

VR 空間内操作コマンドにおけるフットジェスチャの UI 特性分析 (2) --立位・座位体験での比較--

樋口 雄大*1 浦野 雅也*2 柴田 史久*1 木村 朝子*1

Characteristic Analysis of Foot Gesture UI as a VR Space Operation Command (2) --Comparison in Standing and Sitting Positions--

Yudai Higuchi*1, Urano Tatsuya*2, Fumihisa Shibata*1 and Asako Kimura*1

Abstract - With the development of VR technology, there are research on using body gestures as input. Especially, interfaces that use foot movements, called foot gestures, as input, has the advantage of hands being free. However, it seems suitable gesture for each task has not been revealed. In this research, 11 types of foot gestures are selected from previous research. The tasks classified into 4 types are set for our experiments. The experiments are performed in standing and sitting positions. Based on the results, the UI characteristics of foot gestures in VR are clarified. This research focuses on providing insight to select appropriate foot gestures.

Keywords: HMD, VR, Foot Gesture, User Interface, and Full Tracking

1. はじめに

人工現実感 (Virtual Reality; VR) では、バーチャルな空間に入り込んだかのような体験が可能となる。この体験では自由度の高い操作が可能となるが、一方でその操作に対応した多様な UI 設計が必要とされる。この VR 空間での UI 操作は、身体動作を入力とした手法が多く使用されている。その理由として、身体動作が容易に取得できる各種センサの登場により、キーボードやマウスに比べて仮想空間内で直感的に入力できることが挙げられる。

このような身体動作を活用した入力方法は、既に実用域に達しているハンドジェスチャ[1][2]が主流である。一方で足の動き (以降、フットジェスチャ) を用いて入力を行う研究も登場している。例えば、Muller ら[3]の研究ではフットタップのみ (足を踏み出す動作) を入力として、複合現実 (Mixed Reality; MR) 空間においてメニューを選択するシステムを構築した。また、Willich ら[4]の研究では、VR 空間におけるテレポート時の入力として 3 種類の方向入力と 3 種類の距離入力を組み合わせた全 9 種類ジェスチャを使用している。このようにフットジェスチャはハンドジェスチャ同様に自由度の高い、多様な入力に対応することができる。

しかし、これまでの研究では入力方法として用いるフットジェスチャの種類が少ないことや、特定のタスクに限られた分析となっていた。すなわち、フットジェスチャの実用に向けて、複数のフットジェスチャについて同

様のタスクを用いた UI 特性の分析が必要となる。

そこで、我々はまず立位状態での 11 種類のフットジェスチャについて、4 つのタスクごとに UI 特性を分析した[5]。さらに、VR 空間の入力に限らず、フットジェスチャは立位だけでなく、座位における手法も多く研究されている[6][7]。立位と座位において、ハンドジェスチャでは大きく動作が変わることはないが、フットジェスチャでは身体の制限など条件が大きく変わる。つまり、立位・座位の各状態での UI 特性も変化する可能性がある。

よって、本稿では立位・座位の各条件において、タスクごとにフットジェスチャの UI 特性を分析し、その結果を比較していく。

2. フットジェスチャの設計

2.1 フットジェスチャの整理

入力方法としてのフットジェスチャを分析するにあたって、まずフットジェスチャにはどのようなものが考えられるのか把握する。複数の既存研究[3][8][9]の調査を行い、11 種類のフットジェスチャを抽出した。その結果を以下に示す (表 1)。これら 11 種類のフットジェスチャを選んだ理由として、複数の既存研究で多く用いられていた点や、立位の状態で片足のみを用いて動作できる点などが挙げられる。本稿では、これら全 11 種類のフットジェスチャを立位・座位の状態でも右足のみを用いて行う。

2.2 VR 空間における入力操作の整理

整理した 11 種類のフットジェスチャ毎での UI 特性を評価する前に、VR 空間における入力について整理する。本稿では夏目ら[10]の VR 空間における入力操作の種類をもとに、フットジェスチャで可能な入力を 3 種類に分類した。

*1: 立命館大学大学院 情報理工学研究科

*2: 現在, ウルシステムズ

*1: Graduate School of Information Science and Engineering
Ritsumeikan University

*2: Presently with.ULSystems Corporation

1 つ目は、ボタンを押す動作やマウスクリックのような「単発的な入力」である。この操作は入力を決定する場面でよく実行される。

2 つ目は、ボタンを押し続ける動作やマウスのクリック&ホールド操作のような「継続的な入力」である。これは、動作を行っている間に入力が継続される操作である。

3 つ目は、スライダーバーでの音量調節やマウスのホイール操作のような「変化量を用いた入力」である。この入力は入力始めと入力終わりの位置の差をもとに入力が行われる操作である。

実験タスクには VR アプリを調査した結果をもとに、頻繁に使用されている色変更、スライダーバーの操作、スケールアップ・スケールダウンを用意した。各タスクに対して 3 種類の入力を下記のように組み合わせて実験を行う。

実験 1: 「単発的な入力」を用いた色変更

実験 2: 「継続的な入力」を用いた拡大

実験 3: 「変化量を用いた入力」を用いたパラメータ操作

実験 4: 「変化量を用いた入力」を用いた拡大・縮小

各実験では使用できるフットジェスチャを割り当て、分析を行う。

3. 実験

3.1 実験目的

本研究では、VR 空間操作コマンドとしての各フットジェスチャの特性を分析する。設計した 11 種類のフットジェスチャを 4 つの実験タスクに割り当て、立位と座位の条件で評価実験を行う。これらの実験結果から立位・座位ともに VR 空間操作コマンドとしての各フットジェスチャがどのようなタスクに適しているのか、そして各々にどのような UI としての特性があるのかを考察する。

3.2 システム構成

フットジェスチャと入力操作を認識する実験環境を構築した。システム構成を図 1 に示す。VR 空間の提示には HMD である HTC Vive Pro Eye を使用し、Vive Tracker によって全身を検出している。Vive Tracker は、身体の 7 箇所（両手、腹部、両膝、両足）に取り付けて、全身の位置と姿勢を VR 空間に反映させている。Vive Pro Eye と Vive Tracker の位置・姿勢をトラッキングするためのベースステーションは部屋の対角線上に 2 基配置している。また、各機器の制御や仮想物体の描画には Unity を用いた。

3.3 実験 1: 色変更

【目的】実験 1 では、単発的な入力に対してどのフットジェスチャが適しているのか評価するため、単発的な入力に該当するタスクとして、色変更のタスクを行わせた。そして、実験後に得られた主観評価により、実験 1 のタスクに適用した各フットジェスチャを評価・分析する。

【タスク】VR 空間において、実験協力者の正面に立方体を配置し、フットジェスチャを行うことで立方体の色を

表 1 フットジェスチャー一覧

Table 1 Foot Gestures List.

フットジェスチャ	入力動作
つま先上昇:T_Up	つま先を上昇
つま先外回転:T_OR	つま先を外側に回転
つま先内回転:T_IR	つま先を内側に回転
かかと上昇:T_Up	かかとを上昇
かかと外回転:H_OR	かかとを外側に回転
かかと内回転:H_IR	かかとを内側に回転
踏み込み:Step	一步前に足を踏み出す
左方向スライド:LS	足を前方で左方向にスライド
右方向スライド:RS	足を前方で右方向にスライド
前方スライド:FS	足を前方にスライド
後方スライド:BS	足を後方にスライド

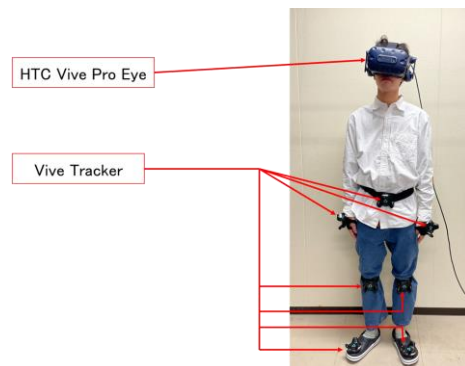


図 1 システム構成

Fig.1 System Configuration.

目的の色と同じになるまで変更させる（図 2）。誤って目的の色以外で決定した場合や目的の色で決定せず、次の色に進んだ場合は、エラーとしてカウントされ、もう一度同じタスクを行わせる。

【条件・手順】実験 1 で評価するのは、11 種類のフットジェスチャ（表 1）である。5 項目の主観評価（表 2）から各フットジェスチャを評価・分析する。主観評価では非常に悪いを「1」、非常に良いを「7」とした 7 件法で評価する。実験協力者は 20~24 歳の男性 24 名（立位での実験: 12 名、座位での実験: 12 名）で、実験手順は以下の通りである。

- (1) モーションキャプチャのためのキャリブレーションを実行
- (2) フットジェスチャをランダムに決定し、練習を行わせる
- (3) 実験タスクを行わせる
- (4) 手順(3)を同じフットジェスチャで 3 回行わせる
- (5) フットジェスチャに対して、5 項目の主観評価を回答させる
- (6) 疲労がなくなるまで休憩を設ける
- (7) 残りのフットジェスチャについても手順(2)~(6)を繰り返す

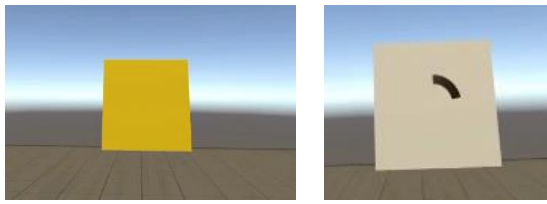


図2 実験1の様子
Fig.2 Experiment 1.

表2 5項目の主観評価

Table 2 Subjective Evaluation of 5 Items.

評価項目	主観評価の内容
容易性	このジェスチャをどれくらい簡単に扱えたか
学習容易性	このジェスチャを覚えるのはどれくらい簡単だったか
適合性	タスクに対してこのジェスチャはどれくらい適していたか
疲れにくさ	始める前と比較してどれくらい足が疲れなかったか
好み	このジェスチャをどれくらい好んだか

【結果】主観評価をまとめた結果として、立位を表3、座位を表4に示す。また、立位と座位を比較した結果を図3に示す。表3は縦にフットジェスチャの種類、横に主観評価の項目を取り、それぞれ実験協力者24名の7件法の平均値を示している。また、平均値の下には、第一四分位数と第三四分位数が記してある。橙色が濃いほど評価が低く、緑色が濃いほど評価が高い。

表3より、まず立位においては「つま先上昇」は疲れにくさや好みにおいて低評価であった。「つま先外回転」「かかと上昇」「かかと内回転」は全体的に高評価であった。「踏み込み」や左右方向のスライドは適合性や疲れにくさ、好みにおいて低評価であった。

次に、表4より座位においては「つま先上昇」が最も高評価の項目が多かった。それ以外にも「かかと上昇」や「前方スライド」も高評価な項目が多く存在した。一方、「踏み込み」は低評価である項目が多かった。

実験1の結果を、立位と座位の結果と比較すると(図3)、「つま先外回転」「つま先内回転」「かかと上昇」「かかと外回転」「かかと内回転」は多くの項目で立位での評価の方が高かった。一方、「つま先上昇」「右方向スライド」は多くの項目で座位での評価の方が高かった。

【考察】実験1の結果から単発的な入力によるUI操作には、立位では「つま先外回転」が高評価の項目が多く、特に適していることがわかる。他に「つま先内回転」「かかと上昇」なども評価が高く、活用できる可能性がある。また、座位では「つま先上昇」が高評価の項目が多く、特に適していると考えられる。他に「かかと上昇」や「前方スライド」も評価が高く、活用できる可能性がある。これらの評価が高いのは、操作を行う際の動作が小さいことや、普段から慣れ親しんだ動作であることが理由として考えられる。また、姿勢間の違いは足首にかかる体重の負担や、回転の軸の違いに起因すると考えられる。

表3 実験1(立位)結果

Table 3 Experiment 1 (Standing) Result.

	容易性	学習容易性	適合性	疲れにくさ	好み
つま先上昇 (T.Up)	4.67 [3.0, 6.0]	5.92 [5.25, 7.0]	4.42 [2.25, 6.0]	4.00 [2.25, 5.0]	3.50 [2.0, 5.0]
つま先外回転 (T.OR)	6.58 [6.0, 7.0]	6.58 [6.0, 7.0]	6.42 [6.0, 7.0]	6.08 [5.25, 7.0]	6.4 [6.0, 7.0]
つま先内回転 (T.IR)	5.58 [5.25, 6.75]	6.42 [6.0, 7.0]	5.17 [3.25, 6.75]	5.08 [3.25, 6.0]	5.00 [4.0, 6.0]
かかと上昇 (H.Up)	6.50 [6.0, 7.0]	6.33 [6.0, 7.0]	6.25 [6.0, 7.0]	5.67 [5.0, 6.25]	6.17 [5.25, 7.0]
かかと外回転 (H.OR)	6.00 [5.25, 7.0]	5.92 [5.0, 7.0]	5.42 [4.25, 6.0]	5.08 [3.5, 6.0]	5.42 [3.5, 7.0]
かかと内回転 (H.IR)	6.42 [6.0, 7.0]	6.50 [6.0, 7.0]	6.00 [5.25, 6.75]	5.92 [5.25, 6.75]	6.00 [6.0, 6.75]
踏み込み (Step)	4.12 [2.25, 5.75]	5.25 [4.0, 6.75]	3.08 [0.0, 5.0]	2.92 [0.0, 4.75]	3.25 [1.25, 5.0]
左方向スライド (LS)	4.91 [4.25, 6.0]	5.67 [5.25, 6.75]	3.75 [3.0, 4.0]	3.67 [3.0, 5.0]	3.58 [2.0, 4.75]
右方向スライド (RS)	4.25 [3.0, 5.75]	5.00 [4.0, 6.0]	3.50 [2.25, 4.75]	2.83 [2.0, 4.0]	3.00 [2.0, 4.0]
前方スライド (FS)	6.12 [6.0, 7.0]	6.50 [6.0, 7.0]	5.25 [5.0, 6.0]	4.92 [3.5, 6.0]	5.08 [5.0, 6.0]
後方スライド (BS)	6.00 [6.0, 7.0]	6.33 [6.0, 7.0]	4.75 [3.5, 5.75]	5.08 [5.0, 6.0]	5.17 [5.0, 6.0]

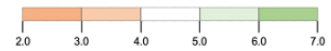


表4 実験1(座位)結果

Table 4 Experiment 1 (Sitting) Result.

	容易性	学習容易性	適合性	疲れにくさ	好み
つま先上昇 (T.Up)	6.17 [5.25, 7.0]	6.17 [5.25, 7.0]	6.33 [6.0, 7.0]	4.83 [3.25, 6.75]	5.92 [4.5, 7.0]
つま先外回転 (T.OR)	5.25 [4.25, 6.0]	5.58 [5.0, 6.0]	4.83 [4.0, 5.75]	4.25 [3.0, 5.0]	4.33 [3.25, 5.75]
つま先内回転 (T.IR)	4.83 [3.25, 6.0]	5.58 [5.0, 6.0]	4.92 [4.25, 6.0]	4.33 [3.25, 5.75]	4.42 [4.0, 5.75]
かかと上昇 (H.Up)	5.83 [5.25, 6.0]	6.00 [5.25, 6.75]	5.83 [5.0, 6.75]	4.83 [4.25, 5.0]	5.67 [5.0, 6.75]
かかと外回転 (H.OR)	3.25 [2.25, 4.75]	5.25 [5.0, 6.0]	3.58 [2.25, 4.75]	3.33 [3.0, 4.0]	3.08 [1.25, 4.0]
かかと内回転 (H.IR)	5.17 [4.25, 6.0]	5.67 [5.0, 6.0]	4.92 [4.25, 6.0]	4.67 [4.0, 6.0]	4.75 [4.0, 6.0]
踏み込み (Step)	3.83 [3.0, 5.0]	4.50 [4.0, 5.0]	3.00 [2.0, 3.75]	2.75 [2.0, 4.0]	2.67 [2.0, 3.0]
左方向スライド (LS)	4.67 [4.0, 5.0]	5.08 [5.0, 6.0]	3.75 [3.0, 4.0]	3.75 [3.0, 4.0]	3.83 [3.0, 4.0]
右方向スライド (RS)	4.92 [4.0, 6.0]	5.08 [5.0, 6.0]	4.00 [3.0, 5.5]	4.08 [3.0, 5.0]	3.92 [2.25, 5.0]
前方スライド (FS)	6.08 [6.0, 6.75]	6.17 [6.0, 6.75]	5.42 [4.25, 6.0]	4.92 [4.0, 5.75]	5.33 [4.25, 6.0]
後方スライド (BS)	5.92 [5.25, 6.75]	6.17 [6.0, 7.0]	5.08 [4.0, 6.0]	4.67 [4.0, 5.75]	4.92 [4.0, 6.0]



	容易性	学習容易性	適合性	疲れにくさ	好み
つま先上昇 (T.Up)	-0.50	-0.25	-0.92	-0.83	-0.42
つま先外回転 (T.OR)	1.33	1.40	1.58	1.63	2.08
つま先内回転 (T.IR)	0.75	0.83	0.25	0.75	0.58
かかと上昇 (H.Up)	0.67	0.33	0.42	0.83	0.50
かかと外回転 (H.OR)	2.75	0.67	1.33	1.75	2.33
かかと内回転 (H.IR)	1.25	0.83	1.08	1.25	1.25
踏み込み (SU)	2.34	0.75	0.68	0.17	0.58
左方向スライド (LS)	0.24	0.58	0.40	-0.08	-0.25
右方向スライド (RS)	-0.57	-0.08	-0.50	-0.25	-0.82
前方スライド (FS)	0.44	0.33	-0.17	0.40	-0.25
後方スライド (BS)	0.68	0.17	-0.33	0.42	0.25



図3 実験1の結果の比較

Fig.3 Comparison of Experimental 1 Result.

3.4 実験 2: 拡大

【目的】実験 2 では継続的な入力に対してどのフットジェスチャが適しているのか評価するため、継続的な入力に該当する拡大タスクを行わせ、実験結果から実験 2 のタスクに適用した各フットジェスチャを評価・分析する。

【タスク】VR 空間において、実験協力者の正面に立方体を配置し、フットジェスチャを行い続けることで立方体を徐々に拡大させ、フットジェスチャをやめることで拡大を停止させる(図 4)。元の立方体の大きさを 1.0 とし、目的となる立方体の大きさは 3.0, 4.0, 5.0 の 3 種類のうちいずれかとした。また、目的の大きさの±0.2 以内で拡大を停止できた場合を成功、それ以外の場合をエラーとしてカウントし、もう一度同じタスクを行わせる。

【条件・手順】実験 2 で評価対象となるのは、実験 1 同様 11 種類のフットジェスチャである。入力姿勢、評価項目、実験協力者、実験手順も実験 1 と同様である。

【結果】主観評価をまとめた結果として、立位を表 5、座位を表 6 に示す。また、立位と座位を比較した結果を図 5 に示す。表記は実験 1 と同様である。

表 5 より、立位に関しては「つま先上昇」は疲れにくさや好みにおいて低評価であった。「つま先外回転」「かかと上昇」「かかと内回転」は全体的に高評価であった。「踏み込み」は適合性や疲れにくさ、好みにおいて低評価であった。「前方スライド」と「後方スライド」は全体的に高評価であり、特に「前方スライド」は、4 つの項目で高評価であった。

表 6 より、座位については、「後方スライド」が高評価である項目が最も多かった。また、「前方スライド」についても容易性や学習容易性において高評価であった。

次に実験 2 の結果を立位と座位で比較すると(図 5)「つま先外回転」「つま先内回転」「かかと上昇」「かかと外回転」「かかと内回転」は多くの項目で立位での評価の方が高かった。逆に「つま先上昇」「踏み込み」は多くの項目で座位での評価の方が高かった。

【考察】実験 2 の結果より、継続的な入力による UI 操作において、立位では「前方スライド」が高評価の項目が多く、特に適していることがわかる。他には「つま先内回転」や「かかと上昇」も評価が高く、活用できる可能性がある。座位においては「後方スライド」が高評価の項目が多く、特に適していることがわかる。他には「前方スライド」も評価が高く、活用できる可能性がある。これらの入力は操作を行う際の動作が少なく、体勢を維持することが容易である。このため、継続的な動きが必要とする入力が高評価を得られた可能性がある。また、姿勢間の違いとして「つま先上昇」は立位での入力において可動域が狭いため、つま先を上げる動作が行いづらい。また、「踏み込み」は立位での入力において、重心のバランスをとることが難しかったという意見もあった。これらの入力はこのタスクでは不向きな可能性がある。

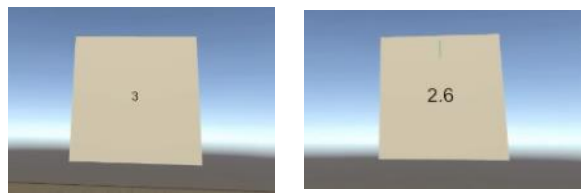


図 4 実験 2 の様子
Fig.4 Experiment 2.

表 5 実験 2 (立位) 結果

Table 5 Experiment 2 (Standing) Result.

	容易性	学習容易性	適合性	疲れにくさ	好み
つま先上昇 (T.Up)	4.00 [3.0, 6.0]	5.33 [5.0, 6.0]	4.00 [2.0, 5.75]	2.58 [2.0, 3.0]	3.00 [2.0, 4.0]
つま先外回転 (T.OR)	6.42 [6.0, 7.0]	6.25 [6.0, 7.0]	5.83 [5.0, 6.75]	5.75 [5.0, 6.75]	6.00 [5.25, 7.0]
つま先内回転 (T.IR)	6.08 [6.0, 6.75]	6.17 [6.0, 6.75]	5.75 [5.0, 6.75]	5.67 [5.0, 7.0]	5.92 [5.25, 6.0]
かかと上昇 (H.Up)	5.83 [5.0, 7.0]	6.25 [5.0, 7.0]	5.25 [5.0, 6.0]	5.17 [5.0, 6.0]	5.42 [5.0, 6.75]
かかと外回転 (H.OR)	5.00 [5.5, 5.75]	5.83 [5.0, 6.75]	4.75 [5.0, 5.0]	4.58 [4.0, 5.0]	4.42 [3.0, 5.0]
かかと内回転 (H.IR)	6.08 [5.0, 7.0]	6.08 [5.0, 7.0]	5.42 [4.25, 6.75]	5.33 [4.25, 7.0]	5.33 [4.25, 7.0]
踏み込み (Step)	4.08 [3.0, 5.0]	4.42 [3.0, 4.0]	3.25 [2.25, 4.0]	3.67 [2.0, 4.75]	3.08 [2.0, 4.0]
左方向スライド (LS)	4.75 [3.25, 5.75]	5.25 [5.0, 6.0]	4.08 [3.0, 6.0]	4.25 [3.0, 5.0]	4.08 [3.0, 5.75]
右方向スライド (RS)	4.83 [3.25, 6.0]	5.42 [5.0, 6.0]	4.33 [3.25, 5.75]	4.25 [3.0, 5.75]	3.83 [2.25, 5.0]
前方スライド (FS)	6.42 [6.0, 7.0]	6.50 [6.0, 7.0]	6.00 [5.0, 7.0]	5.83 [5.0, 6.75]	6.00 [5.0, 7.0]
後方スライド (BS)	6.00 [5.25, 6.75]	6.42 [6.0, 7.0]	5.50 [4.25, 6.75]	5.67 [5.0, 7.0]	5.50 [4.0, 7.0]

表 6 実験 2 (座位) 結果

Table 6 Experiment 2 (Sitting) Result.

	容易性	学習容易性	適合性	疲れにくさ	好み
つま先上昇 (T.Up)	5.42 [5.0, 6.75]	5.92 [5.25, 6.75]	4.92 [3.25, 6.0]	3.75 [3.0, 5.0]	4.50 [4.0, 5.75]
つま先外回転 (T.OR)	5.67 [5.0, 6.0]	6.08 [6.0, 7.0]	5.75 [5.25, 6.0]	4.75 [4.0, 5.75]	5.08 [4.25, 6.0]
つま先内回転 (T.IR)	5.08 [4.0, 6.0]	5.67 [5.0, 6.0]	5.08 [4.0, 6.0]	4.50 [4.0, 5.0]	4.50 [4.0, 5.0]
かかと上昇 (H.Up)	4.83 [4.0, 5.75]	5.75 [5.0, 6.0]	4.17 [3.0, 5.0]	3.00 [2.25, 3.75]	3.83 [3.0, 4.75]
かかと外回転 (H.OR)	4.92 [4.25, 6.0]	5.67 [5.25, 6.0]	5.00 [5.0, 6.0]	4.42 [3.25, 5.75]	4.75 [4.0, 6.0]
かかと内回転 (H.IR)	4.92 [3.25, 6.0]	5.25 [4.25, 6.0]	4.67 [4.0, 5.0]	3.75 [3.0, 5.0]	4.17 [3.0, 5.75]
踏み込み (Step)	4.00 [2.0, 5.0]	5.00 [4.0, 6.0]	3.58 [2.25, 4.75]	4.08 [3.25, 5.0]	3.67 [2.25, 5.0]
左方向スライド (LS)	5.00 [4.25, 6.0]	5.17 [4.25, 6.0]	4.00 [2.25, 5.0]	4.83 [4.0, 5.75]	3.67 [3.0, 4.75]
右方向スライド (RS)	5.08 [5.0, 6.0]	5.08 [4.25, 6.0]	4.08 [3.0, 5.75]	4.67 [4.0, 5.0]	4.00 [3.0, 5.0]
前方スライド (FS)	6.25 [6.0, 7.0]	6.42 [6.0, 7.0]	5.33 [4.25, 6.75]	5.92 [5.0, 7.0]	5.75 [5.0, 7.0]
後方スライド (BS)	6.50 [6.0, 7.0]	6.33 [6.0, 7.0]	5.83 [5.0, 7.0]	6.08 [5.25, 7.0]	6.08 [5.0, 7.0]

	容易性	学習容易性	適合性	疲れにくさ	好み
つま先上昇 (T.Up)	-0.42	-0.58	-0.82	-1.17	-1.50
つま先外回転 (T.OR)	0.25	0.7	0.88	1.40	0.92
つま先内回転 (T.IR)	1.00	0.50	0.67	1.7	1.42
かかと上昇 (H.Up)	1.00	0.50	1.08	2.7	1.58
かかと外回転 (H.OR)	0.88	0.7	-0.25	0.7	-0.33
かかと内回転 (H.IR)	1.17	0.43	0.75	1.88	1.17
踏み込み (St)	0.88	-0.58	-0.83	-0.42	-0.58
左方向スライド (LS)	-0.25	0.48	0.88	-0.58	0.42
右方向スライド (RS)	-0.25	0.33	0.25	-0.42	-0.17
前方スライド (FS)	0.17	0.48	0.67	-0.08	0.25
後方スライド (BS)	-0.50	0.48	-0.83	-0.42	-0.58

図 5 実験 2 の結果の比較

Fig.5 Comparison of Experimental 2 Result.

3.5 実験3:パラメータ操作

【目的】実験3では、足の位置の変化量を用いた入力に対してどのフットジェスチャが適しているのか評価する。それに該当するパラメータ操作タスクを行わせ、実験結果から実験3のタスクにおける各フットジェスチャを評価・分析する。また、実験3では足を動かす方向と、操作対象の移動方向が一致する操作として、パラメータ操作タスクを採用している。

【タスク】VR空間において、実験協力者の正面にスクロールバーもしくはラジアルメニューを配置し、足の位置変化量を用いて1~10までのランダムに指定される値に従い入力を行う(図6)。実験前に各フットジェスチャにおける可動域の最小値(初期位置)と最大値を測定し、最小値を0、最大値を10と設定した上で、可動域を10分割した位置を1目盛としている。

【条件・手順】実験3で評価するのは、11種類のフットジェスチャから、「つま先上昇」「かかと上昇」「踏み込み」を除いた8種類である。この3種類を排除した理由は、可動域が狭く足の位置変化量を用いた入力が難しいためである。評価項目、実験協力者、実験手順は実験1と同様である。

【結果】主観評価をまとめた結果として、立位を表7、座位を表8に示す。また、立位と座位を比較した結果を図7に示す。表記は実験1と同様である。

表7より、いずれのフットジェスチャも全体的に高評価であった。立位では、特に「前方スライド」が高評価であった。また、足の回転を用いたフットジェスチャ間で比較すると、「つま先内回転」よりも「つま先外回転」、「かかと外回転」よりも「かかと内回転」が全体的に高評価であった。また、「左右方向スライド」よりも「前後方向スライド」が高評価であり、「前方スライド」と「後方スライド」においては、「前方スライド」が高評価であった。

表8より、座位において高評価な項目が最も多かったのは「前方スライド」であった。他には「後方スライド」も高評価な項目が多く見られた。

次に実験3の結果を立位と座位で比較すると(図7)、「つま先外回転」「つま先内回転」「かかと外回転」「かかと内回転」といった、足を回転させるフットジェスチャにおいて、多くの項目で立位での評価の方が高かった。一方、「左方向スライド」「右方向スライド」「前方スライド」「後方スライド」といった、足をスライドさせるフットジェスチャにおいて、多くの項目で座位での評価の方が高かった。

【考察】実験3の結果より、スライダバー操作やホイール操作などのUI操作には、立位と座位ともに「前方スライド」が特に適していることを示唆した。次点で「つま先外回転」「かかと内回転」も評価が高く、入力として適している可能性がある。これらの入力は足の可動域が大きく、値を入力しやすい。ただし、スライダバー操



値の提示シーン 実験シーン

図6 実験3の様子

Fig.6 Experiment 3.

表7 実験3(立位)結果

Table 7 Experiment 3 (Standing) Result.

	容易性	学習容易性	適合性	疲れにくさ	好み
つま先外回転(T.OR)	5.67 [5.0, 6.0]	6.42 [6.0, 7.0]	5.75 [5.0, 6.75]	5.25 [4.25, 6.0]	5.00 [4.25, 6.0]
つま先内回転(T.IR)	5.17 [4.25, 6.0]	6.17 [6.0, 7.0]	5.17 [4.25, 6.0]	5.08 [4.25, 6.0]	4.83 [3.25, 6.0]
かかと外回転(H.OR)	5.17 [5.0, 6.0]	6.17 [6.0, 7.0]	4.67 [3.5, 6.0]	4.67 [3.25, 6.0]	4.33 [3.0, 6.0]
かかと内回転(H.IR)	5.00 [3.5, 6.0]	6.00 [5.0, 7.0]	5.25 [4.25, 6.0]	5.50 [5.0, 6.0]	4.83 [3.5, 6.0]
左方向スライド(LS)	5.58 [5.0, 6.75]	5.67 [5.0, 6.0]	5.08 [4.25, 6.0]	4.67 [3.25, 6.0]	4.75 [4.0, 5.75]
右方向スライド(RS)	5.25 [5.0, 6.0]	5.50 [5.0, 6.0]	5.42 [5.0, 6.0]	4.50 [3.25, 5.75]	4.92 [4.0, 6.0]
前方スライド(FS)	6.50 [6.25, 7.0]	6.67 [6.25, 7.0]	6.00 [6.0, 7.0]	5.58 [6.0, 6.75]	5.75 [5.0, 7.0]
後方スライド(BS)	5.50 [5.0, 6.0]	6.25 [6.0, 7.0]	5.58 [5.0, 6.0]	5.33 [5.0, 6.0]	5.58 [5.0, 6.0]

表8 実験3(座位)結果

Table 8 Experiment 3 (Sitting) Result.

	容易性	学習容易性	適合性	疲れにくさ	好み
つま先外回転(T.OR)	5.33 [5.0, 6.0]	5.92 [5.25, 6.0]	5.42 [4.25, 6.0]	4.92 [4.0, 6.0]	4.83 [4.0, 6.0]
つま先内回転(T.IR)	5.42 [5.0, 6.0]	5.75 [5.0, 6.0]	5.42 [4.25, 6.0]	4.83 [4.0, 6.0]	5.17 [5.0, 6.0]
かかと外回転(H.OR)	5.50 [5.0, 6.0]	5.67 [5.0, 6.0]	5.33 [5.0, 6.0]	4.58 [4.0, 5.75]	4.75 [4.0, 5.0]
かかと内回転(H.IR)	5.08 [5.0, 6.0]	5.67 [5.0, 6.0]	5.08 [4.0, 6.0]	4.25 [3.0, 5.0]	4.42 [3.25, 5.0]
左方向スライド(LS)	5.83 [6.0, 6.0]	5.67 [5.0, 6.0]	5.67 [5.25, 6.75]	5.42 [5.0, 6.0]	5.17 [5.0, 6.0]
右方向スライド(RS)	5.83 [6.0, 6.0]	5.83 [6.0, 6.0]	5.42 [5.0, 6.0]	5.00 [4.25, 6.0]	5.17 [4.25, 6.0]
前方スライド(FS)	6.33 [6.0, 7.0]	6.42 [6.0, 7.0]	6.50 [6.0, 7.0]	5.92 [5.0, 7.0]	6.33 [6.0, 7.0]
後方スライド(BS)	6.33 [6.0, 7.0]	6.33 [6.0, 7.0]	5.83 [5.25, 6.0]	5.67 [5.0, 6.0]	6.08 [6.0, 6.75]

図7 実験3の結果の比較

Fig.7 Comparison of Experimental 3 Result.

作では、足を動かす方向と操作対象の移動方向が一致していることも重要であると考えられる。

また、立位の場合は股関節を軸に足を回転させることで入力が可能であった。これに対し、座位の場合は大腿部が椅子に接していることから可動域が狭くなり、足を

回転させるような入力が行いづらくなった。一方で、立位と比較して片足にかかる体重の負担が少なく、足をスライドさせるような入力が容易になった。よって、スライドのジェスチャに関しては椅子に座りながら入力動作が向いていることを示唆した。

3.6 実験 4: 拡大・縮小

【目的】実験 4 では、足の位置の変化量を用いた入力に対してどのフットジェスチャが適しているのか評価する。それに該当する拡大・縮小タスクを行わせ、実験結果から実験 4 のタスクにおける各フットジェスチャを評価・分析する。また、実験 4 では足を動かす方向と操作対象の移動方向が一致しない操作として、拡大・縮小タスクを採用している。

【タスク】VR 空間において、実験協力者の正面に立方体を配置し、足の位置変化量を用いて 1~10 までのランダムに指定される大きさに従い拡大・縮小を行う (図 8)。タスク前に各フットジェスチャにおける可動域の最小値 (初期位置) と最大値を測定し、最小値を 0, 最大値を 10 と設定した上で、可動域を 10 分割した位置を 1 目盛としている。

【条件・手順】実験 4 で評価するのは、11 種類のフットジェスチャから、「つま先上昇」「かかと上昇」「踏み込み」を除いた 8 種類である。3 種類のフットジェスチャを排除した理由は、可動域が狭く足の位置変化量を用いた入力ができないためである。また、評価項目、実験協力者、実験手順は実験 1 と同様である。

【結果】主観評価をまとめた結果として、立位を表 9、座位を表 10 に示す。また、立位と座位を比較した結果を図 9 に示す。表記は実験 1 と同様である。

表 9 より、立位では全体的に高評価であり、特に「前方スライド」が高評価であった。また、足の回転を用いたフットジェスチャ間で比較すると、「つま先内回転」よりも「つま先外回転」が全体的に高評価であり、「かかと外回転」よりも「かかと内回転」が全体的に高評価であった。また、「左右方向スライド」よりも「前後方向スライド」が高評価であり、「前方スライド」と「後方スライド」においては、「前方スライド」の方が全体的に高評価であった。

表 10 より、座位においては立位と同様に、高評価な項目が最も多かったのは「前方スライド」であった。次に高評価である項目が多かったのは「後方スライド」であった。

次に実験 4 の結果を立位と座位で比較すると (図 9)、「つま先外回転」「つま先内回転」「かかと外回転」「かかと内回転」といった、足を回転させるフットジェスチャにおいて、多くの項目で立位での評価の方が高かった。逆に、「左方向スライド」「右方向スライド」「前方スライド」「後方スライド」といった、足をスライドさせるフットジェスチャにおいて、多くの項目で座位での評価の方が高かった。

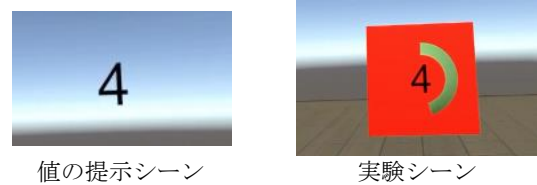


図 8 実験 4 の様子
Fig.8 Experiment 4.

表 9 実験 4 (立位) 結果

Table 9 Experiment 4 (Standing) Result.

	容易性	学習容易性	適合性	疲れにくさ	好み
つま先外回転 (T_OR)	6.08 [6.0, 7.0]	6.33 [6.0, 7.0]	5.67 [5.25, 7.0]	5.92 [5.0, 7.0]	5.83 [5.25, 7.0]
つま先内回転 (T_IR)	5.67 [5.0, 6.0]	6.25 [6.0, 7.0]	5.25 [5.0, 6.0]	5.25 [4.25, 6.0]	4.92 [4.0, 5.75]
かかと外回転 (H_OR)	5.83 [5.25, 6.0]	6.00 [6.0, 6.75]	5.25 [4.25, 6.0]	5.25 [4.25, 6.0]	5.08 [5.0, 6.0]
かかと内回転 (H_IR)	5.67 [5.0, 6.75]	5.92 [5.25, 6.75]	4.92 [4.25, 6.0]	5.00 [3.25, 6.0]	4.83 [3.25, 6.0]
左方向スライド (LS)	5.25 [4.25, 6.0]	5.67 [5.0, 6.75]	4.42 [3.0, 5.0]	4.00 [2.5, 5.75]	3.92 [2.25, 5.0]
右方向スライド (RS)	5.08 [3.25, 6.0]	5.92 [5.25, 6.75]	4.50 [4.0, 5.75]	4.67 [3.0, 6.0]	4.50 [3.0, 6.0]
前方スライド (FS)	6.42 [6.0, 7.0]	6.33 [6.0, 7.0]	6.08 [5.0, 6.0]	5.67 [5.25, 7.0]	5.67 [5.0, 7.0]
後方スライド (BS)	6.17 [6.25, 7.0]	6.33 [6.0, 7.0]	5.83 [5.0, 6.0]	5.42 [5.0, 6.0]	5.17 [4.25, 6.0]

表 10 実験 4 (座位) 結果

Table 10 Experiment 4 (Sitting) Result.

	容易性	学習容易性	適合性	疲れにくさ	好み
つま先外回転 (T_OR)	5.17 [5.0, 6.0]	5.42 [5.0, 6.0]	5.25 [5.0, 6.0]	4.58 [3.0, 6.5]	4.58 [3.25, 5.0]
つま先内回転 (T_IR)	5.00 [5.0, 5.0]	5.50 [5.0, 6.0]	4.92 [4.0, 5.0]	4.67 [4.0, 5.75]	4.58 [4.0, 5.0]
かかと外回転 (H_OR)	5.17 [4.25, 6.0]	5.33 [5.0, 6.0]	4.92 [4.0, 6.0]	4.58 [3.25, 5.75]	4.92 [3.25, 6.0]
かかと内回転 (H_IR)	5.42 [4.25, 6.75]	5.42 [5.0, 6.0]	5.00 [4.25, 6.0]	4.92 [4.25, 6.0]	4.92 [4.0, 5.0]
左方向スライド (LS)	5.33 [5.0, 6.0]	5.50 [5.0, 6.0]	5.33 [5.0, 6.0]	4.67 [4.0, 5.0]	4.83 [4.0, 5.0]
右方向スライド (RS)	5.92 [5.25, 6.75]	5.50 [5.0, 5.0]	5.58 [5.0, 5.75]	5.33 [4.25, 6.0]	5.67 [5.0, 7.0]
前方スライド (FS)	6.67 [6.0, 7.0]	6.58 [6.0, 7.0]	6.50 [6.0, 7.0]	5.92 [5.0, 7.0]	6.58 [6.25, 7.0]
後方スライド (BS)	6.08 [5.0, 6.0]	6.33 [6.0, 7.0]	5.58 [4.25, 6.0]	6.08 [5.25, 7.0]	5.42 [4.0, 7.0]

	容易性	学習容易性	適合性	疲れにくさ	好み
つま先上昇 (T_Up)	-1.90	-0.25	-1.92	-0.83	-2.42
つま先外回転 (T_OR)	1.33	1.90	1.58	1.83	2.08
つま先内回転 (T_IR)	0.75	0.83	0.25	0.75	0.88
かかと上昇 (H_Up)	0.67	0.33	0.42	0.83	0.50
かかと外回転 (H_OR)	2.75	0.67	1.83	1.75	2.33
かかと内回転 (H_IR)	1.25	0.83	1.88	1.25	1.25
踏み込み (St)	2.34	0.75	0.88	0.7	0.88
左方向スライド (LS)	0.24	0.88	0.90	-0.08	-0.25
右方向スライド (RS)	-0.87	-0.08	-0.50	-1.25	-0.92
前方スライド (FS)	0.44	0.33	-0.17	0.90	-0.25
後方スライド (BS)	0.68	0.7	-0.33	0.42	0.25

図 9 実験 4 の結果の比較

Fig.9 Comparison of Experimental 4 Result.

【考察】実験 4 の結果より、拡大・縮小などの UI 操作には、立位では「前方スライド」が特に適していると考えられる。次点で「つま先外回転」や「後方スライド」も評

価が高く、入力として適している可能性がある。続いて座位では、立位と同様に「前方スライド」が特に適していると考えられる。次点で「後方スライド」が適している。実験3同様、可動域が大きいジェスチャの方が意図した値を入力しやすいことが要因と考えられる。

また、姿勢間の違いは、実験3同様、立位の場合は股関節を軸に足を回転させることで入力が可能なのに対し、座位の場合は大腿部が椅子に接していることから膝を支点にするため可動域が狭くなり、足を回転させるような入力が行いづらくなると考えられる。一方、スライドのジェスチャに関しては椅子に座りながらの入力動作が容易であることに起因すると考えられる。

4. フットジェスチャごとでの分析

各実験の結果から、フットジェスチャごとでどのようなUI特性を有しているか、どのような操作に適しているかを分析する。まず、各実験を表11に集計した。7段階評価で5以上を高評価、4以下を低評価として高評価と低評価の項目数で集計した。集計は以下のような条件で行った。

- ◎：高評価が4つ以上場合で一番評価が高い
 - ：高評価が4つ以上の場合
 - △：高評価が3つ以下の場合で低評価の項目はない
 - ×：高評価が3つ以下の場合で低評価がある
- これらの結果からジェスチャごとに分析結果を示す。

【つま先上昇】立位において、実験1, 2ともに他のフットジェスチャと比べて低評価であった。特に実験2の疲れにくさの項目で特に評価が低かったことから継続的な入力には適していない。これは、立位では足首にかかる体重の負担が大きく、可動域が狭いことに起因すると考えられる。

座位において、実験1で高評価であった。特に容易性、学習容易性、適合性の3項目で、これらのことから、座位では単発的な入力に適している。一方で、実験2では疲れにくさの項目で低評価であり、継続的な入力には適していないと考えられる。

【つま先外回転・内回転】立位において、実験1, 2ともに総じて高評価で、特につま先外回転は単発入力に適している。全評価項目で「つま先外回転」の方が内回転より高評価であったことから、内回転より外回転の方が有効なジェスチャであることがわかる。また、実験3, 4の結果から、「つま先外回転」は「前方スライド」や「後方スライド」には劣るが、全体のフットジェスチャの中では変化量を用いた入力にも適している。

座位において、実験2で「つま先外回転」の結果が多くの項目で高評価であった。これも可動域の広さが内回転より広いことによると考えられ、継続的な入力には、「つま先内回転」より「つま先外回転」の方が適している。しかし、実験3, 4に関しては、足をスライドさせる

表 11 全実験結果の集計

Table 14 Tabulation of all experimental results.

	単発的な入力	継続的な入力	変化量を用いた入力	
	実験1	実験2	実験3	実験4
立位	つま先上昇	×	×	△
	つま先外回転	◎	○	○
	つま先内回転	○	○	○
	かかと上昇	○	○	△
	かかと外回転	○	△	△
	かかと内回転	○	○	○
	踏み込み	×	×	△
	左方向スライド	×	△	△
	右方向スライド	×	×	△
	前方スライド	○	◎	◎
座位	後方スライド	○	○	○
	つま先上昇	◎	×	△
	つま先外回転	△	○	△
	つま先内回転	△	△	○
	かかと上昇	○	×	△
	かかと外回転	×	△	△
	かかと内回転	△	×	△
	踏み込み	×	×	△
	左方向スライド	×	×	○
	右方向スライド	△	△	○
前方スライド	○	○	◎	
後方スライド	△	◎	○	

◎：高評価が4つ以上場合で一番評価が高い
 ○：高評価が4つ以上の場合
 △：高評価が3つ以下の場合で低評価の項目はない
 ×：高評価が3つ以下の場合で低評価がある

「前方スライド」等のフットジェスチャと比較すると、優位ではなかった。

【かかと上昇】立位において、実験1の評価が高く、単発入力に適したフットジェスチャである。実験2の評価も高く、単発的な入力でも、継続的な入力でも効果的に利用できる。

座位において、実験1の結果が高評価であった。特に容易性、学習容易性、好みの項目での評価が高かった。このことから、単発的な入力に適していると考えられる。一方で、実験2に関しては、疲れにくさと好みの項目で評価が低く、継続的な入力には適していないと考えられる。

【かかと外回転・内回転】立位において、「かかと内回転」は実験1, 2ともに高評価であった。また「かかと外回転」に関しては実験1で高評価の項目が多かった。二つを比較すると、多くの項目で「かかと内回転」の方が高評価であった。これは可動域の広さが「かかと内回転」の方が広いことが要因として考えられる。このことから、単発的な入力や、継続的な入力には、「かかと外回転」より「かかと内回転」の方が適切であることが示唆された。

また、実験 3, 4 については足をスライドさせる「前方スライド」等のフットジェスチャと比較すると、優位ではなかった。

座位において、実験 1, 2 ともに高評価を得られなかった。これは、大腿部が椅子に接していることから、膝を視点に動かすことにより、特に可動域が狭く入力しづらい動作であることに起因すると考えられる。このことから、単発的な入力や、継続的な入力には適していないと考えられる。また、実験 3, 4 では、足をスライドさせる「前方スライド」等のフットジェスチャと比較すると優位ではなかった。

【踏み込み】立位と座位の両方の入力姿勢において、実験 1, 2 ともに低評価であった。このことから、単発的な入力や、継続的な入力には適していないと考えられる。

【左方向・右方向スライド】立位と座位の両方の入力姿勢において、実験 1, 2 ともにあまり高評価を得られなかった。特に実験 1 における、適合性、疲れにくさ、好みの 3 項目で低評価であった。これは他のジェスチャと比較して、動作が大きく疲れやすいことが原因と考えられる。このことから、単発的な入力や継続的な入力には適していないと考えられる。しかし、実験 3, 4 では座位において高評価を得られた項目が多かった。これは椅子に座ることで、体重によって片足にかかる負担が少なく、バランスがとりやすいことに起因すると考えられる。このことから、変化量を用いた入力に適していると考えられる。

【前方・後方スライド】立位と座位の両方の入力姿勢において、多くの実験での結果が高評価であった。さらに、多くの項目で「前方スライド」の方が高評価であった。これは、動作が小さく、筋力をあまり必要としないジェスチャであることに起因すると考えられる。このことから、単発的な入力や、継続的な入力、変化量を用いた入力に適していると考えられる。

5. むすび

本研究では、VR 空間操作コマンドとしてのフットジェスチャの UI 特性の分析に取り組んだ。まずはフットジェスチャを整理し、それらを VR 空間で認識可能な環境を構築した。更に、フットジェスチャの UI 特性を評価する実験を実施した。実験 1 では単発的なフットジェスチャ操作として色変更タスク、実験 2 では継続的なフットジェスチャ操作として拡大タスク、実験 3、実験 4 では足の位置変化量を用いた操作として、パタメータ操作タスクと拡大・縮小タスクを行わせ、各フットジェスチャを立位と座位で評価した。実験結果より、立位における、色変更操作や拡大操作として、「かかと上昇」「つま先外回転」「かかと内回転」「前方・後方スライド」が適していること、スライダバー操作や拡大・縮小操作として、「つま先外回転」「かかと内回転」「前方・後方スライド」が適していることを明らかにした。また、座位における、

色変更操作や拡大操作として、「つま先上昇」「かかと上昇」「つま先外回転」「かかと内回転」「前方・後方スライド」が適していること、スライダバー操作や拡大・縮小操作として、「左方向・右方向スライド」「前方・後方スライド」が適していることを明らかにした。

参考文献

- [1] J. S. Pierce, B. C. Stearns, and R. Pausch: "Voodoo dolls: seamless interaction at multiple scales in virtual environments," Proc. symposium on Interactive 3D graphics, pp.141 - 145, 1999.
- [2] V. Rajanna, and J. P. Hansen: "Gaze typing in virtual reality: impact of keyboard design, selection method, and motion," Proc. Eye Tracking Research & Applications, No. 15, 2018.
- [3] F. Muller, J. McManus, S. Gunther, M. Schmitz, M. Muhlhauser, and M. Funk: "Mind the Tap: Assessing Foot-Taps for Interacting with Head-Mounted Displays," Proc. CHI, pp. 1 - 13, 2019.
- [4] J. V. Willich, M. Schmitz, F. Muller, D. Schmitt, and M. Muhlhauser: "Podoportation: Foot-Based Locomotion in Virtual Reality," Proc. CHI, pp. 1 - 14, 2020.
- [5] 浦野雅也, A. C. Christian, 柴田史久, 木村朝子 "VR 空間操作コマンドとしてのフットジェスチャの UI 特性分析", 情報処理学会研究報告, Vol. 2022-HCI-199, No. 3, pp. 1 - 8, 2022.
- [6] 市川佑, 志築文太郎, 高橋伸: "距離センサを用いた膝の動きによるカーソル操作手法", 情報処理学会第 81 回全国大会講演論文集, Vol. 2019, No. 1, pp. 271 - 272, 2019.
- [7] 市川佑, 志築文太郎, 高橋伸: "GUI 操作における膝入力の応用の可能性の調査", 情報処理学会研究報告, Vol. 2020 - HCI - 189, No. 17, pp. 1 - 7, 2020.
- [8] J. Scott, D. Dearman, K. Yatani, and K. N. Truong: "Sensing Foot gestures from Pocket," Proc. UIST, pp. 199 - 208, 2010.
- [9] A. L. Simeone, E. Vellso, J. Alexander, and H. Gellersen: "Feet Movement in Desktop 3D Interaction," Proc. IEEE, pp. 71 - 74, 2014.
- [10] 夏目達也, 内村裕也, A. C. Christian, 柴田史久, 木村朝子: VR 空間操作コマンドとしてのアイジェスチャ UI の特性分析, 情報処理学会論文誌, Vol. 64, No. 2, pp. 312 - 325, 2023.