

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

浦野雅也^{†1} Arzate Cruz Christian^{†2} 柴田史久^{†1} 木村朝子^{†1}

概要: VR 技術の発達に伴い, 身体動作を入力方法とした手法の研究が活発になっている. その中でもフットジェスチャと呼ばれる足の動作を入力として用いるインタフェースでは, 両手が塞がっている状態でも扱える点が利点としてあげられている. しかし, VR 空間においてどのようなフットジェスチャがどのような操作に適しているかは十分に検討されていないと考えられる. そこで本研究では, 既存研究から 11 種類のフットジェスチャを抽出し, VR 空間における操作を 4 種類に分類したものをタスクとして設定したのちに, 実験を実施した. その結果を基に, VR 空間内におけるフットジェスチャの UI 特性を明らかにした. 本研究ではユーザの入力時に, より適切なフットジェスチャを選択する方法を提供することに重点をおいている.

キーワード: HMD, VR, フットジェスチャ, ユーザインタフェース, フルトラッキング

1. はじめに

人工現実感 (Virtual Reality; VR) 技術の発達により, 自身が VR 空間に入り込んだような体験が可能となり, 身体動作を入力方法とした手法の研究が活発になっている. この理由として, このような空間では自身の身体を動かすことで入力を行うことが直観的であると考えられる点や, Kinect や Leap Motion に代表される, 身体動作を容易に取得可能な安価なデバイスが登場した点などが考えられる.

身体動作を入力方法とした研究では, これまでハンドジェスチャと呼ばれるユーザの手や腕の動きを入力として利用するものや[1][2], 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[3][4]. しかし, これらの研究では, 用いられているフットジェスチャの種類が少ないことや, 特定の事例に限られたフットジェスチャ入力の分析を行っており, VR 空間内でのフットジェスチャ入力に関する知見は十分ではないと考えられる.

そこで本研究では, 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む. これは, VR 空間における入力方法として各フットジェスチャにどのような特性があるのか, どのような操作に適しているのか分析することを目的としている. この目的を達成するために, まずはフットジェスチャの種類を整理し, それらを VR 空間で認識可能な環境を構築する. そして, その環境を用いてフットジェスチャ入力を評価する実験を実施し, 実験結果から各フットジェスチャの特性分析を行った. 本研究ではユーザの入力時に, より適切なフットジェスチャを選択する方法を提案することに重点をおいている.

2. 関連研究

VR や MR/AR 空間内でフットジェスチャを用いた研究において, これまでに様々な入力手法が提案されている. 例えば, Muller ら[3]の研究では, Microsoft 社の HoloLens

と反射球形マーカを用いて, フットタップ (足を踏み出す動作) を入力手法として入力システムを構築した. そして, 直接的インタフェース (メニューが床面に表示され, 下を向いて操作を行う) と, 間接的インタフェース (足で操作を行うにも関わらず, 目を見ながら操作を行う) に関する実験を行い, 両タイプに応じた設計指針を提案している. また, Willich ら[4]の研究では, HTC 社の HMD と Vive Tracker と圧力センサを用いて, VR 空間内でのテレポート先を足で入力するための靴型デバイスを開発した. そして, 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 種類の入力方法の分析を行なった. しかし, これらの研究では, 用いられているフットジェスチャの種類が少ないことや, 特定の事例に限られたフットジェスチャ入力の分析を行っており, VR 空間内でのフットジェスチャ入力に関する知見は十分ではないと考えられる.

そこで本研究では, 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み, VR 空間における入力方法として各フットジェスチャにどのような特性があるのか, どのような操作に適しているのか分析することにした.

3. フットジェスチャの設計

3.1 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ために, 複数の既存研究の調査を行い, 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. 本論文の実験では, これら全 11 種類のフットジェ

^{†1} 立命館大学大学院 情報理工学研究科

^{†2} 立命館グローバル・イノベーション研究機構

表 1 フットジェスチャー一覧

フットジェスチャ	入力動作
つま先上昇: T_Up	かかとをつけた状態でつま先を上昇させる
つま先外回転: T_OR	かかとを軸につま先を外側に回転させる
つま先内回転: T_IR	かかとを軸につま先を内側に回転させる
かかと上昇: H_Up	つま先をつけた状態でかかとを上昇させる
かかと外回転: H_OR	つま先を軸にかかとを外側に回転させる
かかと内回転: H_IR	つま先を軸にかかとを内側に回転させる
踏み込み: Step	足を持ち上げ、一步前に踏み出す
左方向スライド: LS	足を前方にスライドさせ、左方向にスライドさせる
右方向スライド: RS	足を前方にスライドさせ、右方向にスライドさせる
前方スライド: FS	足を前方にスライドさせる
後方スライド: BS	足を後方にスライドさせる

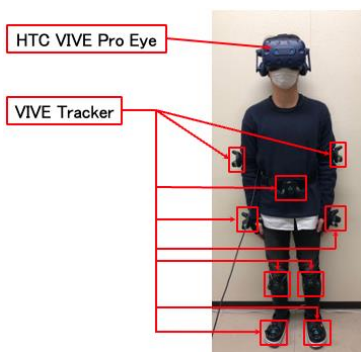


図 1 システム構成

スチャを立位の状態で右足のみを用いて行う。

3.2 フットジェスチャを用いた入力操作の整理

3.1 で整理した 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、まずフットジェスチャを利用した VR 空間操作にどのようなものがあるのか、各々の操作を、フットジェスチャを利用して行う場合に、どのような操作をどのような動作で行うことになるのかを整理する。

まず、フットジェスチャを利用した VR 空間操作は 3 種類に分類できると考えた。1 つ目は、単発的な入力である。単発的な入力とは、ボタンを押す動作やマウスクリックのような、入力動作を行う毎に入力が行われる操作のことで、これをフットジェスチャで行う場合、フットジェスチャを行うたびに入力が実行される。2 つ目は、継続的な入力である。継続的な入力とは、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、入力動作を行っている間は入力が継続される操作のことである。これをフットジェスチャで行う場合、あるフットジェスチャを行っている間は入力が継続され、そのフットジェスチャを辞めると入力が停止する。3 つ目は、足の位置変化量を用いた入力である。位置変化量を用いた入力とは、スライダーバーでの音量調節やマウスのホイールを用いた拡大・縮小操作のような、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のことである。これをフットジェスチャで行う場合、足の初期位置と現在位置の差が入力となる。

4. システム構成

3 章で述べた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 9 箇所（両手、両肘、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写には Unity を用いている。

5. 実験

5.1 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ために、フットジェスチャの評価実験を実施した。実験タスクには、VR アプリを調査した結果をもとに、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。そして、これらの実験結果から各フットジェスチャ入力を評価・分析することで、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。

5.2 実験 1: 色変更

5.2.1 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、実験後に得られた作業時間、エラー回数、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。

5.2.2 実験タスク

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目的の色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。

5.2.3 条件・手順

実験 1 で評価するのは、3.1 で述べた 11 種類のフットジェスチャである。平均作業時間、平均エラー回数、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 段階のリッカート尺度で評価する。実験協力者は 20～24 歳の男性 12 名で、実験手順は以下の通りである。

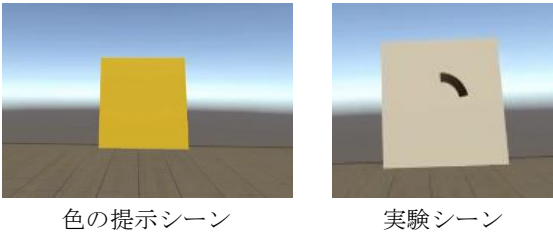


図2 実験1の様子

表2 5項目の主観評価

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

- (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

5.2.4 結果

主観評価の結果を表3に、有意差の見られた主観評価項目のグラフを図3~7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12名の7段階リッカート尺度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。色が濃いほど評価が低く、緑色が濃いほど評価が高い。図3~7のグラフは縦軸が7段階のリッカート尺度を表しており、横軸がフットジェスチャの種類を表している。また、各フットジェスチャ(11or8種類)に対して参加者内計画の1要因分散分析を行った結果、条件間に有意な差が得られたデータに対して、フットジェスチャ間での有意差を確認するため、下位検定としてRyan法による多重比較を行い、有意な差異があったペアを図中で示している。

表と図より、「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」と「つま先内回転」は全体的に高評価であり、この2つを比較すると「つま先外回転」の方が高評価であった。また、「かかと上昇」は全ての評価項目において高評価であった。「かかと外回転」と「かかと内回転」は全体的に高評価であり、この2つを比較す

表3 実験1結果

	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]

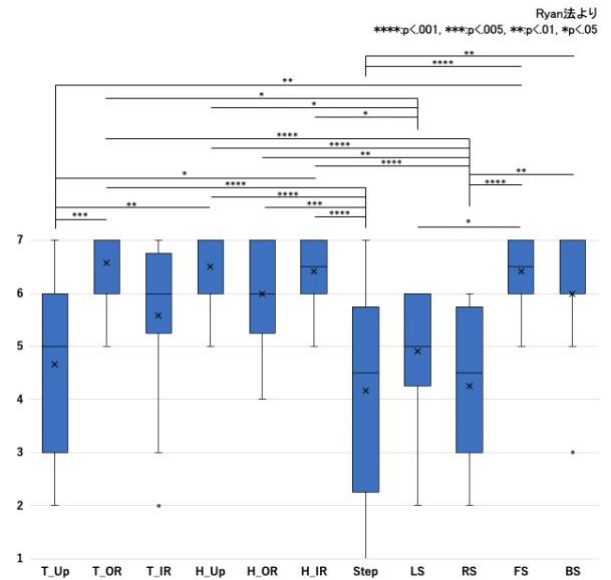


図3 容易性 (実験1)

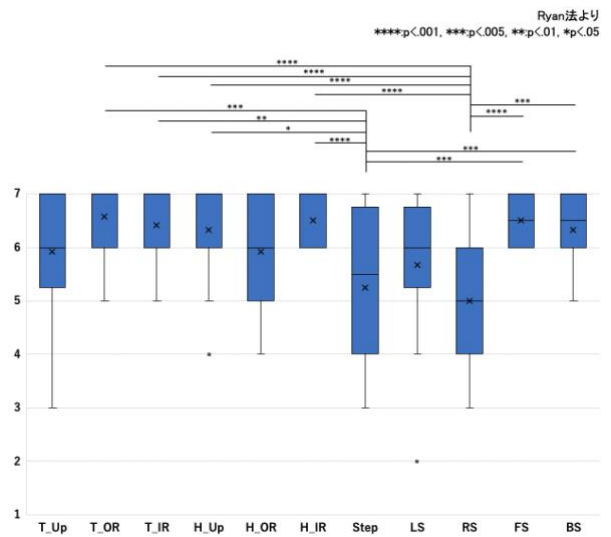


図4 学習容易性 (実験1)

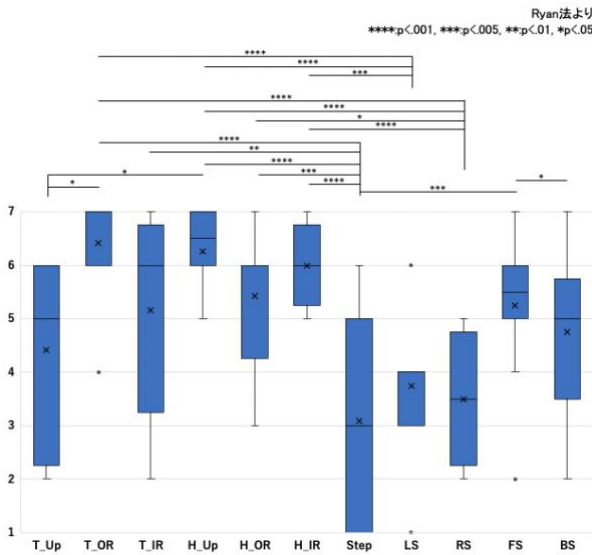


図5 適合性 (実験1)

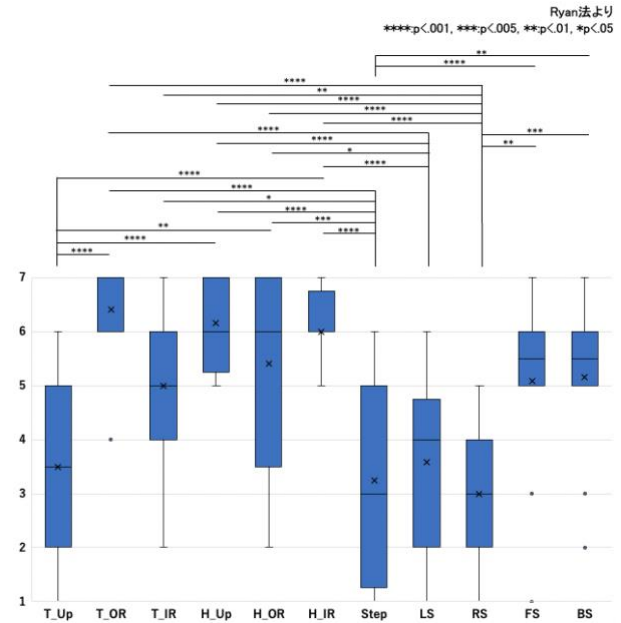


図7 好み (実験1)

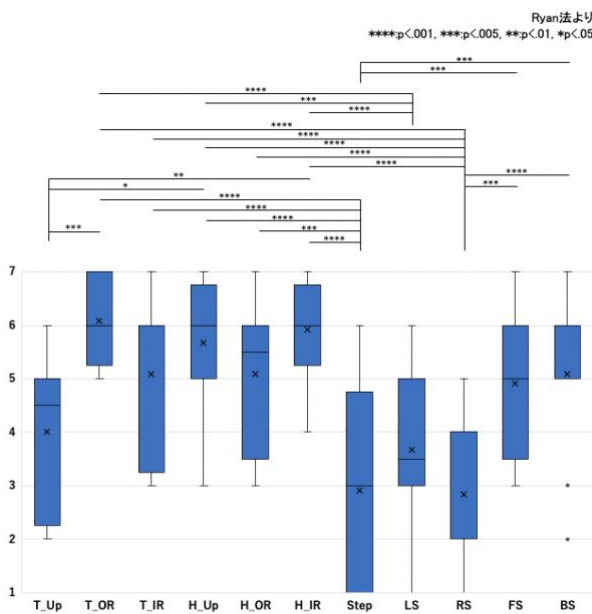


図6 疲れにくさ (実験1)

ると「かかと内回転」の方が高評価であった。「踏み込み」や「左右方向へのスライド」は適合性や疲れにくさ、好みにおいて低評価であった。「前方スライド」と「後方スライド」は全体的に高評価であり、この2つの間には大きな差は見られなかった。

5.2.5 考察

実験1の結果からページの変更や、カラーセルパネルの操作といった、単発的な入力によるUI操作には、「つま先外回転」が特に適していると考えられる。他に、「つま先内回転」「かかと上昇」なども適していると考えられる。これは、入力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。

5.3 実験2: 拡大

5.3.1 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。

5.3.2 実験タスク

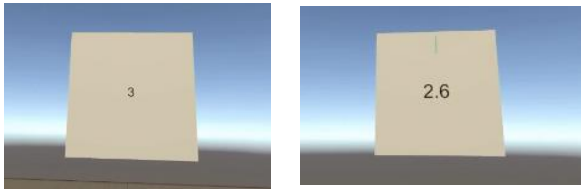
VR空間において、実験協力者の正面に立方体を配置し、フットジェスチャを行い続けることで立方体を徐々に拡大させ、フットジェスチャをやめることで拡大を停止させる(図8)。元の立方体の大きさを1.0とし、目的となる立方体の大きさは3.0, 4.0, 5.0の3種類いずれかとした。また、目的の大きさの±0.2以内で拡大を停止できた場合を成功、それ以外の場合をエラーとしてカウントし、もう一度同じタスクを行わせる。

5.3.3 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。評価項目、実験協力者、実験手順も実験1と同様である。

5.3.4 結果

主観評価の結果を表4に、有意差の見られた主観評価項目のグラフを図9~13に示す。図表の構成は5.2.4と同様である。表と図より、「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」と「つま先内回転」は全体的に高評価であり、この2つを比較すると「つま先外回転」の方が高評価であった。また、「かかと上昇」は全ての評価項目において高評価であった。「かかと外回転」と「かかと内回転」は全体的に高評価であり、この2つを比較すると「かかと内回転」の方が高評価であった。「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。



大ききの提示シーン 実験シーン

図8 実験2の様子

表4 実験2結果

	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]

「前方スライド」と「後方スライド」は全体的に高評価であり、この2つの間には大きな差は見られなかった。特に、「前方スライド」は、4つの項目で6.0を超えており、最も高評価であった。

5.3.5 考察

実験2の結果より、継続的な入力によるUI操作には「前方スライド」が特に適していると考えられる。他には「つま先内回転」や「かかと上昇」が適していると考えられる。これは、入力を行う際の動作が少ないことや、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。

5.4 実験3:パラメータ操作

5.4.1 目的

実験3では、足の位置の変化量を使った操作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、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。

5.4.2 実験タスク

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14)。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

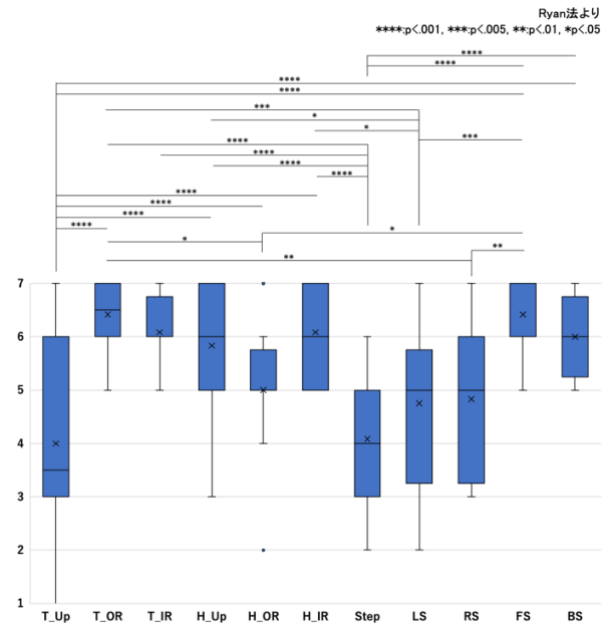


図9 容易性 (実験2)

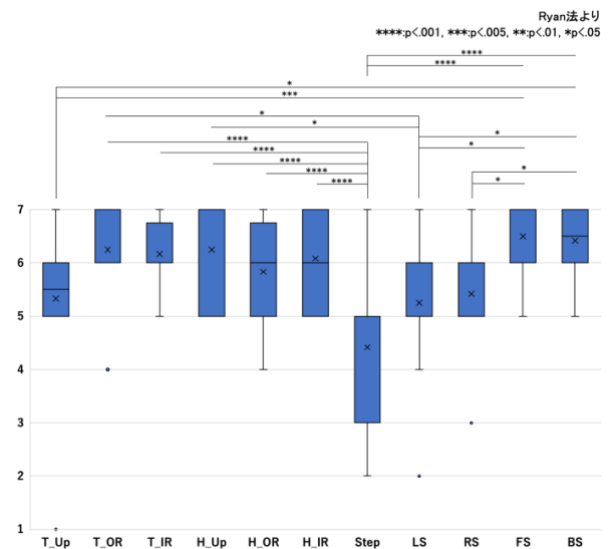


図10 学習容易性 (実験2)

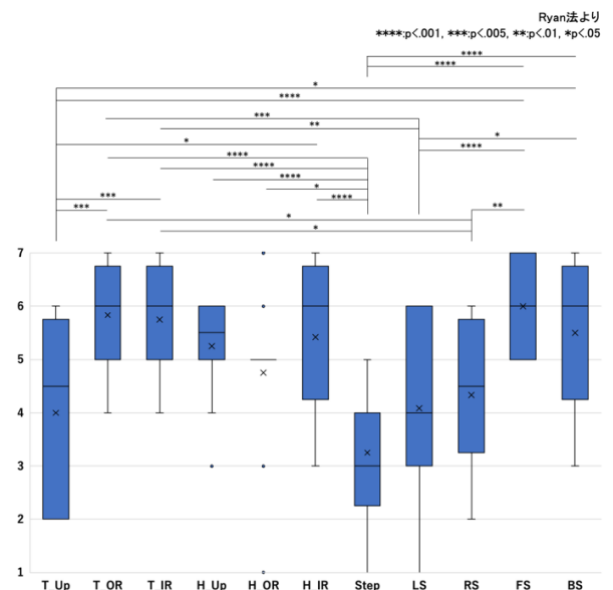


図11 適合性 (実験2)

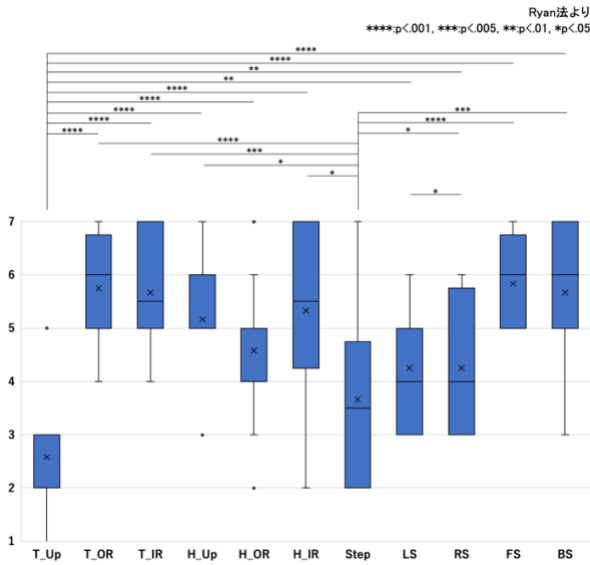


図 12 疲れにくさ (実験 2)

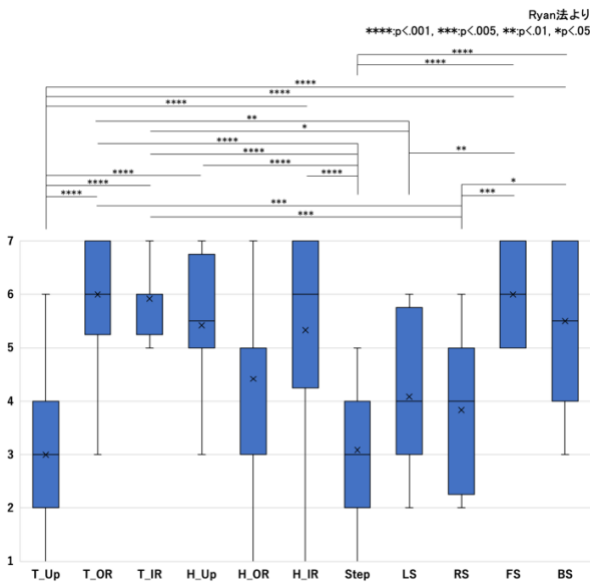


図 13 好み (実験 2)

目盛としている。

5.4.3 条件・手順

実験 3 で評価するのは、3.1 で述べた 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入力し難いためである。評価項目、実験協力者、実験手順は実験 1 と同様である。

5.4.4 結果

主観評価の結果を表 5 に、有意差の見られた主観評価項目のグラフを図 15 に示す。図表の説明については 5.2.4 と同様である。表、図より、いずれのフットジェスチャも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」、「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



値の提示シーン

実験シーン

図 14 実験 3 の様子

表 5 実験 3 結果

	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]

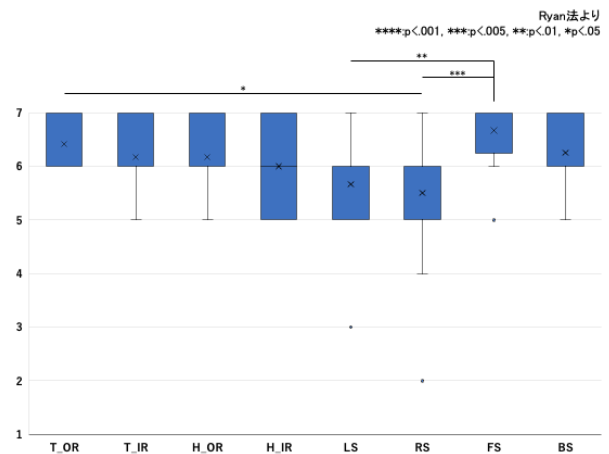


図 15 学習容易性 (実験 3)

た。また、「左右方向へのスライド」よりも「前後方向へのスライド」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。

5.4.5 考察

実験 3 の結果より、スライダバーの操作やスクロールなどの UI 操作には、「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」「かかと内回転」が適している。これは、これらのフットジェスチャの足の可動域が大きく、値を入力しやすいことが理由として考えられる。ただし、スライダバー操作では、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。

5.5 実験 4: 拡大・縮小

5.5.1 目的

実験 4 では、足の位置変化量による操作に対してどのフットジェスチャが適しているのかを評価するため、それに該

当する選択タスクを行わせ、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。

5.5.2 実験タスク

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16)。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。

5.5.3 条件・手順

実験4で評価するのは、3.1で述べた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。

5.5.4 結果

主観評価の結果を表6に、有意差の見られた主観評価項目のグラフを図17~20に示す。図表の説明については5.2.4と同様である。

表と図より、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、「左右方向へのスライド」よりも「前後方向へのスライド」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」全体的に高評価であった。

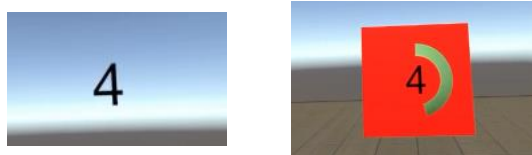


図16 実験4の様子

表6 実験4結果

	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]	4.92 [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]

5.5.5 考察

実験4の結果より、スケールアップ・スケールダウンなどのUI操作には、「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」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。

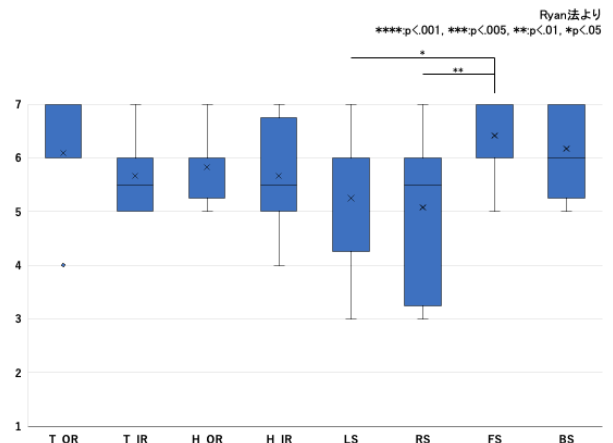


図17 容易性 (実験4)

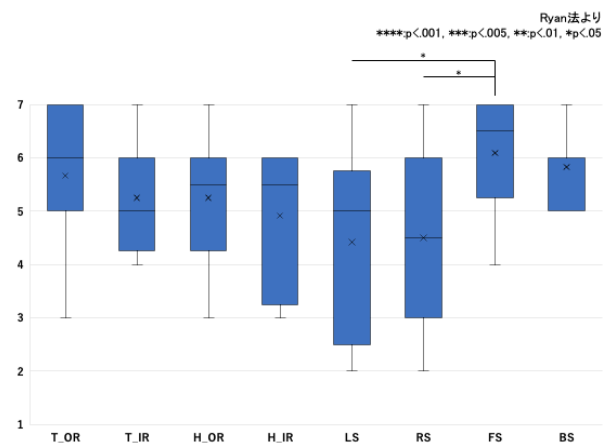


図18 適合性 (実験4)

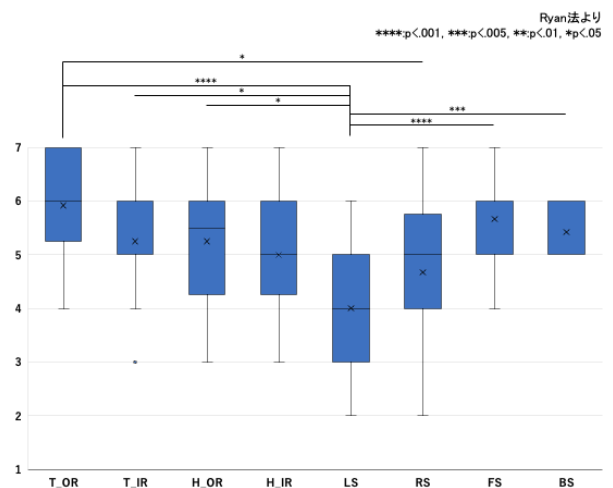


図19 疲れにくさ (実験4)

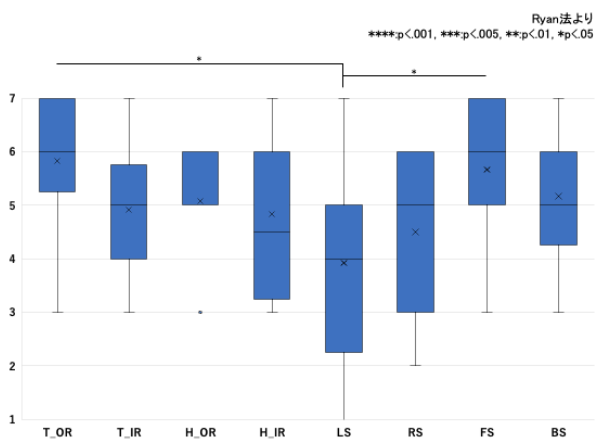


図 20 好み (実験 4)

6. フットジェスチャごとの分析

5 章の実験結果から、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。

【つま先上昇】実験 1, 2 と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出して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。

【つま先外回転・内回転】実験 1, 2 とともに総じて高評価で、特につま先外回転は単発入力に大変適している。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、外回転>内回転の順に有効なジェスチャである。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足の位置変化量を用いた操作にも適している。つまさき内回転は可動域が狭く、足の位置変化量を用いた操作には適していない。

【かかと上昇】実験 1 の評価が非常に高く、単発入力に適したフットジェスチャである。実験 2 の評価も悪くなく、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。

【かかと外回転・内回転】実験 1 の評価が非常に高く、いずれも単発的な入力に適したフットジェスチャである。全評価項目でつま先内回転の方が外回転より高評価であったことから、単発的な入力においては、内回転>外回転の順に有効なジェスチャである。

かかと外回転は、実験 2 の評価がそれほど高くなく、継続的な操作にはあまり適していない。また、実験 3 では適合性、疲れにくさ、好みの評価項目で 5.0 を切っていることから足の移動方向と操作対象の移動方向が一致している、足の位置変化量を用いた入力にはあまり適していない。

かかと内回転は、実験 3,4 の結果を見ると実験 3 では好みを除いた 4 項目で、実験 4 では適合性と好みを除いた 3 項目で 5.0 を超えていることから、足の位置変化量を用いた入力でも使いやすいと示唆された。

【踏み込み】実験 1, 実験 2 とともに低評価で、単発的な入力、継続的な入力ともあまり適していない。

【左方向・右方向スライド】実験 1, 実験 2 とともに低評価で、単発的な入力、継続的な入力ともあまり適していない。実験 3 では適合性が 5.0 を超えているが、実験 4 では 4.5 を下回っており、足の移動方向と操作対象の移動方向が一致している、足の位置変化量を用いた入力には適しているが、足の移動方向と操作対象の移動方向が一致していない、足の位置変化量を用いた操作にはあまり適していない。

【前方スライド】実験 1, 2 では他のフットジェスチャと比べ高評価であった。特に実験 2 の拡大タスクでは容易性が全フットジェスチャの中で一番高く、他の評価項目も 5.5 以上のことから継続的な入力にかなり適していると考えられる。また、実験 3, 4 でも 3 つの項目で 6.0 以上、2 項目で 5.5 以上の高評価であることから、足の位置変化量を用いた操作との相性もよい。

【後方スライド】実験 2 では容易性、学習容易性の 2 項目で 6.0 を超えており、適合性、疲れにくさ、好みの 3 項目で 5.5 を超えていることから、継続的な入力に非常に適している。実験 3, 4 では、前方スライドには劣るものの全ての評価項目で 5.0 を超えており、足の位置変化量を用いた入力にも適している。

7. 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評価した。実験結果から、単発的な操作には「つま先外回転」「かかと内回転」、継続的な操作には「つま先外回転」「前方スライド」が適しており、足の位置変化量を用いた操作では、「前方スライド」「後方スライド」が適していることが示唆された。

参考文献

- [1] J. S. Pierce *et al.*: "Voodoo dolls: seamless interaction at multiple scales in virtual environments," Proc. symposium on Interactive 3D graphics, pp.141 - 145, 1999.
- [2] V. Rajanna *et al.*: "Gaze typing in virtual reality: impact of keyboard design, selection method, and motion," Proc. Eye Tracking Research & Applications, No. 15, 2018.
- [3] J. v. Willich *et al.*: "Podoportation: Foot-Based Locomotion in Virtual Reality," Proc. CHI, pp. 1 - 14, 2020.
- [4] F. Muller *et al.*: "Mind the Tap: Assessing Foot-Taps for Interacting with Head-Mounted Displays," Proc. CHI, pp. 1 - 13, 2019