



実身体を利用したバーチャルキーボード入力手法の提案

Proposal of a Virtual Keyboard Input Method Utilizing the Real Body

斧口紘也¹⁾, 嵯峨智²⁾

Hiroya ONOGUCHI, Satoshi SAGA

1) 熊本大学 大学院自然科学教育部 (〒 860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2 丁目 39 番 1 号, onoguchi@saga-lab.org)

2) 熊本大学 大学院先端科学研究部 (〒 860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2 丁目 39 番 1 号, saga@saga-lab.org)

概要: バーチャルキーボードなどのバーチャル UI は触覚フィードバックの欠如に起因する操作感の低下などが課題である。本研究では HMD を装着したユーザの手掌部へのフリックキーボードや前腕部への QWERTY キーボードの AR 表示により, 実身体を用いた触覚フィードバックを活用した文字入力手法を提案する。また本手法について既存の空中投影型のバーチャルキーボードとの比較を通じて操作感や操作精度に与える影響を評価する。

キーワード: バーチャルキーボード, 触覚, UI

1. はじめに

Head Mounted Display (HMD) を利用した拡張現実感 (Augmented Reality: AR) や人工現実感 (Virtual Reality: VR) の環境内では, ユーザーからの入力をシステムに伝える手段が限られている。多くは専用のコントローラなど少数のボタンやジョイスティックといったユーザーインターフェース (User Interface: UI), ハンドトラッキングによるジェスチャ認識のみによる入力であり, 操作できる自由度に限界がある。そこで, 自由度の高い入力方法として, VR/AR 環境にコンピューターグラフィックスを用いたバーチャル UI を表示し, 自身の手を用いて操作する手法がある。しかし映像上のバーチャル UI には視聴覚的なフィードバックがあるのみであり, 操作を行った実感や操作精度が満足に得られないという課題がある。また完全没入型の VR 環境内では Pseudo-Haptics による擬似的な触力覚提示を用いてバーチャル UI の操作に対するフィードバックが行われることがある一方で, AR 環境においては Pseudo-Haptics による動きの変化がもたらす空間的不整合をユーザーが容易に知覚できてしまうため, この効果が低減することが示されている [1]。

本研究では HMD 装着時に使用する自由度の高い入力方法としてのバーチャル UI に対し, 触覚フィードバックを付与することを目的とした。そのため, 自由度の高いバーチャル UI のひとつであるバーチャルキーボードに着目し, ユーザーの身体を用いた物理的な反力提示によるバーチャルキーボードを提案し, 提案したバーチャルキーボードの操作感や操作精度, 操作速度を比較検証した結果を報告する。

2. 提案手法

本研究ではユーザー自身の身体表面を利用してバーチャルキーボードの入力に対する触覚フィードバックを実現する 2 つの手法を提案する。ひとつはユーザーの非利き腕の前腕部に QWERTY 配列のバーチャルキーボードを重畳表示し, 腕時計を見るような姿勢で入力を行う手法 (図 1) である。もうひとつはユーザーの非利き手の手指に五十音配列のバーチャルキーボードを重畳表示し, フリック入力を行う手法 (図 2) である。

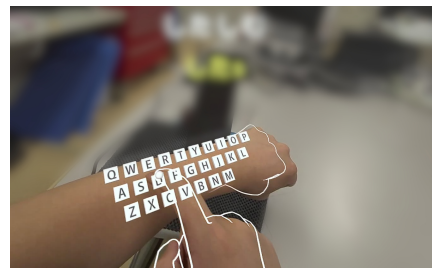


図 1: 前腕部に重畳表示されたバーチャル QWERTY キーボードで入力を行う様子

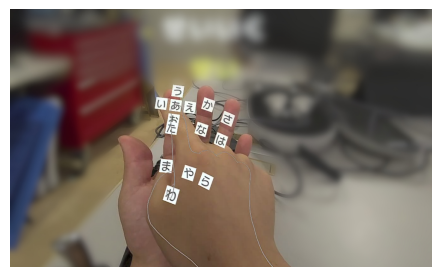


図 2: 手掌部に重畳表示されたバーチャルフリックキーボードで入力を行う様子



図 3: 前腕部に表示されたバーチャルキーボードを用いて実験を行う様子

これら 2 手法では、ユーザーが前腕部や手指・手掌部に接触するようにキーボード入力を行うことで自身の身体表面からの物理的な反力によって触覚フィードバックが生じられ、操作を行っている実感を高めることができる。

3. 実験

本提案手法の有効性を検証するために行った実験について説明する。本実験では提案手法を既存のバーチャル UI と比較するため、バーチャルキーボードを表示する場所を身体表面（前腕部または手掌部）、空中、物理表面上（机上）の 3 条件で変化させ、また物理的な QWERTY 配列のキーボードとモバイル端末上のフリック入力キーボードも用いて、タイピングテストを実施した。実験を行う様子を図 3 に示す。

本実験では Head Mounted Display (HMD) として Meta Quest 3 を使用し、ユーザーのハンドトラッキングを行うために UltraLeap 社製 Leap Motion Controller 2 を HMD の前面に取り付けて使用した。

本実験を通して得られた結果について述べる。実験に参加したのは 21 歳から 24 歳の男女 6 名（男性 5 名、女性 1 名）であり、平均年齢は 22.08 歳（母標準偏差 1.24）であった。実験の手順は以下の通りである。また、すべての条件においてキーの入力は利き手の人差し指のみで行うことを指示した。なお、順序効果の影響をなくすため、それぞれの実験条件の順序は実験協力者ごとにランダムに決定した。

1. 実験協力者は椅子に着座し、実験内容の説明を受ける
2. 実験用のプログラムでバーチャルキーボードを表示または物理キーボードを用意し、正しく入力が行えることを確認する
3. 1 分間のタイピングテストを行う
4. テスト結果を記録し、その場で 5 段階のリッカート尺度に基づく主観評価を行う
5. すべての条件でのテストが完了するまで 2 ～ 4 を繰り返す
6. すべての実験条件を比較し、入力のしやすさと入力の実感が高いと感じた順番にそれぞれランクを付ける

本実験の評価ではタイピングテストを通して得られる実測値のほかに、実験協力者が主観的に評価を行う設問を用

意した。設問は大きく 3 つに分かれており、1 つはバーチャルキーボードの操作について実験協力者の操作主体感や満足感を問うものである。こちらは合計 4 個の設問に対して 5 段階のリッカート尺度（1=まったく思わない ～ 5=とても思う）で回答する。実験協力者に提示した設問は以下の 4 つである。

- 入力はしやすかったか
- 自分の思ったとおりに入力できたか
- キーボードを操作する際、自分でキーボードを操作している実感があったか
- 現実のキーボードを操作しているのと同様に感じられたか

2 つ目は Game Experience Questionnaire (GEQ)[2] に基づく 33 個の設問である。GEQ はゲームの体験を 7 つの指標のスコアによって評価する手法であり、VR 環境での学習や触覚体験の領域で取り入れられている [3]。本実験では GEQ の Core Module と呼ばれるパートを評価に取り入れており、合計 33 個の設問の回答に基づき、実験協力者の体験を Sensory and Imaginative Immersion（感覚的没入感）、Flow（流れ）、Competence（有能性）、Positive and Negative Affect（良い影響・悪い影響）、Tension（緊張感）、そして Challenge（課題）の 7 つの観点で点数化する。実験協力者は設問に対して 5 段階のリッカート尺度（1: まったく感じない ～ 5: つよく感じる）で回答する。

そして 3 つ目に本実験で体験したバーチャルキーボードおよび現実のキーボードの 8 つの入力条件に対して、入力をしやすいと感じた順番および入力した実感があったと感じた順番を回答してもらう。

4. 実験結果

ここではそれぞれの実験結果について説明する。ただし図 4～図??において、条件を示す記号とその内容は次のように対応している。

Q/F: バーチャル QWERTY キーボードを前腕部に表示する

Q/A: バーチャル QWERTY キーボードを空中に表示する

Q/D: バーチャル QWERTY キーボードを机上に表示する

F/H: バーチャルフリックキーボードを手指に表示する

F/A: バーチャルフリックかなキーボードを空中に表示する

F/D: バーチャルフリックかなキーボードを机上に表示する

Q/P: 物理的な QWERTY キーボードを使用する

F/M: モバイル端末上にフリックキーボードを表示する

さらにそれぞれの図中では QWERTY キーボードを用いた条件は青系統の色を、フリックキーボードを用いた条件は赤系統の色をつけており、提案手法を示すグラフはアウトラインで強調している。

まず入力のしやすさや実感について全 8 条件を順位付け評価してもらった結果を、1 位を 8 点、最下位を 1 点とす

るボルダ法でスコア化した。その集計結果を図 4a および図 4b に示す。提案手法は入力しやすいさでは既存のバーチャル UI に劣った一方で、入力した実感 (図 4b) では優れた評価が示された。

これらの結果を補足するものとして実験協力者からの自由回答を紹介する。前腕部に QWERTY キーボードを表示する条件では「手を保持するのが少し疲れた」といった身体的負担に関する意見が、手指にフリックキーボードを表示する条件では「トラッキングがあまり上手いかなかった」といった技術的な課題に関する意見が寄せられた。

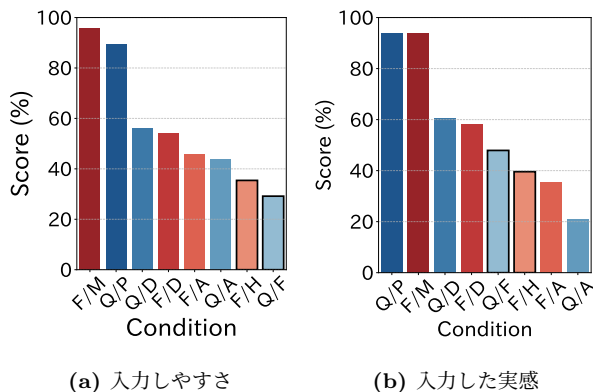


図 4: 条件ごとの入力しやすいさ・入力した実感のランク (Q/F:QWERTY/Forearm, Q/A:QWERTY/In the air, Q/D:QWERTY/On a desk, F/H:Flick/On a hand, F/A:Flick/In the air, F/D:Flick/On a desk, Q/P:QWERTY/Physical, F/M:Flick/Mobile) 青系統の色は QWERTY キーボードを用いた条件を示し、赤系統の色フリックキーボードを用いた条件を示す。また提案手法を示すグラフにはアウトラインを施している。

続いて操作主体感や操作感についてのリッカート尺度による評価を抜粋して示す。以下のそれぞれの評価項目における全条件間の比較にはフリードマン検定を実施し、有意差が見られた項目については事後検定としてネメニー検定による多重比較検定を実施した。なお有意水準は 5% とし、図中の * は $p < 0.05$ を、** は $p < 0.005$ をそれぞれ示す。

操作主体感の評価である図 5c より、前腕部に QWERTY キーボードを表示する条件が他の条件より低く評価される傾向が見られた。またその他のバーチャルキーボードの条件間では同程度の評価となった。

次に GEQ に基づく評価について抜粋して示す。有用性の評価について、バーチャルキーボード間で有意差は見られなかったものの、QWERTY 配列のキーボードが五十音配列のフリックキーボードよりも相対的に低い評価となる傾向が見られた。また良い影響と悪い影響を示す評価について、いずれも有意な差を示す項目は無かったが、悪い影響の評価は全体として低いことが示された。

さらに課題感の評価について、身体表面にバーチャルキーボードを表示する条件は机上や空中に表示する条件と比較

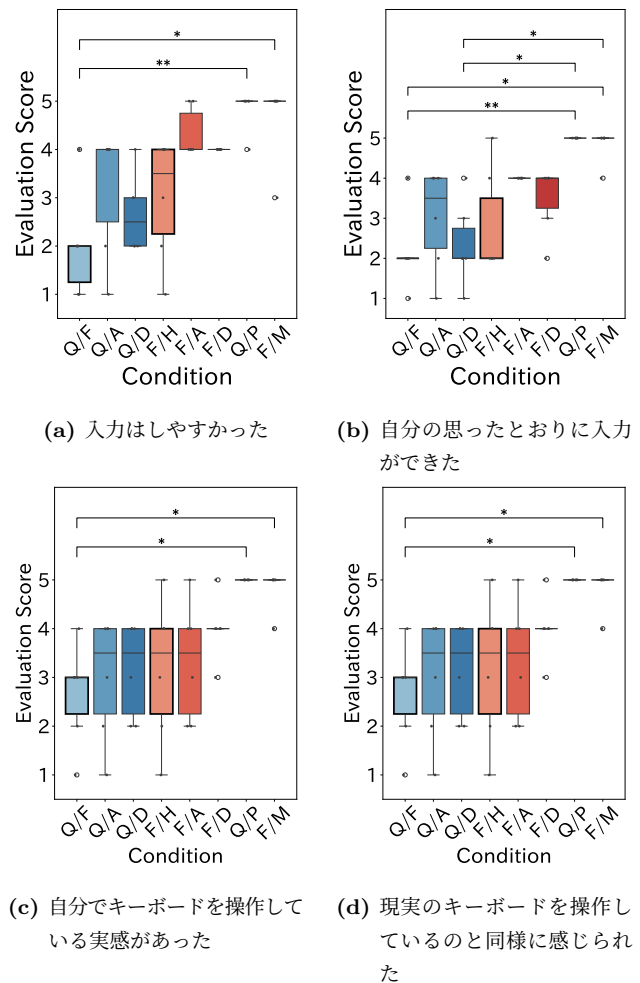


図 5: 操作主体感や操作感の評価

して高い課題感を示す傾向が見られた。

最後にそれぞれの条件での入力速度および入力精度の計測評価を示す。入力速度については 1 分間あたりの入力数 CPM (Characters Per Minute) を評価の指標とした。入力精度については誤入力率 TER (Total Error Rate) を評価の指標とし、式 (1) により求めた。ただし、 N_{Total} は総入力回数、 N_{Error} は誤入力回数を示す。

$$TER = \frac{N_{Error}}{N_{Total}} \quad (1)$$

5. 考察

本実験を通して得られた結論から考察を行う。まず前腕部にバーチャル QWERTY キーボードを表示する場合について、図 4a や図 5a より、入力のしやすいさが最も低いことが示された。実験協力者からの意見も踏まえると、前腕部を持ち上げて保持したまま入力を行う姿勢が疲労感を招いていたことが要因のひとつであると考えられる。

また図 6a より、GEQ の有用性の評価では QWERTY キーボードが全体的に他の条件より低い傾向が見られた。これは今回の実験で行ったタイピングテストが日本語のものであり、英字配列のキーボードでの入力では有用性の評価が

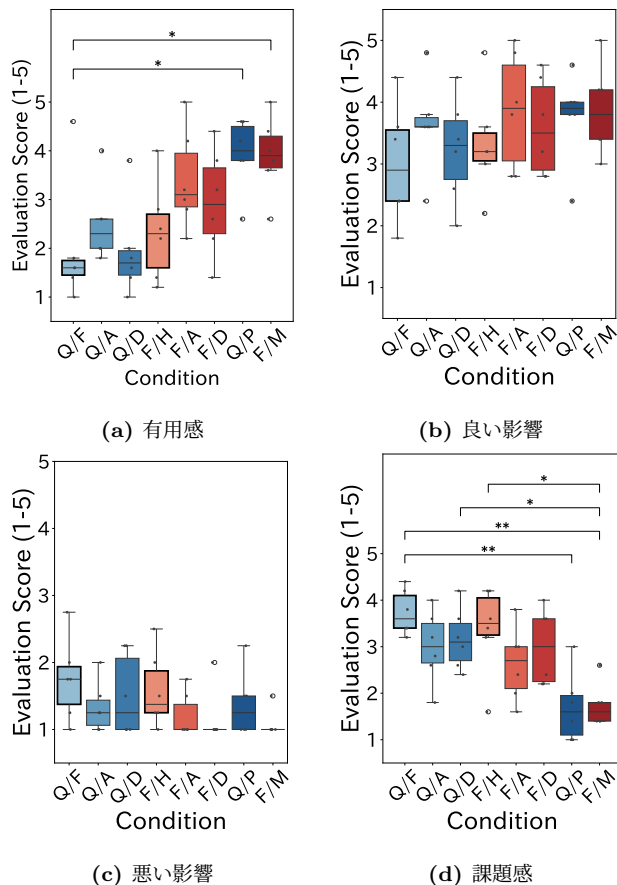


図 6: GEQ の評価

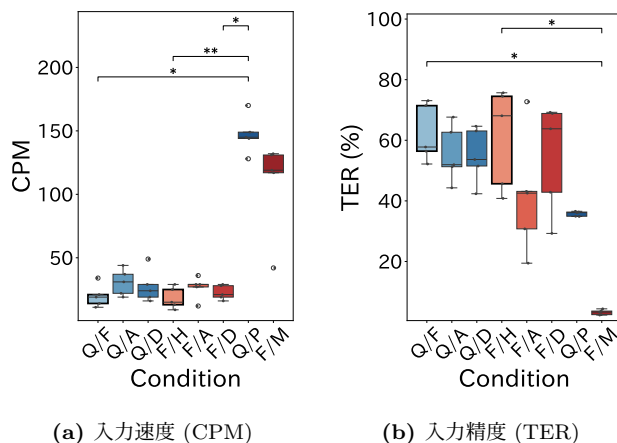


図 7: 入力パフォーマンスについての結果

低くなったことが考えられる。

入力精度 (図 7b) については空中に投影されるフリックキーボードが他のフリックキーボードでの条件より誤入力率が低い傾向が見られた。空中の定位置に固定されることで正確に入力しやすいことがその要因のひとつであると考えられるが、空中に投影された QWERTY キーボードではそのような差異は見られなかったことから、慎重に捉える必要があると考える。

なお、入力精度や操作主体感、操作感の評価の多くで、物理的なキーボードやモバイル端末でのフリック入力とバーチャ

ル QWERTY キーボードの間では有意に後者が低いことが示された。バーチャルフリックキーボードとの間には有意差が示されていないことから、これらの観点では QWERTY キーボードよりもフリックキーボードのほうがバーチャルキーボードとして有利なインタフェースである可能性があると考えられる。

加えて、本実験中に実験協力者が操作を行う様子を観察したところ、ハンドトラッキングが適切に行えていない状況がしばしば発生していた。これはハンドトラッキングセンサーとユーザーの手の距離が極端に近くなった場合や、一方の手が他方の手を完全に覆い隠した場合に多く発生していた。このようなトラッキングの不一致がユーザーの操作感を損ねることや操作精度が低下することにつながった可能性があると考えられる。

6. 結論

本稿では AR 環境でのバーチャルキーボードの操作感を高めることを目的として、前腕部や手指といった自身の身体表面を用いて反力提示を行うバーチャルキーボードを提案し、その効果を検証した。タイピングテストと実験協力者の主観評価を通して、本提案手法は既存の手法と比較して入力を行った実感を増すことができるが、操作主体感と同程度かそれ以下の評価となることが示された。

その一方で入力のしやすさについての主観評価や実験協力者のコメントから、腕を持ち上げて保持し続けることによる疲労感が課題として挙げられたほか、ハンドトラッキングの精度に起因する操作感や操作精度の低下が懸念された。

7. 展望

本実験を通して入力を行う姿勢による疲労感やハンドトラッキングの実装上の問題による操作精度の低下が課題として挙げられた。今後はこれらの点を改善する必要がある、より良い姿勢や身体部位を検討することや多面的なセンシングによるトラッキングを行うことを考えている。また入力した実感や操作主体感をより向上させ、本提案手法が既存の手法よりも明確に有効であると示すことも目指したい。

参考文献

- [1] 小林修也, 島村一輝, 伴祐樹, 割澤伸一. MR 環境下での pseudo-haptics 利用による空間的不整合の視認が重さ知覚に与える影響の解明. 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, No. 1A1-05, 2024.
- [2] W.A. IJsselstein, Y.A.W. de Kort, and K. Poels. *The Game Experience Questionnaire*. Technische Universiteit Eindhoven, 2013.
- [3] Maria Kounalaki, Ioulia Simou, and Andreas Komninos. Pseudo-haptic and Self-haptic Feedback During VR Text Entry. In *Proceedings of the 2nd International Conference of the ACM Greek SIGCHI Chapter, CHIGREECE '23*, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.