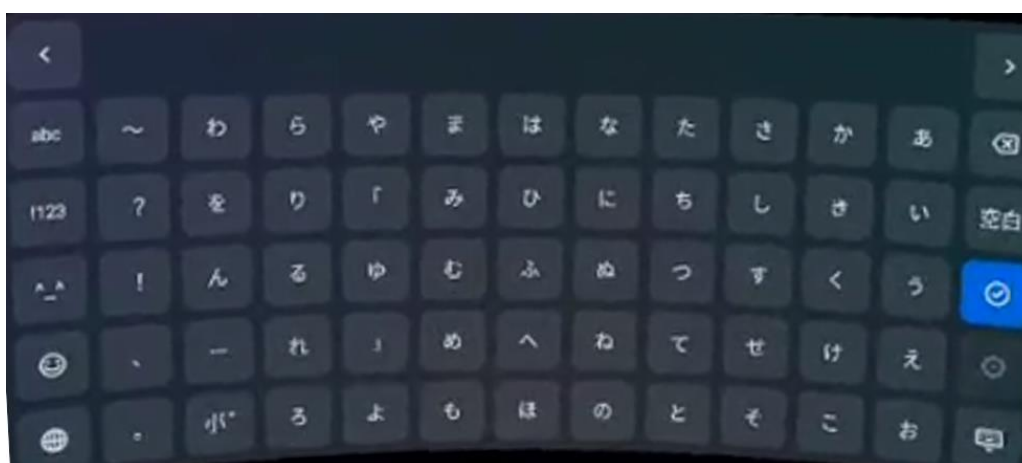


図 3.1: Meta Quest Pro における日本語入力用システムキーボード.

## 第4章 実装

本章では、本手法を実現するための手首装着型デバイス、デバイスから得た画像の処理手順、本手法におけるキーレイアウトおよび文字入力方法を述べる。

### 4.1 手首装着型デバイス

本節では、文字入力に使用する指先位置を決定するために用いる手首装着型デバイスを述べる。Back-Hand-Pose [WYY<sup>+</sup>20] を参考に、図 1.2a に示す手首装着型デバイスを設計した。同デバイスは、魚眼カメラ (ELP FHD01M-USB CAM)、土台およびマジックテープで構成される。カメラの視野角は  $180^\circ$  であり、 $1920 \times 1080$  ピクセルの画像が 30 fps で取得できる。土台は PLA フィラメントを使用して 3D プリンタ (Ultimaker3 Extended) にて作製した。

### 4.2 画像処理手順

本節では、手首装着型デバイスから得た図 1.2b に示すような画像から人差し指を検出する手順を述べる。カメラの視野角は  $180^\circ$  であるが、指が全範囲に届く可能性は無い。手首の屈曲および伸展動作における可動域はそれぞれ  $38^\circ$  および  $40^\circ$  であり、手首の橈骨および尺骨の可動域はそれぞれ  $28^\circ$  および  $38^\circ$  である [GWC<sup>+</sup>16]。画像の左右から 420 ピクセルを切り取った結果、 $1920 \times 1080$  ピクセルの画像は  $1080 \times 1080$  ピクセルの画像になった。その後、処理速度を維持するため、画像を  $224 \times 224$  ピクセルにリサイズした。次に、画像の色空間を RGB から HSV に変換した。肌色に近い  $[H, S, V] = [100-125, 10-255, 10-255]$  の範囲の画素を白、それ以外の画素を黒として 2 値化した。最後に、画像内において最も左上にある白い画素を指先の位置とした。

画像処理によって指先検出を行う研究は複数ある [SSP<sup>+</sup>14, CHS<sup>+</sup>21, BCF<sup>+</sup>15]。将来的には、先行研究を参考にし、本手法に高精度な背景除去および指先検出を導入したい。一方で、本研究の目的は新規な文字入力手法の実現および有用性の評価であり、この段階に多くの時間をかけすぎないことを意識した。

### 4.3 キーレイアウト

本手法は、日本のスマートフォンユーザーによく知られ、別の研究でも使用されている典型的なキーレイアウトを採用している [RSI20]。図 1.3 に本手法のキーレイアウトを示す。かな

テンキーは12個のキーからなり、うち10個のキー（初期状態で“あ”、“か”、“さ”、“た”、“な”、“は”、“ま”、“や”、“ら”および“わ”が表示されたキー）にて文字を入力する。それぞれのキーには、同じ子音かつ母音が異なる5つの文字が割り当てられている。“確定”と表示されたキーは、入力された文字を確定するキーである。“削除”と表示されたキーは、入力された文字を1文字削除するためのキーである。左下のキーを選択すると、最後に入力した文字を濁点、半濁点および小文字といった特殊文字に変換できる。

## 4.4 文字入力方法

本手法における文字入力方法を述べる。図1.3に示したキーを人差し指にて一定時間選択することで文字入力を行う。ユーザがキー上で一定時間ホバーを行うと、そのキー上に表示される文字が変化する。キー上に表示される文字が変化するまでの時間（以降、表示文字変更時間）は1.0秒とした。指がキーの外に出ると、そのときキー上に表示されている文字が入力される。また、指先として検出したピクセルがキーの枠内に入ってからキー選択が有効になるまでの時間（以降、キー有効化時間）は0.6秒とした。キー有効化時間を設定した理由は、ユーザが選択したくないキーの上を指が通過した際に、文字が入力されることを防ぐためである。例えば、左上のキーを選択した後に右下のキーを選択する際に、中央のキーの上を通過することがある。

ユーザが表示文字を変更するためにどの程度ホバーを行えば良いかを視覚的に理解できるように、ホバー時間に応じて選択されたキーの色が変化する。キーの色を変化するにあたり、ユーザのストレスになる色を使うべきでないと考えた。青色はストレスを軽減する効果がある[Lub12]ことから、ユーザにとって負荷にならない色であると考え、変化後のキーの色として採用した。ホバー時間が長くなるにつれて、キーの色が灰色から徐々に青色に変化する。

なお、キー有効化時間、表示文字変更時間およびキー色の変更方法は、予備実験、実験1および実験2を通して都度最適化を行う。詳細は各実験の章にて述べる。



## 第5章 予備実験：キーレイアウトおよびパラメータの調整

我々はまず、キーレイアウトおよびパラメータを調整するための実験を行った。

### 5.1 参加者

実験には、著者らと同じ研究室に所属する日本語母語話者1名（男性，23歳，右利き）が参加した。参加者には，XRデバイスの使用経験は無かった。

### 5.2 タスク

参加者は，提示されたフレーズを書き写す作業を行うよう求められた。参加者は同タスクを2セット分行った。1セットは図1.3aのキーボードを使った腕下げホバーによる文字入力で，もう1セットは図3.1のキーボードを使った，手首から伸びたレイおよび指のピンチ操作による文字入力である。各セットは練習セッションおよび本番セッションから成る。学習や疲労の影響を中和するため，フレーズを提示する順序はランダムとした。まず，本研究の目的を説明した。次に，参加者はそれぞれの入力手法について，キー配列を覚えるまで練習した。その後，提示されたフレーズを書き写した。練習セッションでは289文字から成る28フレーズを，本番セッションでは167文字から成る24フレーズを用いた（付録B.1および付録B.2）。フレーズセットはYokoyamaらのものを使用した[YTS21]。実験を通して，各参加者は合計912文字（＝2セット×（289文字＋167文字））を入力した。

### 5.3 議論

参加者の意見から，4つの課題が見つかった。1つ目は，キー選択が有効になったことが分かりにくいことである。現段階における我々の手法は，選択したキーが灰色から青色に変化する途中で内部的にキー選択が有効になるため，キー選択が有効になった際の視覚的な変化が無い。これにより，意図せず表示文字が変わったり，キーを選択し損ねることがある。2つ目は，ユーザが1回目の表示文字変更にかかるホバー時間（図1.3に示すような初期状態で表示されている文字から，次の文字を表示するまでにかかる時間）を短く感じることである。現段階では，指先として検出したピクセルがキーの枠内に入ったタイミングでホバー時間の

カウントが始まる。しかし、ユーザはキー中心付近まで人差し指を動かしてからホバーを意識的に開始するため、1回目の表示文字変更にかかるホバー時間が短いと感じる。3つ目は、キー有効化時間が短く、意図しない文字入力が発生することである。4つ目は、ユーザが2回目以降の表示文字変更時間を長いと感じることである。

これらの問題を解決するために、4つの対応を行った。1つ目は、キー選択が有効になるタイミングでキーが瞬時に青色になるようにしたことである。これにより、キー選択が有効になった際の視覚的变化を強く提示できる。なお、青色だったキーはホバー時間に応じて灰色に変わり、表示文字が変化したら再び青色に変化する。2つ目は、表示文字変更時間の測定開始タイミングを、キー選択が有効になった後に変更したことである。3つ目は、キー有効化時間を0.6秒から0.8秒に変更したことである。4つ目は、表示文字変更時間を1.0秒から0.8秒に変更したことである。2つ目、3つ目および4つ目の対応により、1回目の表示文字変更にかかるホバー時間は長くなり、それ以降の表示文字変更時間は短くなる。これらの対応は、あくまで著者ら以外の意見を取り入れたプロトタイプシステムを実現するために行ったものである。よって、後述する実験1の参加者らの意見を基に、再度システムの改良を行う。

なお、この実験では、入力すべきフレーズの数に参加者にとって大きな負担となった。実際に、各セットにおいて、タスクを完了するまでに約1時間を要した。よって、作業負担を軽減するために、各セットにおいて提示されるフレーズの数をも半分に減らした。

## 第6章 実験1：本手法における腕の姿勢による影響の調査および性能調査

本手法における腕の姿勢による影響を調査するため、実験を行った。本実験では、実験結果を基に本手法を改良することを目的として、ベースラインと本手法の性能比較を併せて行った。

### 6.1 参加者

実験には、著者らと同じ研究室に所属する日本語母語話者6名（全員男性，平均年齢22.67歳，全員右利き）が参加した。予備実験の参加者は，この実験に参加していない。XRデバイスの使用経験について，1名の参加者はXRデバイスを日常的に使用しており，3名の参加者は過去に数回使用したことがあり，2名の参加者は無かった。

### 6.2 タスク

参加者は，提示されたフレーズを書き写す作業を行うよう求められた。参加者は同タスクを3セット分を行った。3セットは，図1.3aのキーボードを使った腕下げホバーによる文字入力，同図のキーボードを使った腕上げホバーによる文字入力および図3.1のキーボードを使った，手首から伸びたレイおよび指のピンチ操作による文字入力から成る。各セットは練習セッションおよび本番セッションから成る。学習や疲労の影響を中和するため，フレーズを提示する順序はランダムとした。実施するタスクの順序についても，3種類の入力手法からなる6種類の実験パターンに参加者を1名ずつ割り当てることで，カウンターバランスをとった。まず，本研究の目的を説明した。次に，参加者はそれぞれの入力手法について，キー配列を覚えるまで練習した。その後，提示されたフレーズを書き写した。練習セッションでは95文字から成る14フレーズを，本番セッションでは81文字から成る12フレーズを用いた。フレーズセットはYokoyamaらのもの[YTS21]のうち，半分を用いた（付録B.1および付録B.2）。参加者は合計352文字（＝2セット×（95文字＋81文字））を入力した。

本研究の目的を達成するためには，疲労度の測定が不可欠である。そのため，図6.1に示す筋電位センサ（東京デバイセズIWS940）を用いて参加者の両肩における三角筋の筋電位を測定した。先行研究においても，この装置を用いて筋電位の測定が行われている[氏間15,LPW<sup>+</sup>20]。タスク実施中は，文字入力に用いる方の手と同じ方の三角筋の筋電位を常に記録した。三角筋の筋電位を測定する理由は，ゴリラアーム問題が肩周辺で発生するためである。なお，筋

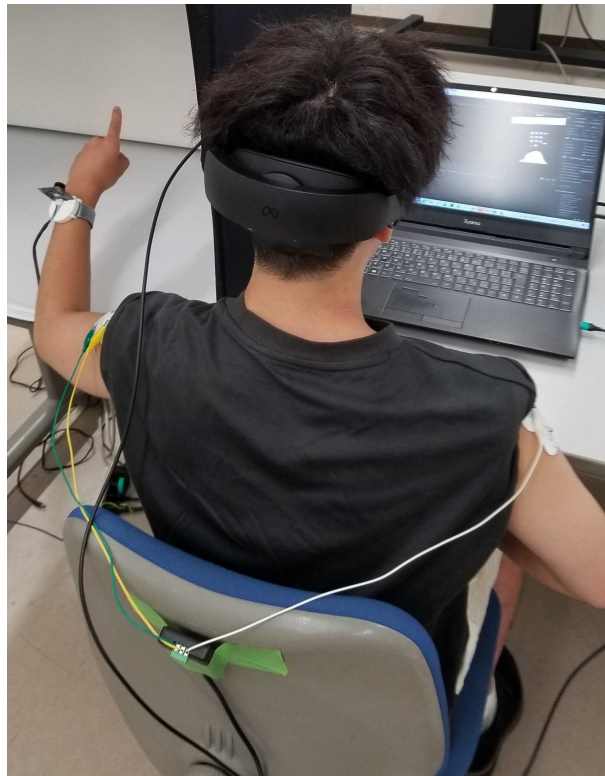


図 6.1: EMG を測定する様子.

表 6.1: 実験後アンケートの質問項目（抜粋）.

質問項目	内容
Q1	最も手・腕・肩が疲れた入力手法はどれか
Q2	2 番目に手・腕・肩が疲れた入力手法はどれか
Q3	今後本手法が改良された場合、ベースラインより本手法を使いたい
Q4	表示文字変更時間の長さは丁度良いか
Q5	キー有効化時間の長さは丁度良いか

電位の測定位置および筋肉のつき方は、測定値に影響する．同センサの取り扱い説明書の指示に従い、参加者が腕を下げて筋肉を弛緩させた状態（ $L$ ）および腕を上げて三角筋に力を入れた状態（ $U$ ）の筋電位を測定し、これらの値の平均および文字入力タスク中に得られた筋電位の平均（ $V$ ）を用いて、三角筋にかかる力の割合（ $FATIGUE$ ）を以下の式にて算出した．

$$FATIGUE = (V - L) / (U - L) \times 100[\%]$$

なお、疲労を評価するための手法として、Kinect [JSAR17] を用いたフレームワークが存在する．同フレームワークを用いることで、腕の疲労度を測定することが可能である．一方で、この測定手法は推定ベースであるため、測定誤差が生じる可能性がある．よって、本研究では推定ベースの手法ではなく、定量的な筋電位データを測定した．

我々は、参加者に対して 3 つのアンケートを実施し、定性的なデータを取得した．1 つ目は、NASA Task Load Index (NASA-TLX) [HS88] である（付録 A.2）．同アンケートでは、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 項目から、手法に対する作業負荷を測定する．2 つ目は、System Usability Scale (SUS) [Bro96] である（付録 A.3）．同アンケートでは 10 項目から成る質問から、手法に対するユーザビリティを測定する．3 つ目は、全実験後に実施するアンケート（以降、実験後アンケート）である（表 6.1 および付録 A.4）．

## 6.3 結果

我々は、文字入力速度、誤入力率および  $FATIGUE$  を測定した．文字入力速度を評価するために、*Characters per Minute* ( $CPM$ ) を算出した． $CPM$  は、最初のキー操作から最後のキー操作までにかかった時間  $S$  および最終的に入力された文字列の長さ  $|T|$  を用いて、以下の式にて計算される [AS09]．

$$CPM = \frac{|T| - 1}{S} \times 60$$

誤入力率を評価するために、*Total Error Rate* ( $Total\ ER$ ) を算出した． $Total\ ER$  は、入力された文字列のうち正しく入力された文字の数  $C$  (*Correct*)、誤って入力され修正されな

表 6.2: 実験 1 における実験後アンケートの結果.

質問項目	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Q1	腕上げホバー	腕下げホバー	腕上げホバー	腕上げホバー	腕上げホバー	腕上げホバー
Q2	腕下げホバー	腕上げホバー	腕下げホバー	腕下げホバー	ベースライン	腕下げホバー
Q3	ややそう思う	ややそう思う	ややそう思う	あまりそう思わない	ややそう思う	あまりそう思わない
Q4	丁度よい	少し短い	少し長い	丁度よい	少し長い	非常に長い
Q5	少し短い	非常に短い	丁度よい	少し短い	少し長い	非常に短い

かった文字の数  $INF$  (*Incorrect Not Fixed*) および誤って入力されたが確定キーの押下までに修正された文字の数  $IF$  (*Incorrect Fixed*) を用いて、以下の式にて算出される [AS09].

$$Total\ ER = \frac{INF + IF}{C + INF + IF} \times 100\%$$

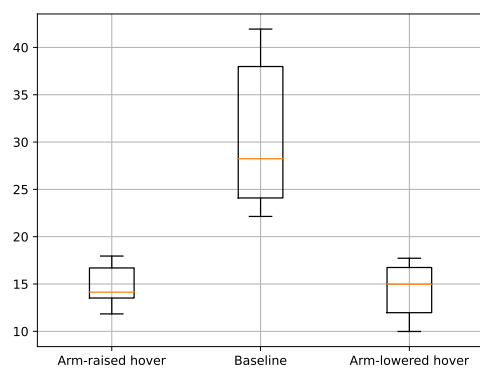
腕下げホバー、腕上げホバーおよびベースラインを独立変数として、 $CPM$ 、 $Total\ ER$  および  $FATIGUE$  を従属変数として検定を行った. Shapiro-Wilk 検定の結果、 $CPM$  および  $Total\ ER$  は正規性を示したため、ANOVA 検定を行った後に Tukey の多重比較検定を行った.  $FATIGUE$  は正規性を示さなかったため、Friedman 検定を行った.

図 6.2 に、全参加者の本番セッションにおける  $CPM$ 、 $Total\ ER$  および  $FATIGUE$  の平均値を示す.  $CPM$  について、腕下げホバーは 14.33 (SD = 3.17), 腕上げホバーは 14.82 (SD = 2.39), ベースラインは 30.75 (SD = 8.71) であった. 有意差が示されたのは、腕上げホバーとベースラインとの間 ( $p < 0.05$ ) および腕下げホバーとベースラインとの間 ( $p < 0.05$ ) であった.  $Total\ ER$  について、腕下げホバーは 0.175% (SD = 0.121), 腕上げホバーは 0.164% (SD = 0.066), ベースラインは 0.036% (SD = 0.037) であった. 有意差が示されたのは、腕下げホバーとベースラインとの間 ( $p < 0.05$ ) および腕上げホバーとベースラインとの間 ( $p < 0.01$ ) であった.  $FATIGUE$  について、腕下げホバーは 7.36% (SD = 5.37), 腕上げホバーは 6.64% (SD = 4.77), ベースラインは 2.97% (SD = 3.92) であった. 有意差は示されなかった.

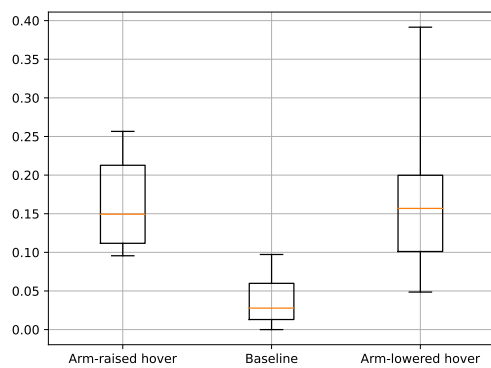
NASA-TLX スコアについて、腕下げホバーは 78.61, 腕上げホバーは 80.22, ベースラインは 63.78 であった. スコアが高いほど、作業負荷が高いことを示す. SUS スコアについて、腕下げホバーは 50.83, 腕上げホバーは 49.58, ベースラインは 75.42 であった. スコアが高いほど、ユーザビリティが高いことを示す. 表 6.2 に、参加者の実験後アンケートに対する回答を示す.

## 6.4 議論

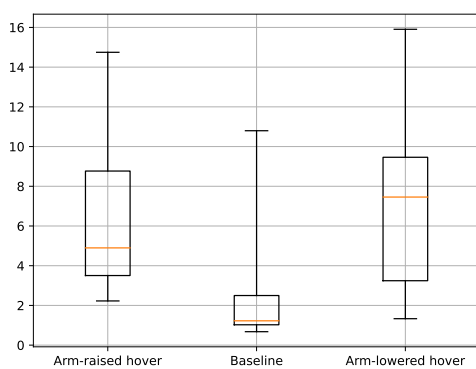
本手法において、腕を上げた状態と腕を下げた状態の  $CPM$ 、 $Total\ ER$  および  $FATIGUE$  に有意差はなかった.  $FATIGUE$  からは確認できないが、実験後アンケートの結果によると、最も疲れた入力手法について、5 名の参加者が腕上げホバーと回答した. 我々は、本手法には改良の余地があるため、腕の姿勢によるパフォーマンス面での差が生まれなかったと結論付けた. 言い換えれば、本手法において、腕を下げた状態にて文字入力を可能にすることは有効



(a) *CPM*.



(b) *Total ER*.



(c) *FATIGUE*.

図 6.2: 実験 1 の結果.

である。なお、このデバイスは腕を下げた状態に限らず、任意の腕の位置にて文字入力が可能であることに留意する必要がある。

腕下げホバーの性能について、本手法を使用した際の疲労度はベースラインより高かった。一方で、表 6.2 において P5 が回答したように、腕下げホバーが全入力手法の中で最も疲れにくかったと感じるユーザがいることは確かである。実際、この参加者の *FATIGUE* について、腕下げホバーは 1.33、ベースラインは 2.89 であった。同参加者と他の参加者との違いとして、手が大きいのか、手首の関節の可動域が広い可能性がある。このことは、ユーザにマッチした本手法を提示できれば、ベースラインよりも疲労を軽減できる可能性を示唆している。

参加者の意見から、本手法には 3 つの問題があると分かった。1 つ目は、キーのサイズおよび位置の問題で、指がキーに届かない（特に「あ」）参加者がいることである。2 つ目は、キー有効化時間が短いことである。3 つ目は、表示文字変更時間が長いことである。

これらの問題を解決するために、3 つの対応を行った。1 つ目に、各キーを中央に寄せ（図 1.3b）、これまでより低い人差し指先端の位置で、各キーを選択できるようにした。これにより、ユーザはキーを選択しやすくなる。2 つ目に、キー有効化時間を 0.8 秒から 1.0 秒に変更した。3 つ目に、表示文字変更時間を 0.8 秒から 0.7 秒に変更した。



## 第7章 実験2：腕下げホバーの有用性の調査

腕を下げた状態におけるホバー入力が有用であるか調査するために、実験2を行った。

### 7.1 参加者

実験には、著者らと同じ研究室に所属する日本語母語話者6名（全員男性、平均年齢22.33歳、全員右利き）が参加した。予備実験および実験1の参加者は、この実験に参加していない。XRデバイスの使用経験について、1名の参加者はXRデバイスを日常的に使用しており、5名の参加者は過去に数回使用したことがあった。

### 7.2 タスク

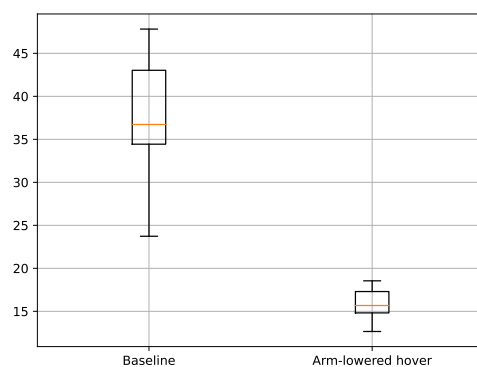
実験は基本的に実験1と同様に行った。異なる点は、腕上げホバーを用いないことおよび前章にて述べた3つの改良を加えたことである。

### 7.3 結果

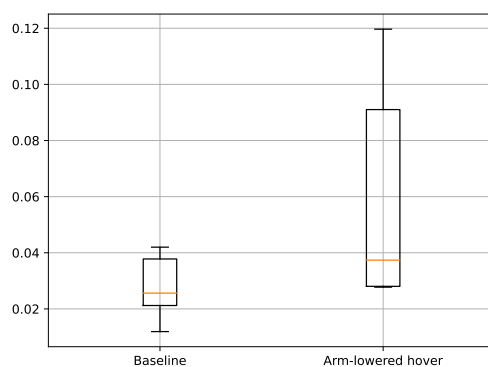
我々は、腕下げホバーおよびベースラインを独立変数として、測定した *CPM*、*Total ER* および *FATIGUE* を従属変数として検定を行った。Shapiro-Wilk 検定の結果、*CPM* および *Total ER* は正規性を示したため、*t* 検定を行った。*FATIGUE* は正規性を示さなかったため、Wilcoxon の符号順位検定を行った。

図7.1に、全参加者の本番セッションにおける *CPM*、*Total ER* および *FATIGUE* の平均値を示す。*CPM* について、腕下げホバーは15.82 (SD = 2.14)、ベースラインは37.30 (SD = 8.55)であった。両手法の間には、有意差が示された ( $p < 0.05$ )。 *Total ER* について、腕下げホバーは0.059% (SD = 0.042)、ベースラインは0.028% (SD = 0.012)であった。有意差は示されなかった。*FATIGUE* について、腕下げホバーは13.71% (SD = 7.65)、ベースラインは2.07% (SD = 1.25)であった。両手法の間には、有意差が示された ( $p < 0.05$ )。

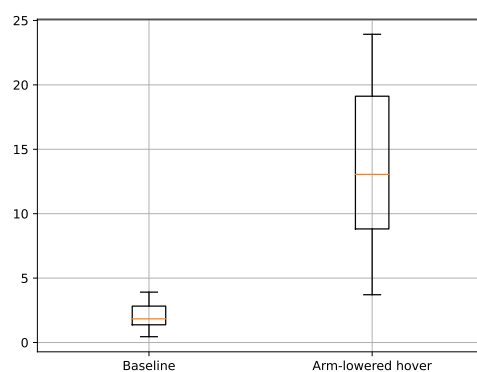
NASA-TLX スコアについて、腕下げホバーは59.73、ベースラインは52.50であった。SUS スコアについて、腕下げホバーは71.25、ベースラインは79.58であった。表7.1に、参加者の実験後アンケートに対する回答を示す。



(a) *CPM*.



(b) *Total ER*.



(c) *FATIGUE*.

図 7.1: 実験 2 の結果.

表 7.1: 実験 2 における実験後アンケートの結果.

質問項目	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Q1	腕下げホバー	腕下げホバー	腕下げホバー	ベースライン	腕下げホバー	ベースライン
Q2	ベースライン	ベースライン	ベースライン	腕下げホバー	ベースライン	腕下げホバー
Q3	強く思う	やや思う	やや思う	やや思う	やや思う	やや思う
Q4	少し長い	丁度よい	丁度よい	非常に長い	少し長い	丁度よい
Q5	少し長い	丁度よい	少し長い	非常に長い	少し長い	丁度よい

## 7.4 議論

腕下げホバーを使用した際の疲労度について、ベースラインよりも有意に高かった。実験後アンケートの回答には、「手の形に合ったキーレイアウトを採用してほしい」、「指がキーに届きにくい」という意見があった。この結果から、我々は従来のキーレイアウトを転用するのではなく、本手法に合わせたキーレイアウトを新規に提案する必要があると考えた。

一方で、我々の手法の有用性を確認できる点がある。まず、*Total ER* が改善された。キーレイアウト、キー有効化時間および表示文字変更時間を調整したことにより、ユーザによる意図しない文字入力の発生が減少し、本手法の誤入力率が低下したと考えられる。また、定性データの結果が改善された。今後本手法が改良された場合にベースラインより本手法を使いたいかという質問に対して、1 人が「強く思う」、5 人が「やや思う」と回答した。実験 1 では、4 人が「やや思う」、2 人が「あまりそう思わない」と回答したことを考慮すると、本手法は実験 1 より改良できたといえる。また、実験 1 と比較して、NASA-TLX スコアは 18.88 改善し、SUS スコアは 20.42 改善した。SUS スコアに関しては、平均スコアを上回った [Mea]。

## 第8章 議論および今後の課題

まず、実験から分かった本手法の問題をまとめる。1つ目は、ユーザごとに本手法を最適化すべきという点である。最適化すべきパラメータはキー有効化時間、表示文字変更時間およびキーレイアウトである。時間に関する2つのパラメータについて、ユーザが手法を使い始めたタイミングでは長めの時間を設定し、入力に慣れるにつれて時間を短縮することで最終的に最適化できると考える。IMU センサおよび機械学習を用いたホバー検出手法がある [DTSF22]。同手法を我々の手法と組み合わせてユーザがホバーを開始したタイミングを検出すれば、ユーザの慣れを必要とせずに最適化した入力手法を提供できる可能性がある。2つ目は、今回採用したキーレイアウトが本手法における指の動かし方とマッチしないことである。デバイスに搭載したカメラにて取得できる範囲のうち、指および手の可動域を考慮すると、半円状のキー配置が良い可能性がある。3つ目は、筋電位の測定位置が適していない可能性である。実験1および実験2では、ゴリラアーム問題が肩周りに発生することを考慮し、三角筋の筋電位を測定した。しかし、肩から手までの筋電位を計測し、腕全体の疲労度を測定すべきであったと考える。特に、本手法とベースラインでは前腕の姿勢が明らかに異なるため、同部分の筋電位を測定することでユーザが感じる疲労度を正確に確認できる可能性がある。

一方で、本手法の有用性を確認できる点がある。前章にて述べたように、今後本手法が改良された場合にベースラインより本手法を使いたいと考えるかについて、ほとんどの参加者が本手法の利用意思を示している。*Total ER* はベースラインに近い値を示し、*SUS* スコアは平均を上回った。また、著者が実験2を行ったところ、*FATIGUE* について、腕下げホバーは0.51、ベースラインは2.01であった。また、腕下げホバーの *CPM* は20.39、*Total ER* は0.000であった。このことから、ユーザに対し、最適化した本手法および使い慣れるための時間を提供することにより、ベースラインより疲労度を低減できると考える。

本手法をより使いやすくするために、音あるいは振動によるフィードバックを求める意見があった。触覚フィードバックを付与することにより、パフォーマンスが向上する可能性がある [DA23, BPG<sup>+</sup>06, MBS97]。実際に、空中において QWERTY キーボードを用いた文字入力を行う際に触覚フィードバックを付与することで、入力速度が16%向上し、エラー率が26%減少したという報告がある [DA23]。このような改良を加えることで、上記の問題を解決するだけでなく、ユーザがベースラインの代わりに使いたいと思う文字入力手法を実装できる可能性がある。また、改良後の本手法を、左利きまたは様々な年齢層など、多様な属性のユーザに使用してもらうことで、有用性をより強く主張できると考える。

## 第9章 おわりに

我々は、XR 向けに疲労を軽減するためのホバーを用いた日本語入力手法を実装した。本手法は、予備実験、実験1および実験2を通して改善を行った。その結果、*Total ER* はベースラインに近づき、SUSの結果は平均スコアを上回った。現時点では、ベースラインと比較して疲労を有意に軽減する手法を実装できていない。一方で、定性データは将来的に本手法の有用性を確認できる可能性を示唆している。前章にて示した改善を行うことで、ベースラインより疲労を低減した文字入力手法を実装できると考える。

## 謝辭

## 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*, pp. 100–105. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009.
- [BCF<sup>+</sup>15] Nadia Brancati, Giuseppe Caggianese, Maria Frucci, Luigi Gallo, and Pietro Neroni. Robust Fingertip Detection in Egocentric Vision Under Varying Illumination Conditions. In *2015 IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops*, pp. 1–6. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015.
- [BCF<sup>+</sup>20] Eugenie Brasier, Olivier Chapuis, Nicolas Ferey, Jeanne Vezien, and Caroline Appert. ARPads: Mid-Air Indirect Input for Augmented Reality. In *2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 332–343. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020.
- [BPG<sup>+</sup>06] Jennifer L. Burke, Matthew S. Prewett, Ashley A. Gray, Liuquin Yang, Frederick R. B. Stilson, Michael D. Coovert, Linda R. Elliot, and Elizabeth Redden. Comparing the Effects of Visual-Auditory and Visual-Tactile Feedback on User Performance: A Meta-Analysis. In *Proceedings of the 8th International Conference on Multimodal Interfaces*, pp. 108–117. Association for Computing Machinery, 2006.
- [Bro96] John Brooke. SUS: A Quick and Dirty Usability Scale. In *Usability Evaluation in Industry*, Vol. 189, pp. 189–194. Taylor & Francis, 1996.
- [BTHL23] Muhammad Abu Bakar, Yu-Ting Tsai, Hao-Han Hsueh, and Elena Carolina Li. CrowbarLimbs: A Fatigue-Reducing Virtual Reality Text Entry Metaphor. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 29, No. 5, pp. 2806–2815, 2023.
- [CHS<sup>+</sup>21] Yung-Han Chen, Chi-Hsuan Huang, Sin-Wun Syu, Tien-Ying Kuo, and Po-Chyi Su. Egocentric-View Fingertip Detection for Air Writing Based on Convolutional Neural Networks. Vol. 21, No. 13, 2021. 16 pages.
- [DA23] Tafadzwa Joseph Dube and Ahmed Sabbir Arif. Ultrasonic Keyboard: A Mid-Air Virtual Qwerty with Ultrasonic Feedback for Virtual Reality. In *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*. Association for Computing Machinery, 2023. 8 pages.

- [DH22] Nathan Devrio and Chris Harrison. DiscoBand: Multiview Depth-Sensing Smart-watch Strap for Hand, Body and Environment Tracking. In *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. Association for Computing Machinery, 2022. 13 pages.
- [DTSF22] Rhett Dobinson, Marc Teyssier, Jürgen Steimle, and Bruno Fruchard. MicroPress: Detecting Pressure and Hover Distance in Thumb-to-Finger Interactions. In *Proceedings of the 2022 ACM Symposium on Spatial User Interaction*. Association for Computing Machinery, 2022. 10 pages.
- [FKJ<sup>+</sup>23] Jacqui Fashimpaur, Amy Karlson, Tanya R. Jonker, Hrvoje Benko, and Aakar Gupta. Investigating Wrist Deflection Scrolling Techniques for Extended Reality. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Association for Computing Machinery, 2023. 16 pages.
- [FNEA13] Farzin Farhadi-Niaki, S. Ali Etemad, and Ali Arya. Design and Usability Analysis of Gesture-Based Control for Common Desktop Tasks. In *Human-Computer Interaction. Interaction Modalities and Techniques*, pp. 215–224. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [GWC<sup>+</sup>16] Deanna Gates, Lisa Walters, Jeffrey Cowley, Jason Wilken, and Linda Resnik. Range of Motion Requirements for Upper-Limb Activities of Daily Living. *The American journal of occupational therapy : official publication of the American Occupational Therapy Association*, Vol. 70, pp. 1–10, 2016.
- [HPM<sup>+</sup>17] Jeffrey T. Hansberger, Chao Peng, Shannon L. Mathis, Vaidyanath Areyur Shanthakumar, Sarah C. Meacham, Lizhou Cao, and Victoria R. Blakely. Dispelling the Gorilla Arm Syndrome: The Viability of Prolonged Gesture Interactions. In *Virtual, Augmented and Mixed Reality*, pp. 505–520. Springer International Publishing, 2017.
- [HRGMI14] Juan David Hincapié-Ramos, Xiang Guo, Paymahn Moghadasian, and Pourang Irani. Consumed Endurance: A Metric to Quantify Arm Fatigue of Mid-Air Interactions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1063–1072. Association for Computing Machinery, 2014.
- [HS88] Sandra G. Hart and Lowell E. Staveland. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In *Human Mental Workload*, Vol. 52, pp. 139–183. Advances in Psychology, 1988.
- [ILY<sup>+</sup>21] Hasan Iqbal, Seemab Latif, Yukang Yan, Chun Yu, and Yuanchun Shi. Reducing Arm Fatigue in Virtual Reality by Introducing 3D-Spatial Offset. *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 64085–64104, 2021.



- [JSAR17] Sujin Jang, Wolfgang Stuerzlinger, Satyajit Ambike, and Karthik Ramani. Modeling Cumulative Arm Fatigue in Mid-Air Interaction Based on Perceived Exertion and Kinetics of Arm Motion. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 3328–3339. Association for Computing Machinery, 2017.
- [JWDL22] Haiyan Jiang, Dongdong Weng, Xiaonuo Dongye, and Yue Liu. PinchText: One-Handed Text Entry Technique Combining Pinch Gestures and Hand Positions for Head-Mounted Displays. *International Journal of Human–Computer Interaction*, pp. 1–17, 2022.
- [KN18] Kosuke Komiya and Tatsuo Nakajima. A New Japanese Input Method for Virtual Reality Applications. In *Human-Computer Interaction. Interaction Technologies*, pp. 43–55. Springer International Publishing, 2018.
- [LNV15] Mingyu Liu, Mathieu Nancel, and Daniel Vogel. Gunslinger: Subtle Arms-Down Mid-Air Interaction. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, pp. 63–71. Association for Computing Machinery, 2015.
- [LPW<sup>+</sup>20] Ying-Ju Lin, Parinya Punpongsanon, Xin Wen, Daisuke Iwai, Kosuke Sato, Marianna Obrist, and Stefanie Mueller. FoodFab: Creating Food Perception Illusions Using Food 3D Printing. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13. Association for Computing Machinery, 2020.
- [Lub12] Lesley Lubos. The Role of Colors in Stress Reduction. *Liceo Journal of Higher Education Research*, Vol. 5, No. 2, pp. 95–103, 2012.
- [LZSH22] Xiaolong Lou, Qiping Zhao, Yan Shi, and Preben Hansen. Arm Posture Changes and Influences on Hand Controller Interaction Evaluation in Virtual Reality. *Applied Sciences*, Vol. 12, No. 5, 2022. 22 pages.
- [MBS97] Mark R. Mine, Frederick P. Brooks, and Carlo H. Sequin. Moving Objects in Space: Exploiting Proprioception in Virtual-Environment Interaction. In *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 19–26. ACM Press/Addison-Wesley Publishing, 1997.
- [Mea] MeasuringU. Measuring Usability with the System Usability Scale (SUS). <https://measuringu.com/sus/>. (最終閲覧日：2024年1月9日) .
- [Met] Meta. Meta Quest Pro. <https://www.meta.com/jp/en/quest/quest-pro/>. (最終閲覧日：2024年1月9日) .
- [Mic] Microsoft. Azure kinect dk. <https://azure.microsoft.com/ja-jp/products/kinect-dk>. (最終閲覧日：2024年1月9日) .

- [NBZ20] Anh Nguyen, Samuel Bittman, and Markus Zank. Text Input Methods in Virtual Reality Using Radial Layouts. In *Proceedings of the 26th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. Association for Computing Machinery, 2020. 3 pages.
- [RSI20] Md. Abdur Rahim, Jungpil Shin, and Md. Rashedul Islam. Gestural Flick Input-Based Non-Touch Interface for Character Input. *The Visual Computer*, Vol. 36, No. 8, pp. 1559–1572, 2020.
- [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*, pp. 1–13. Association for Computing Machinery, 2018.
- [SKWL17] Shaishav Siddhpuria, Keiko Katsuragawa, James R. Wallace, and Edward Lank. Exploring At-Your-Side Gestural Interaction for Ubiquitous Environments. In *Proceedings of the 2017 Conference on Designing Interactive Systems*, pp. 1111–1122. Association for Computing Machinery, 2017.
- [SNBK22] Yatharth Singhal, Richard Huynh Noeske, Ayush Bhardwaj, and Jin Ryong Kim. Improving Finger Stroke Recognition Rate for Eyes-Free Mid-Air Typing in VR. In *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Association for Computing Machinery, 2022. 9 pages.
- [SPKW<sup>+</sup>21] Farshid Salemi Parizi, Wolf Kienzle, Eric Whitmire, Aakar Gupta, and Hrvoje Benko. RotoWrist: Continuous Infrared Wrist Angle Tracking Using a Wristband. In *Proceedings of the 27th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. Association for Computing Machinery, 2021. 11 pages.
- [SSP<sup>+</sup>14] Jie Song, Gábor Sörös, Fabrizio Pece, Sean Ryan Fanello, Shahram Izadi, Cem Keskin, and Otmar Hilliges. In-Air Gestures around Unmodified Mobile Devices. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 319–329. Association for Computing Machinery, 2014.
- [Ult] Ultraleap. Leap motion controller 2. <https://leap2.ultraleap.com/leap-motion-controller-2/>. (最終閲覧日：2024 年 1 月 9 日) .
- [WYY<sup>+</sup>20] Erwin Wu, Ye Yuan, Hui-Shyong Yeo, Aaron Quigley, Hideki Koike, and Kris M. Kitani. Back-Hand-Pose: 3D Hand Pose Estimation for a Wrist-Worn Camera via Dorsum Deformation Network. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 1147–1160. Association for Computing Machinery, 2020.

- [YTS21] Kaisei Yokoyama, Rei Takakura, and Buntarou Shizuki. JoyFlick: Japanese Text Entry Using Dual Joysticks for Flick Input Users. In *Human-Computer Interaction – INTERACT 2021*, pp. 107–125. Springer International Publishing, 2021.
- [YWL<sup>+</sup>22] Shih-Ching Yeh, Eric Hsiao-Kuang Wu, Ying-Ru Lee, R. Vaitheeshwari, and Chen-Wei Chang. User Experience of Virtual-Reality Interactive Interfaces: A Comparison between Hand Gesture Recognition and Joystick Control for XRSPACE MANOVA. *Applied Sciences*, Vol. 12, No. 23, 2022.
- [ZHX<sup>+</sup>20] Yuxiao Zhou, Marc Habermann, Weipeng Xu, Ikhsanul Habibie, Christian Theobalt, and Feng Xu. Monocular Real-Time Hand Shape and Motion Capture Using Multi-Modal Data. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 5346–5355. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2020.
- [阿部 22] 阿部広河, 真鍋宏幸. VR コントローラを用いた寝ながら快適に文字入力が行える手法の提案. インタラクシオン 2022 論文集, pp. 497–501. 情報処理学会, 2022.
- [井上 19] 井上賢人, 梅澤猛, 大澤範高. 両手の指と掌の接触を用いたかな文字入力手法の検討. 第 81 回全国大会講演論文集, pp. 85–86. 情報処理学会, 2019.
- [喜多 19] 喜多修太郎, 小倉加奈代, Bista Bhed Bahadur, 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.
- [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. 人工知能学会全国大会論文集. 人工知能学会, 2014. 4 pages.
- [氏間 15] 氏間可織, 門村亜珠沙, 椎尾一郎. 義尾: 退化した機能を取り戻すための身体拡張. インタラクシオン 2015 論文集, pp. 349–354. 情報処理学会, 2015.
- [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. 第 14 回情報科学技術フォーラム 第 3 分冊, pp. 389–390. 情報処理学会, 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, pp. 676–682. ヒューマンインタフェース学会, 2019.
- [大石 21] 大石真佐貴, 物部寛太郎. VR におけるハンドトラッキングを用いた日本語入力手法の検討. 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集. 日本バーチャルリアリティ学会, 2021. 4 pages.

- [塚田 21] 塚田敏彦, 三和田靖彦. 生産工程で使える非接触データ入力手法の検討. 総合技術研究所研究報告, No. 23, 2021.
- [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.

# 著者論文リスト

## 本論文に関する論文および発表

- 査読あり国際会議論文
  1. Shingo Kato and Buntarou Shizuki. Hover-Based Japanese Input Method without Restricting Arm Position for XR. Australian Conference on Human-Computer Interaction, Association for Computing Machinery, 2023. 9 pages.
- 査読なし国内会議論文
  1. 加藤 進吾, 國分 晴利, 志築 文太郎. 人差し指のホバーを利用した仮名文字入力手法の提案. 第 30 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ論文集 (WISS2022), 日本ソフトウェア科学会, 2022 年 12 月, 3 pages.

## その他論文

- 査読あり国際会議論文
  1. Shogo Sekiguchi, Shingo Kato, Yoshiki Nishikawa, and Buntarou Shizuki. Authentication Method Using Opening Gestures. in Proceedings of 26th International Conference on Human-Computer Interaction, 2024. (To Appear)
- 査読なし国内会議論文
  1. 加藤 進吾, 志築 文太郎. 2 次元ポインティングタスクにおける再テスト信頼性の予備調査. 第 199 回ヒューマンコンピュータインタラクション研究会 (HCI199), 情報処理学会, 2022 年 8 月, 6 pages.
  2. 関口 将護, 加藤 進吾, 志築 文太郎. ドアノブの開扉ジェスチャを用いた個人認証システムの提案. 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論文集 (WISS2023), 日本ソフトウェア科学会, 2023 年 11 月, 3 pages.

## 付 録 A 実験に用いた書類

本研究にて用いた実施書，NASA-TLX アンケート，SUS アンケートおよび実験後アンケートを示す．

## A.1 実施書

### 実験概要

- ・ この実験では、3手法を用いて文字入力タスクを行っていただき、そのパフォーマンスを測定します。
- ・ 文字入力タスクとは、画面に表示された単語と同じ単語を入力する作業のことです。
- ・ 3手法とは、五十音キーボード上で利き手にてピンチ動作をして文字入力する手法、平仮名テンキー上で腕を上げた状態の非利き手にてホバー動作をして文字入力する手法、平仮名テンキー上で腕を下げた状態の非利き手にてホバー動作をして文字入力する手法を指します。
- ・ あなたの実験順序は、○○、○○、○○です。
- ・ 実験中に肩に電極パッドを貼り、筋電位を測定します。ご了承ください。
- ・ 全体の実験手順としては、機材の準備をする→文字入力(練習セッション)を行う→文字入力(本番セッション)を行う→2つのアンケートに回答する、を3セット繰り返し、最後に実験後アンケートに回答していただきます。
- ・ 練習セッションに用いる単語は14個、本番セッションに用いる単語は12個になります。

### ピンチ動作による文字入力方法

- 手首からレイが出るので、対象の文字にレイを合わせ、ピンチ動作をすると文字が入力されます。
- 文字を打ち終わったら、スペースキーを押してください。本実験では、スペースキーを入力確定キーとします。

### ホバー入力による文字入力方法

- 手首装着型デバイスから取得した画像から人差し指先端の位置を特定し、その位置にあるキーを選択して文字入力をします。
- 誤入力を防ぐため、遊びの時間(キーが選択されたと判定するまでの時間)を設けています。
- キーが選択されたと判定したとき、選択したキーが青色になります。
- その後は一定時間毎に表示文字が変わります。
- 指をキーの外に向けることで、その時表示されていた文字が入力されます。
- 濁点 & 半濁点 & 小文字キー、削除キー、確定キーは1ホバーごとに実行されます。
- 左下のキーは、濁点、半濁点、小文字の順番で実行されます。

### 注意

- 文字入力タスク中は座ったままでお願いします。筋電位センサが破損するので、急に立たないようにお願いします。
- 「早く正確に」文字入力を行ってください。
- 誤入力したら、各手法における削除キーを押して削除してください。
- 確定キーに指を置き続けるとホバーが実行される度に次の単語が表示されるので、キー選択できたらすぐにホバーをやめてください。

### 実験手順

0. 実験概要および各手法の文字入力方法の説明を行う。
1. 両肩に2箇所ずつ電極パッドを貼る。
2. 用いる文字入力方で使う方の肩の三角筋にセンサを取り付ける。
3. 力を抜いた状態で、EMGを10秒測定する。
4. 力を入れた状態で、EMGを10秒測定する。
5. HMDを装着してもらう。
6. (ホバー入力なら、)手首装着型デバイスを装着してもらう。
7. 練習セッションを開始し、筋電位の測定も開始する。
8. 5分休憩する。
9. 本番セッションを開始し、筋電位の測定も開始する。
10. NASA-TLXおよびSUSのアンケートに回答してもらう。
11. 5分休憩する。
12. 次の文字入力手法について、2から11を実施する。
13. 次の文字入力手法について、2から10を実施する。
14. 実験後アンケートを実施する。

図 A.1: 実施書。同書に記載した通りに実験を実施した。

## A.2 NASA-TLX アンケート

2023/12/24 21:31

NASA Task Load Index

## 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**

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？大きかったですか？小さかったですか？

小さい 大きい

**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？

小さい 大きい

**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何の程度でしたか。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？

弱い 強い

**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？

良い 悪い

**努力**

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けんめいに作業しなければならなかったか？

少ない 多い

**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？

低い 高い

次へ >>

<https://www.iplab.cs.tsukuba.ac.jp/~skato/nasa-tlx>

1/1

図 A.2: タスクアンケート-Part 1. 6つの指標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

<b>作業成績</b>	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	
<b>知的・知覚的要求</b>	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

図 A.3: タスクアンケート-Part 2. Part 1 に示した 6 つの指標のうち、ランダムに選ばれた 2 つの名前が表示されるため、重要な要因だと思う方を選択する。これを、全通りに対して行う。例として、「作業負荷」および「知的・知覚的要求」が選ばれた場合の画面を示す。

## A.3 SUS アンケート

2023/12/24 21:02

System Usability Scale (SUS)

### System Usability Scale (SUS)

Please rate the 10 indicators listed below on a 5-point scale from 1 (Strongly disagree) to 5 (Strongly agree).

(下記に書いた10の指標について、1（まったくそう思わない）～5（まったくそう思う）の5段階評価を行ってもらいます)

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



\* 必須の質問です

メール \*

☐ 返信に表示するメールアドレスとして skato@iplab.cs.tsukuba.ac.jp を記録する

Name (名前) \*

回答を入力

Condition (条件) \*

- ☐ ベースライン
- ☐ 腕上げホバー
- ☐ 腕下げホバー



[https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSf4XdBLfYx1s74ek3MMz\\_Q1RaHXJlYvORveXRn9DTlgIq6img/viewform](https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSf4XdBLfYx1s74ek3MMz_Q1RaHXJlYvORveXRn9DTlgIq6img/viewform)

1/6

I think that I would like to use this system frequently (このシステム \*  
をしばしば使いたいと思う)

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

I found the system unnecessarily complex (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
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

I thought the system was easy to use (このシステムは容易に使え \*  
ると思った)

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>



I think that I would need the support of a technical person to be  
able to use this system (このシステムを使うのに技術専門家のサポ  
ートが必要とするかもしれない) \*

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

I found the various functions in this system were well integrated (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) \*

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

I thought there was too much inconsistency in this system (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) \*

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>



I would imagine that most people would learn to use this system <sup>\*</sup>  
very quickly (たいていのユーザは、このシステムの仕様方法につい  
て、素早く学べるだろう)

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

I found the system very cumbersome to use (このシステムはとて <sup>\*</sup>  
も扱いにくいと思った)

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

I felt very confident using the system (このシステムを使うのに自信 <sup>\*</sup>  
があると感じた)

1	2	3	4	5
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>



2023/12/24 21:02

System Usability Scale (SUS)

I needed to learn a lot of things before I could get going with this system (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
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

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



[https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSf4XdBLfYx1s74ek3MMz\\_Q1RaHXJlYoORveXRn9DTlgq6img/viewform](https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSf4XdBLfYx1s74ek3MMz_Q1RaHXJlYoORveXRn9DTlgq6img/viewform)

5/6

## A.4 実験後アンケート

実験 1 にて使用した実験後アンケートの内容を示す。実験 2 には、以下の内容から「腕上げホバー」の項目および「3 番目に使いたい文字入力手法」に関する質問を除外したものを使用した。

2023/12/24 22:11

実験後アンケート

### 実験後アンケート

skato@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

名前 \*

回答を入力

年齢（半角数字のみで回答お願いします） \*

回答を入力

性別 \*

☐ 男

☐ 女

☐ 回答しない



[https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSezYxFarovCrumtsq9ZjmOzdEPI\\_xA1hjfnKclioDxLReAQ/viewform](https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSezYxFarovCrumtsq9ZjmOzdEPI_xA1hjfnKclioDxLReAQ/viewform)

1/7

利き手 \*

- ☐ 右
- ☐ 左

HMDの使用経験 \*

- ☐ 無い
- ☐ 過去に数回程度
- ☐ 週に1回程度
- ☐ 日常的に使用している
- ☐ その他:

スマートウォッチの使用経験・使用頻度 \*

- ☐ 無いし、持っていない
- ☐ 無いが、持っている
- ☐ 過去に使っていた
- ☐ 月に数回使う
- ☐ 週に数回使う
- ☐ 毎日使う





最も手・腕・肩が疲れた入力手法はどれですか？ \*

- ☐ ベースライン手法
- ☐ 腕上げホバー
- ☐ 腕下げホバー

2 番目に手・腕・肩が疲れた入力手法はどれですか？ \*

- ☐ ベースライン手法
- ☐ 腕上げホバー
- ☐ 腕下げホバー

HMD上で文字入力を行う際、一番使いたい手法はどれですか？ \*

- ☐ ベースライン手法
- ☐ 腕上げホバー
- ☐ 腕下げホバー

その理由を教えてください。 \*

回答を入力



HMD上で文字入力を行う際、二番目に使いたい手法はどれですか \*

- ☐ ベースライン手法
- ☐ 腕上げホバー
- ☐ 腕下げホバー

その理由を教えてください. \*

回答を入力

HMD上で文字入力を行う際、三番目に使いたい手法はどれですか

- ☐ ベースライン手法
- ☐ 腕上げホバー
- ☐ 腕下げホバー

その理由を教えてください.

回答を入力

提案手法をより使いやすくするための意見や案があれば、教えてください.

回答を入力



上記の意見や案が採用され、手法が改善されたとします。HMD上で文字入力を行う際に、既存手法よりも提案手法による文字入力を行いたいと思いますか？

- ☐ 強くそう思う
- ☐ ややそう思う
- ☐ どちらともいえない
- ☐ あまりそう思わない
- ☐ 全くそう思わない

今回のホバー入力では、1ホバー時間（表示文字が変わるまでの時間）<sup>\*</sup>を0.8秒としました。操作を行うにあたり、この時間についてどう考えますか。

- ☐ 非常に長い
- ☐ 少し長い
- ☐ 丁度よい
- ☐ 少し短い
- ☐ 非常に短い



今回のホバー入力では、あ段が入力可能になるまでの時間を0.8秒とし \*  
ました。操作を行うにあたり、この時間についてどう考えますか。

- ☐ 非常に長い
- ☐ 少し長い
- ☐ 丁度よい
- ☐ 少し短い
- ☐ 非常に短い

その他、何か意見や思ったことがあれば記入してください。

回答を入力

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



## 付 録 **B** 実験に用いたフレーズセット

実験に用いたフレーズセットを示す。参加者は、提示されたフレーズを書き写す作業を行うよう求められた。

## B.1 練習セッション

ありがとう,ありがとう  
ガバエムじゃん,がばえいむじゃん  
投げ物使い切った,なげものつかいきった  
弾がない,たまがない  
敵がいる,てきがいる  
今日はラグい,きょうはらぐい  
あれ撃って,あれうって  
回復してる,かいふくしてる  
蘇生する,そせいする  
足音がする,あしおとがする  
安地が遠い,あんちがとおい  
高台取ろう,たかだいとろう  
Uber Eats,うーばーいーつ  
銃口曲がってる,じゅうこうまがってる  
//以下は予備実験でのみ使用  
ケチり過ぎた,けちりすぎた  
スマブラに勝った,すまぶらにかった  
夜は勝てない,よるはかてない  
眠過ぎ,ねむすぎ  
回線悪い,かいせんわるい  
面目ない,めんぼくない  
目が悪くて見えん,めがわるくてみえん  
飯抜けします,めしぬけします  
流石にヤバい,さすがにやばい  
リコイル制御,りこいるせいぎょ  
練習してきた,れんしゅうしてきた  
放っとけ,ほっとけ  
一人減らした,ひとりへらした  
グッドキル,ぐっどきる

図 B.1: 練習セッションにて使用したフレーズセット。実験時には、各行におけるカンマ以降の平仮名を参加者に入力してもらった。15 個目（「けちりすぎた」）以降のフレーズは、予備実験でのみ使用した。

## B.2 本番セッション

了解です,りょうかいです  
ごめんなさい,ごめんなさい  
わかりました,わかりました  
やっぱいいいわ,やっぱいいいわ  
ちょっと待って,ちょっとまって  
先に食べて,さきにたべて  
今出先です,いまでさきです  
少し遅れます,すこしおくれます  
筑波にいます,つくばにいます  
会議中,かいぎちゅう  
すぐに行きます,すぐいきます  
お風呂はいいや,おふろはいいや  
//以下は予備実験でのみ使用  
インタラクション,いんたらくしょん  
筑波大学,つくばだいがく  
レポート締め切り,れぽーとしめきり  
会議資料,かいぎしりょう  
資料印刷,しりょういんさつ  
水道代,すいどうだい  
午後休講,ごきゆうこう  
明日は休み,あしたはやすみ  
おやすみなさい,おやすみなさい  
ビデオ返却,びでおへんきやく  
論文読む,ろんぶんよむ  
土曜飲み会,どようのみかい

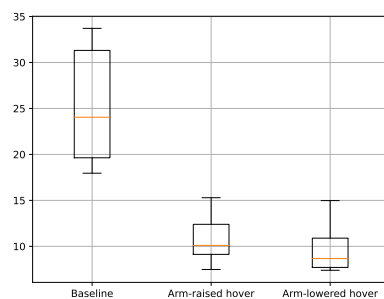
図 B.2: 本番セッションにて使用したフレーズセット。実験時には、各行におけるカンマ以降の平仮名を参加者に入力してもらった。13 個目（「いんたらくしょん」）以降のフレーズは、予備実験でのみ使用した。

## 付 録 C 実験1および実験2における練習セッションの結果

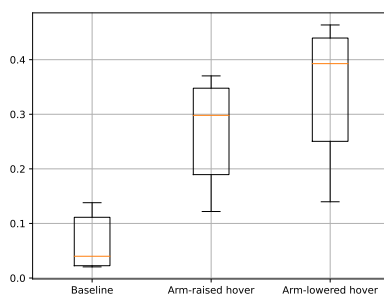
全参加者の練習セッションにおける *CPM* , *Total ER* および *FATIGUE* の平均値を示す.



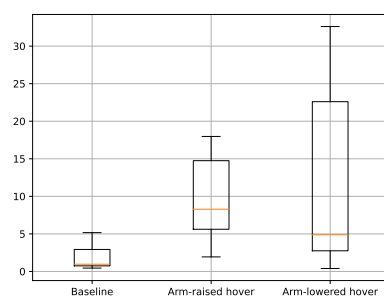
## C.1 実験1



(a) *CPM* .



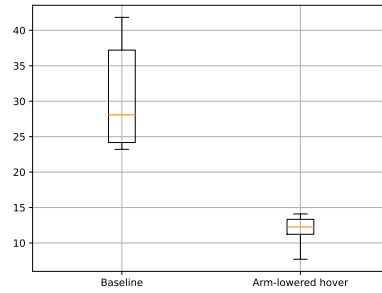
(b) *Total ER* .



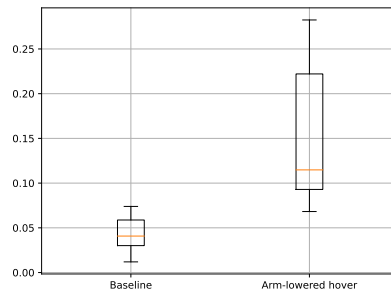
(c) *FATIGUE* .

図 C.1: 実験 1 の練習セッションにおける結果.

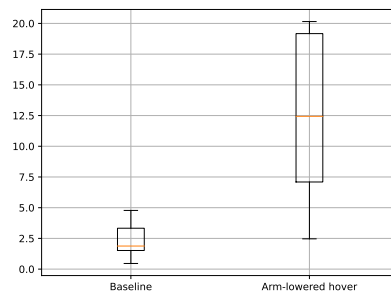
## C.2 実験2



(a) *CPM* .



(b) *Total ER* .



(c) *FATIGUE* .

図 C.2: 実験2 の練習セッションにおける結果.

## 付 録D 実験後アンケートに対する全参加者の 回答結果

実験後アンケートに対する全参加者の回答結果を示す。

D.1 実験1

2024/01/08 4 28

実験1アンケート

実験1アンケート

6 件の回答

[分析を公開](#)

名前

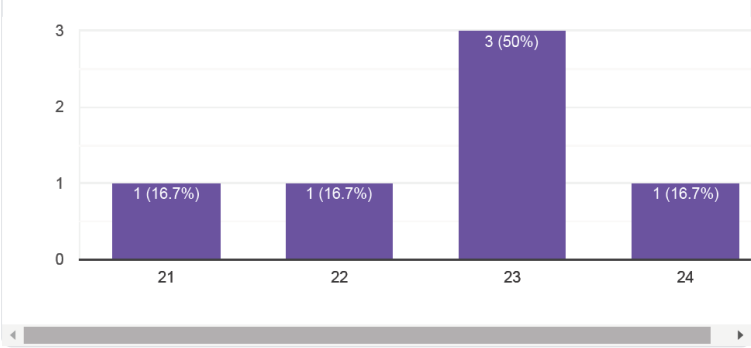
6 件の回答

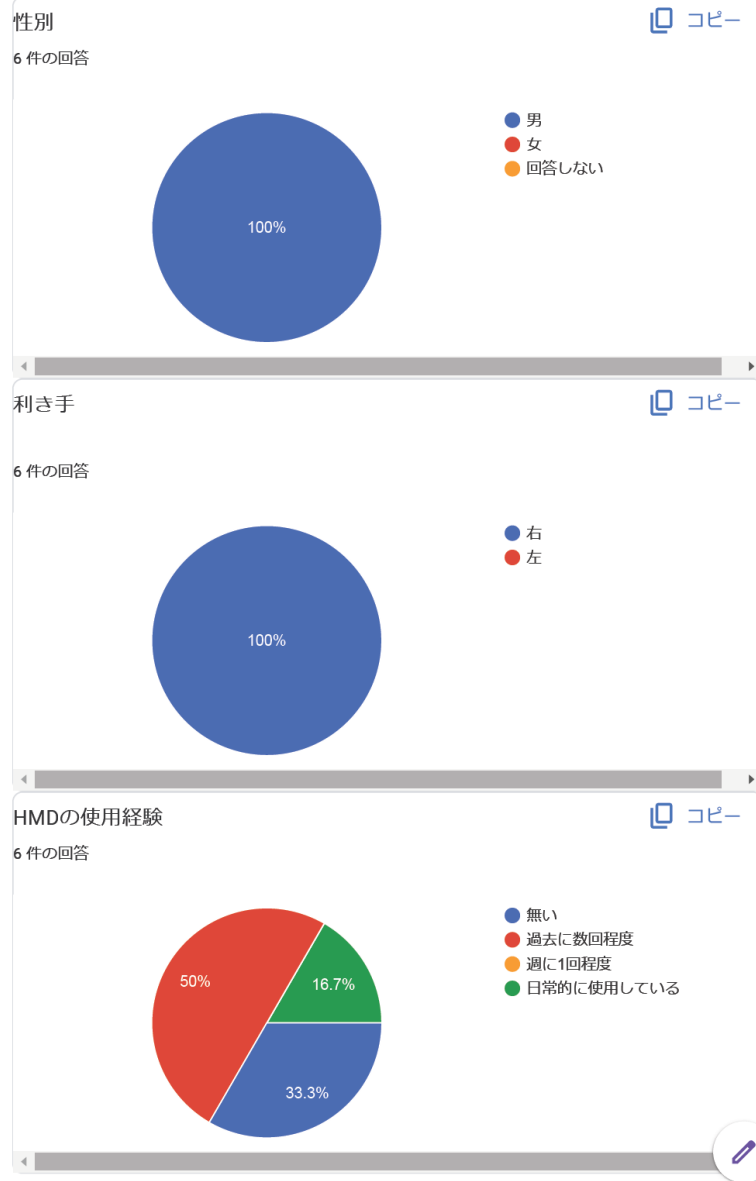


年齢（半角数字のみで回答お願いします）

コピー

6 件の回答

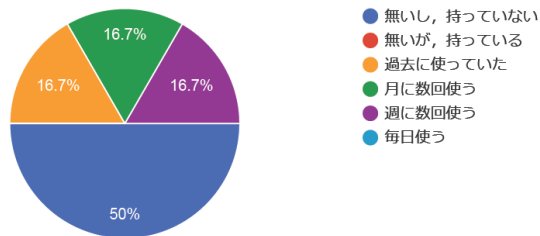




## スマートウォッチの使用経験・使用頻度

 コピー

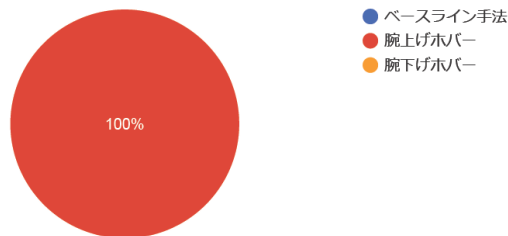
6 件の回答



## 最も手・腕・肩が疲れた入力手法はどれですか？

 コピー

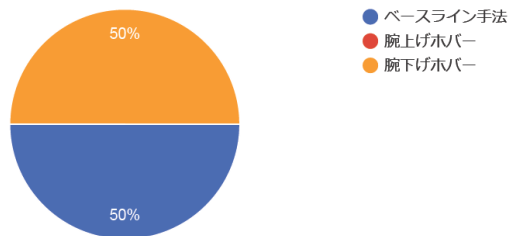
2 件の回答




## 2 番目に手・腕・肩が疲れた入力手法はどれですか？

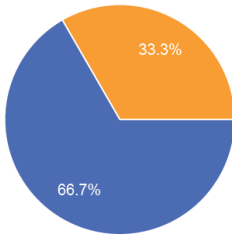
 コピー

2 件の回答



HMD上で文字入力を行う際、一番使いたい手法はどれですか  コピー

6件の回答



手法	割合
ベースライン手法	66.7%
腕上げホバー	33.3%
腕下げホバー	0%

その理由を教えてください。

6件の回答

疲労感を感じにくく、入力もしやすかったから。

直観的に扱える。カーソルの移動速度が速いので少ない腕の動きで文字を選択できる


一番腕に疲れがなかったから。

正確に入力しやすかったから

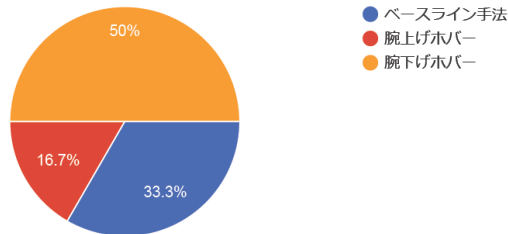
手首のみでの操作なので、わかりやすい。ベースライン手法だと腕全体を動かすため自由度が高すぎて少し使いづらく感じた。腕上げホバーと比べて腕を下げる状態で操作したため操作が安定したため。

最も入力しやすいから



HMD上で文字入力を行う際、二番目に使いたい手法はどれですか  コピー

6件の回答



その理由を教えてください。

6件の回答

腕下げホバーと迷ったが、ピンチをするのに手こずったり、腕を移動させるのに時間がかかったりして、疲れたから。

腕下げよりはカーソルの移動範囲が広がったため

腕上げよりはまし。


入力は難しいが腕の疲れはあまりないから

ある程度、事前知識がなくても動かせる点で選んだ。しかし、自由度が高くキーボードが密集していたため練習でミスが目立った

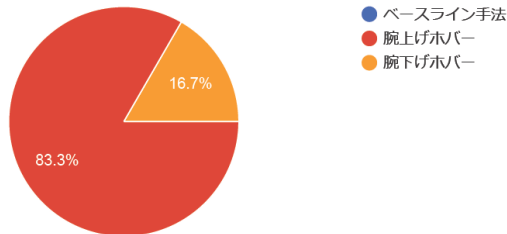
使いにくいけど、腕上げホバーよりかは使いやすいから





HMD上で文字入力を行う際、三番目に使いたい手法はどれですか  コピー

6件の回答



その理由を教えてください。

6件の回答

腕をずっと上げているいる必要があり、疲れたから。「あ」行を入力するのが難しく、何度を削除ボタンを押すのが面倒だったから。ずっと同じ位置に腕を維持させるのが大変だったから。

あ行や削除ボタンなど端にあるキーまで指が届きにくかったため

とにかくきつい。腕を上げてキープするのが、もう筋トレ。

腕や指がとにもかなり疲労したから

使いこなすのに時間が、かかりそう。腕上げだと手がぶれてしまうため操作が難しかった。とくに削除、あ行ボタンなどの上端のボタンが選択しにくいいため三番目となった

疲れるし操作性がよくない



提案手法をより使いやすくするための意見や案があれば、教えてください。

6件の回答

遊びの時間をもう少し長くする。人差し指を伸ばすのが大変だったので、それほど伸ばさなくても入力できるようにする。

デフォルト状態でキーが反応しないようにする。特に確定ボタン。移動中にキーがご入力されないように手の移動中はキーが反応しないような仕組みにする

今は手首の角度もつけないと上の段の入力ができないが、もう少しキーボードを小さくして、手首を動かさなくて済むとうれしい。（腕下げホバーは手首が疲れた）（右端、左端も指の移動だけで届くとうれしい）  
キー自体は（若干つかれるが）しっかりできると思う。  
中指の第3関節の出っ張りで認識されていることがあった。  
手首をまっすぐにしているときの手の甲が一番下の段にあるぐらいだったので、もう少し上にあるとよいと思う

個人の手の形に合わせて入力範囲をキャリブレーションする機能が欲しい  
手下げの時にノイズ？が入ってうまく認識されないことがあった、特にそれで判定が一瞬途切れただけで文字打ち直しになるのが使いづらかった

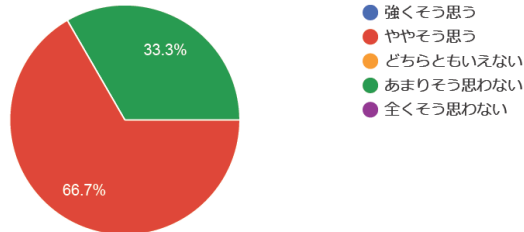
ホバー入力に関しては、環境によって変わってきそうだった。屋内の照明の度合いや時間などに影響が出そう。そして、狙って設定しているのかもしれないが、ベースライン手法とホバー入力手法では、濁音と小文字に順番が違っていたのが気になった。

キーボードのサイズを小さくして、指の移動量を少なくするべき。確定とされる方法を任意時間のホバーではなく別の方法がいいと思った。指の長さにもロバストに対応するため、カメラの設置位置を腕から任意の距離離れたところに設置したほうが良いと思った。



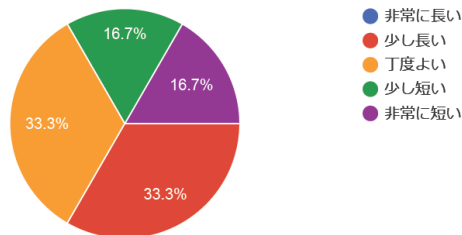
上記の意見や案が採用され、手法が改善されたとします。HMD上で文字入力を行う際に、既存手法よりも提案手法による文字入力を行いたいと思いますか？

6件の回答



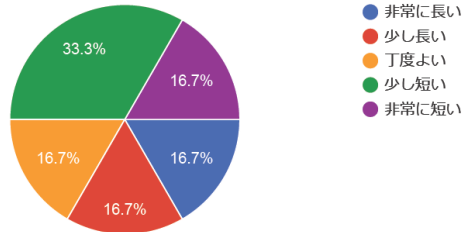
今回のホバー入力では、1ホバー時間（表示文字が変わるまでの時間）を0.8秒としました。操作を行うにあたり、この時間についてどう考えますか。

6件の回答



今回のホバー入力では、あ段が入力可能になるまでの時間を0.8秒としました。操作を行うにあたり、この時間についてどう考えますか。

6 件の回答



その他、何か意見や思ったことがあれば記入してください。

4 件の回答

準備がもう少し楽にできれば、日常的にも使えるようになると思いました。

実験終了後にシップがほしい

聴覚フィードバックほしい

入力文字系キーボードが遠い

入力可能になるまでの時間を数え始めるのが、キープが始まってから ということができたら、誤入力が減ると思う。（それができたら、0.7秒よりももっと短くてよいと思う）

ホバー入力手法は入力していてユーザ自身が経験を積むことでミスがなくなりそうだった。練習時間や、実験順序によっても結果が変わりそう。あとお誕生日おめでとうございます。

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



## D.2 実験2

2024/01/08 4:34

実験2アンケート

### 実験2アンケート

6件の回答

[分析を公開](#)

名前

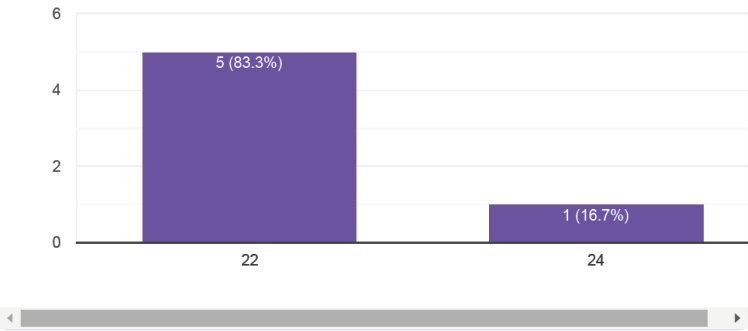
6件の回答



年齢（半角数字のみで回答お願いします）

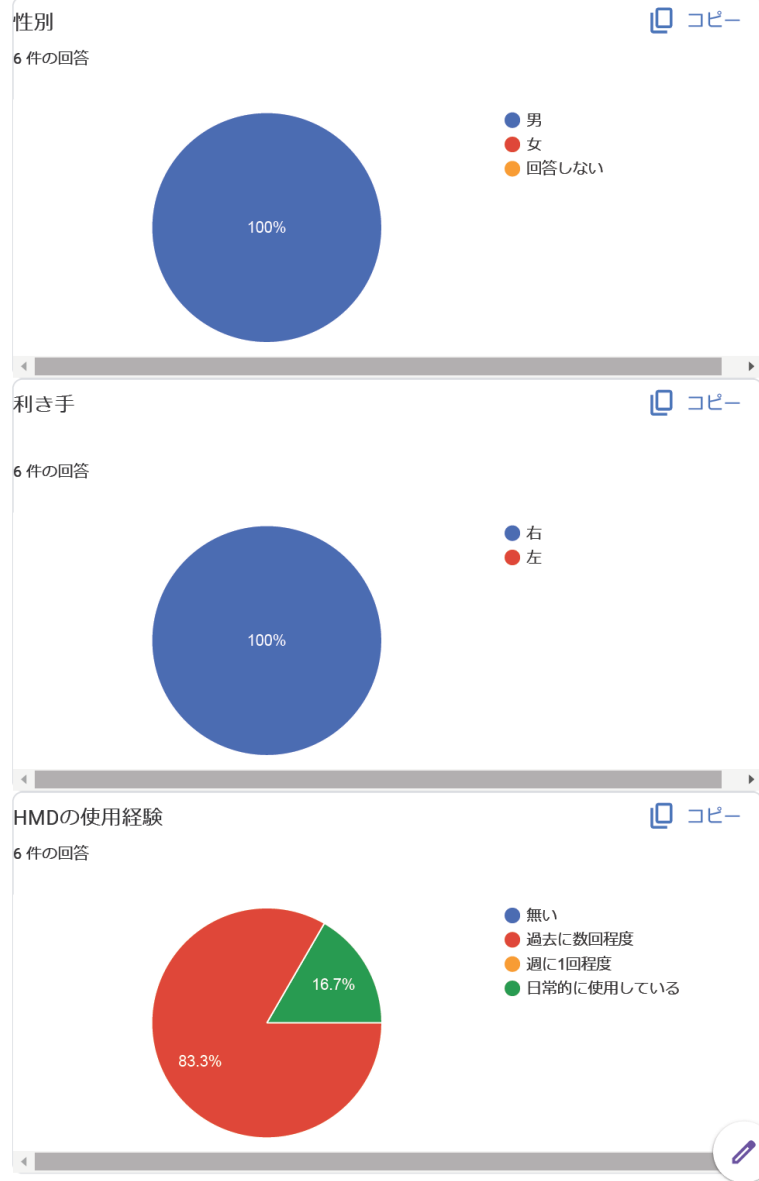
コピー

6件の回答



<https://docs.google.com/forms/d/1hADLuPYLzR71d9O-KIXbKolwNtIbRgKriwPbMzP8ag/viewanalytics>

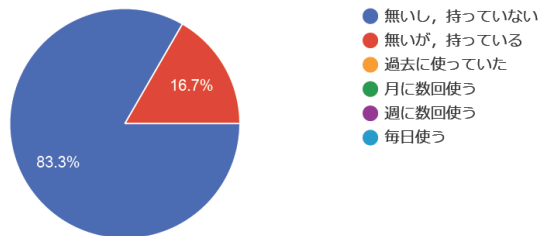
1/9



## スマートウォッチの使用経験・使用頻度

 コピー

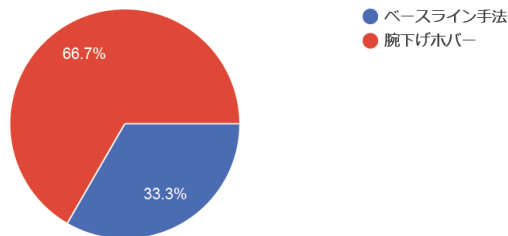
6件の回答



## 最も手・腕・肩が疲れた入力手法はどれですか？

 コピー

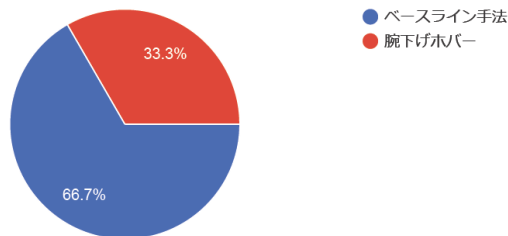
6件の回答



## 次に手・腕・肩が疲れた入力手法はどれですか？

 コピー

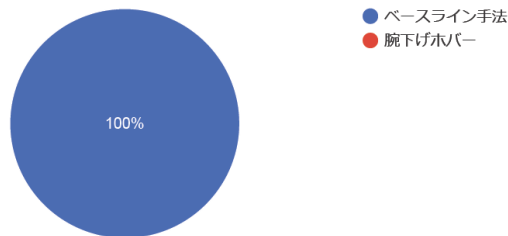
6件の回答



HMD上で文字入力を行う際、1番使いたい手法はどれですか

コピー

6件の回答



その理由を教えてください。

6件の回答

入力の精度が良かったため、ただ濁点の文字を入力する際には位置が遠い等の不満はあった

直感的だった

普段から利用している入力手法だったため、入力がしやすかった


入力速度が速い

速く入力できたから。ホバーで文字が切り替わるのを待つ時間がなかったから。

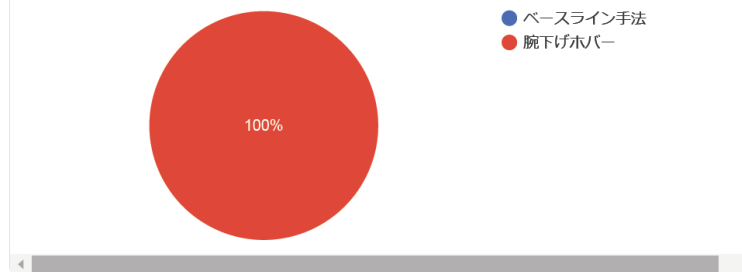
慣れているから。目的の文字を一回の動作で入力できるので、腕が疲れても長時間の文字入力をしないのであればベースラインのほうがいい





HMD上で文字入力を行う際、2番目に使いたい手法はどれですか  コピー

6件の回答



その理由を教えてください。

6件の回答

入力する際に指をかなり伸ばさないと届かない文字があったため

手首を固定して手を動かすという動作に慣れていなかった

入力に時間がかかるのがストレスだった。また、デバイスの装着の仕方が悪かったのか、入力しやすい領域があった（例えば、消去ボタンは指が届きにくかった）。

入力を間違えにくい

ある程度早く入力できたから。指は少し疲れたが、腕はあまり疲れなかったため。

まだ、使いにくい点、例えば、指の移動がしにくかったり、指先がじゃない部分の判定による誤入力を感じた。ただ腕を下したまま使えるのはいいと思ったので、腕を上げにくい状況だと、こちらの手法がよいと感じた。



提案手法をより使いやすくするための意見や案があれば、教えてください。

6 件の回答

指よりも手の甲が映り込むことが多かったため、装着位置を変えるといった指のみをはっきりと認識させる必要があると感じた

ホバーして入力文字が変わったときに音や振動によるフィードバックがあればいいと思った  
濁点のキーも表示が変わってほしかった

「ほぼ」のように「お」の段を連続で入力するときの場合はしんどいので、すべての文字が即座に入力できるとうれしい。

キー配列をより手の形状にあったものにする。ホバーによる切り替え時間を短くする。など

あ段の入力が難しかった。いつあ段の入力が確定するかわからなかったからである。入力する際にプログレスバーなどで、どの程度ホバーが完了したのか、あとどのくらいホバーすればよいのかわかるとよいかもしれない。

ホバー後の指のフリック方向で入力ができてもおもしろいかもしれない。ある程度ホバーさせることによって、その行の文字の入力を確定し、そのごフリックする。

文字入力中の文字を入力バーに反映してくれたら、見る箇所を集中できて入力しやすかった気がする。

腕が細いとカメラの位置がずれたときに感覚で入力しずらく感じた

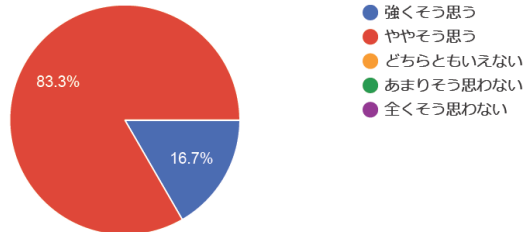
端に行くほど指を動かしにくかったので、端に行くほど指の移動量に少し補正がある楽だと感じた

母音がおまで行くとおになるまで保持になきやいけないのがつらかった。母音が奥になるにつれて入力しにくいのをどうにかしたい



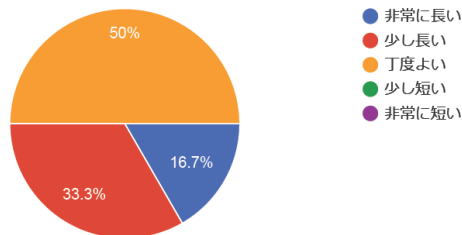
上記の意見や案が採用され、手法が改善されたとします。HMD上で文字入力を行う際に、既存手法よりも提案手法による文字入力を行いたいと思いますか？

6件の回答



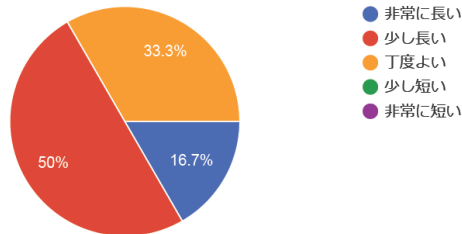
今回のホバー入力では、1ホバー時間（表示文字が変わるまでの時間）を0.7秒としました。操作を行うにあたり、この時間についてどう考えますか。

6件の回答



今回のホバー入力では、あ段が入力可能になるまでの時間を1秒としました。操作を行うにあたり、この時間についてどう考えますか。

6件の回答



その他、何か意見や思ったことがあれば記入してください。

3件の回答

提案手法においては意図しない入力を行ってしまわないように、キビキビと動作しなければならなかったと感じた（従来手法はピンチによる入力があったので、そのようなことはなかった）。

人差し指を上方向で11種類？のキーを選択することは大変なので、上下方向に分割したり、入力する指を分けたりすれば、人差し指の負担が軽減されると感じた。

一つの指だけを上にあげるといった動作がなかった。あと、個人のよる指の長さの調整や、カメラの傾きなどを変更できる機能があれば個人に合わせたキャリブレーションはしやすそうだと感じた

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

