

VR/MR 空間におけるフットジェスチャを用いた 3D インタラクション手法の分析

樋口雄大†1 黒瀬佳那†2 坂口達哉†2 橋口哲志†3 柴田史久†1 木村朝子†1

概要：VR/MR 技術の発展により 3D 空間を活用した作業が可能となった。VR/MR 空間を対象とした操作では、身体動作を用いた入力手法との相性が良く、様々な身体部位を利用した方法が研究されている。本研究では、VR 空間における足を用いた入力（フットジェスチャ）に注目し、フットジェスチャを 3D インタラクションに利用する場合の特性や精度の分析を行った。本論文では、まず 3D インタラクションとして選択とドラッグ&ドロップを対象とし、操作にフットジェスチャを割り当てた 4 種類の手法を整理した。実験 1 では、VR 空間での選択に各手法を利用した場合のフィッツの法則による性能評価を行った。実験 2 ではドラッグ&ドロップの評価を行った。

キーワード：VR, MR, フットジェスチャ, UI, 3D ポインティング, フィッツの法則, オブジェクト操作

1. はじめに

人工現実感 (Virtual Reality; VR) では、バーチャル空間を活用した作業が可能となる。例えば、Apple 社が販売している Apple Vision Pro[1]は「空間コンピューティング」を提唱しており、デジタルコンテンツを現実空間にシームレスに融合した体験ができる。これにより 3D 空間を活用した作業が可能となるが、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、仮想空間で直感的に入力できることが挙げられる。

身体動作を入力方法とした研究では、これまでユーザの手や腕の動きを入力として利用するハンドジェスチャ[2]や視線など多く検討されており、HMD の標準インタフェースとしても組み込まれている。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各種提案されている[3][4]が、フットジェスチャがどの程度の精度や負荷で利用できるのかはまだ明らかになっていない。このようなフットジェスチャの UI 特性が明らかになれば、既存の入力方法との併用なども検討できるようになる。

そこで本研究では、VR/MR 空間におけるカーソル操作やオブジェクト操作にフットジェスチャを活用した場合の UI 特性を調査する (図 1)。本研究では最初に、フットジェスチャを用いた 3D インタラクション手法を整理する。既存研究を参考に、3D インタラクションにフットジェスチャを割り当て、特性や精度の分析を行った。まず、3D インタラクションとして、選択とドラッグ&ドロップを対象とし、操作にフットジェスチャを割り当てた 4 種類の手法を整理した。そして実験 1 では、VR 空間での選択に各手法を利用した場合のフィッツの法則による性能評価を行った。実験 2 ではドラッグ&ドロップの評価を行った。



図 1 足を用いた 3D インタラクションのイメージ

2. 関連研究

足を用いたインタフェースの研究として、様々な入力手法が検討されている。例えば、市川ら[5]の研究では、距離センサを用いた膝の動きによるカーソル操作手法が提案された。この手法では、デスクトップ PC を操作する際に、使われていない足を活用しマウスカーソルの操作を行う。これにより、ワープロソフトを利用する時などに、キーボード上にある手を移動させることなく、文字の色やサイズの変更、図の挿入などが可能となる。また、画面に表示した回路図を見ながらの電子工作など、手の作業を中断することなく操作ができるようになる。

また、Wan ら[3]は VR/MR 空間における足を用いたキーボード入力手法を提案している。この手法では、机がなくとも地面にある足を活用することで、空中操作による腕の疲れがない利点があげられている。これにより、バスや地下鉄で座る際に荷物を持ちながらの入力や、上肢をリラックスさせて映画などを視聴しながらの入力が可能となる。

そして、Willich ら[4]の研究では、VR 空間におけるフット

†1 立命館大学大学院 情報理工学研究科

†2 立命館大学 情報理工学部

†3 立命館グローバル・イノベーション研究機構

トジェスチャを用いたテレポート手法が提案された。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種類のジェスチャを提案し、比較実験を行った。これらの手法では、視線や手が自由な状態でもVR空間内で移動が可能となるため、マルチタスク時に活用できる可能性があげられている。

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、多様な入力に対応できる可能性がある。そこで本研究では、VR/MR空間において足を用いて3D空間操作を行う際の特性や精度の分析を行う。

3. インタフェースの設計

3.1 対象とする3Dインタラクション

本研究では3Dインタラクションとして、まずVR/MR空間における選択やドラッグ&ドロップに着目し、実装を行う。まず、VR/MR空間における選択では、レイ(光線)を用いたポインティングが一般的で、レイが衝突した一番手前のオブジェクトを優先的に選択するケースが多い。続いて、ドラッグ&ドロップでは、選択したオブジェクトの移動を行う。その際に奥行きも考慮した3D空間操作が必要となる。

そこで選択やドラッグ&ドロップに必要な操作として、

- ① 水平方向の操作
- ② 鉛直方向の操作
- ③ 奥行き方向の操作
- ④ 決定の操作

が考えられ、これら①～③の3方向の操作と④の決定操作にフットジェスチャを割り当てることを検討する。

3.2 採用するフットジェスチャの整理

関連研究を参考に、対象とする3Dインタラクションに割り当てるフットジェスチャを整理する。

Willichら[4]の研究では、VR空間においてテレポート先の指定としてフットジェスチャを用いた。“つま先の向き”や“足のスライド”を用いたジェスチャが方向や距離の指定に適していることを明らかにした。また、Wanら[3]は、VR/MR空間におけるフットジェスチャを用いたキーボード入力手法を提案した。“足のスライド”を用いて正面にあるソフトウェアキーボード内のポインティングが可能であることを示した。これらの関連研究から、VR空間においてフットジェスチャとして使用されているジェスチャには“つま先の向き”や“足のスライド”があり、ポインティングなどの操作に活用させていることがわかる。

そこで、本稿では“つま先の向き”や“足のスライド”のフットジェスチャを3方向の操作に割り当てるため、「内転・外転」、「背屈・底屈」、「左右スライド」、「前後スライド」を組み合わせ分析することにした。

図2に示すように、①水平方向の操作、②鉛直方向の操作、③奥行き方向の操作に対してこれらのジェスチャの4

	水平方向	鉛直方向	奥行き方向
手法1	内転・外転	背屈・底屈	前後スライド
手法2	左右スライド	前後スライド	背屈・底屈
手法3	左右スライド	背屈・底屈	前後スライド
手法4	内転・外転	前後スライド	背屈・底屈

図2 3方向の操作とフットジェスチャの組合せ



図3 システム構成と入力姿勢

手法の組み合わせを整理した。そして、④決定の操作に「背屈」を割り当てる。これは、先行研究[6]においてVR空間でクリックのような単発的な入力には、座位の場合だとかかとを軸にしてつま先を上昇させる「背屈」が適していることが確認されているからである。また、決定の操作である「背屈」はWanら[3]を参考に、つま先が10°以上上昇した時に入力される。

3.3 入力方法

【システム構成と入力姿勢】フットジェスチャでの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3に示す。HMD (VIVE XR Elite) を用いてVR空間を体験し、VIVE Ultimate Tracker で両足の位置や姿勢を検出している。各機器の制御や仮想物体の描画にはUnityを用いた。

操作姿勢は座位で実施し、右足で3方向の操作を行い、左足で決定の操作を行うこととする(図3)。

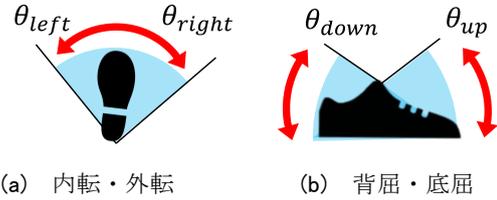
【ポインティング方法】ポインティング方法としてはレイを用いており、本手法ではレイと視空間の座標系を一致させる

ため、視点 (VR 空間でのカメラ位置) を始点とするレイにより球面座標系で位置の指定を行う (図 4)。また、レイの一定距離にカーソルを表示し、レイは非表示とする。選択では、図 4(a)に示すように水平方向と鉛直方向の操作のみを行い、レイが衝突した一番手前にあるオブジェクトを選択できることになる。ドラッグ&ドロップでは、選択したオブジェクトの 3D 空間的な移動を行い、図 4(b)に示すように水平方向と鉛直方向に加えて奥行き方向を追加した 3 方向の操作を行う。

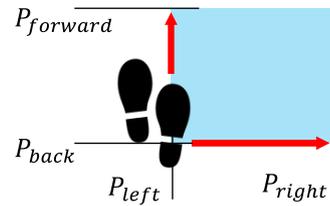


図 4 ポインティング方法

【フットジェスチャからカーソル位置への変換】フットジェスチャの変化量に対するカーソルの位置の変化量については、ユーザごとに各フットジェスチャの可動域のキャリブレーションを行う。まず、水平・鉛直方向の操作については、使用するフットジェスチャの最大変化量に対して VR 空間上での水平・鉛直方向の最大変化量が 120° となるように倍率を決定する。これは McKenzie ら[7]が提唱している VR スクリーンの UI 設計として、首の可動域である 120° 以内に主要な UI を配置することを推奨しているからである。また、奥行き方向の操作について、「前後スライド」の場合は移動した距離だけ奥行き方向が変化する。これは従来のコントローラ手法と同様であり、手と足の実験条件を統制した。



(a) 内転・外転 (b) 背屈・底屈



(c) スライド

図 5 キャリブレーション

一方、「背屈・底屈」で奥行き方向を操作する場合には、計測した角度情報を奥行き方向の距離に変換する。その VR 空間での最大変化量は「前後スライド」の最大変化量と一致させる。

キャリブレーションから得られた「内転・外転」の各最大角度を θ_{left} , θ_{right} (図 5(a)), 「背屈・底屈」の各最大角度を θ_{up} , θ_{down} (図 5(b)) で表す。また、「左右スライド」の各最大位置を P_{left} , P_{right} 「前後スライド」の各最大位置を $P_{forward}$, P_{back} と表す (図 5(c))。これらの実測値から水平方向、鉛直方向のカーソル角度 (θ_h^t, θ_v^t) を、式 (3.1), 式 (3.2) を用いて算出する。

$$\theta_h^t = \left(\frac{F_h^t - C_L}{C_R - C_L} - \frac{1}{2} \right) \times 120^\circ \quad (3.1)$$

$$\theta_v^t = \left(\frac{F_v^t - C_D}{C_U - C_D} - \frac{1}{2} \right) \times 120^\circ \quad (3.2)$$

ここで定義した C_L, C_R は、手法 1, 手法 4 の場合に $\theta_{left}, \theta_{right}$ とし、手法 2, 手法 3 の場合に P_{left}, P_{right} を当てはめる。また、定義した C_U, C_D は、手法 1, 手法 3 の場合は $\theta_{up}, \theta_{down}$ とし、手法 2, 手法 4 の場合は $P_{forward}, P_{back}$ とする。そして、時間 t におけるフットジェスチャ入力を (f_h^t, f_v^t) とする。 f_h^t は各手法の水平方向として使用する「内転・外転」の角度もしくは「左右スライド」の位置であり、外転方向または右方向を正とする。 f_v^t は各手法の鉛直方向の操作として使用する「背屈・底屈」の角度もしくは「前後スライド」の位置であり、背屈方向または前方向に正とする。以上から時間 t におけるフットジェスチャから変換される VR

空間での水平方向、鉛直方向のカーソル角度 (θ_h^t, θ_v^t) が算出できる。ただし、正面方向を 0° とし、右方向、上方向を正とする。

VR 空間での奥行き方向の変化量 $\Delta depth^t$ は次の式 (3.3) に示す。

$$\Delta depth^t = \begin{cases} \Delta f_z^t & \text{(前後スライド)} \\ \frac{\Delta f_z^t}{\theta_{up} - \theta_{down}} \times (P_{forward} - P_{back}) & \text{(背屈・底屈)} \end{cases} \quad (3.3)$$

奥行き方向の操作はオブジェクトを掴んだ時点からのフットジェスチャの変化量を入力として用いるため、相対的な移動操作となる。掴んだ時点からの時間 t におけるフットジェスチャの変化量を Δf_z^t とする。そして、手法 1, 手法 3 の場合「前後スライド」の移動した距離となり、前方向を正とする。手法 2, 手法 4 の場合「背屈・底屈」の変化した角度となり、背屈方向を正とする。また、その VR 空間での最大変化量は「前後スライド」の最大変化量と一致させるように変換する。以上から時間 t におけるフットジェスチャの変化量から変換される VR 空間での奥行き方向の変化量 $\Delta depth^t$ が算出できる。ただし正面方向を正とする。

4. 実験 1

4.1 実験目的

実験 1 では、フットジェスチャを用いた 3D インタラクション手法における選択の性能評価を行う。ポインティン

グタスクを実施し、フィッツの法則[8]に当てはめて各手法の性能を評価する。また主観評価により各手法の操作による疲労感についても分析する。

4.2 評価方法

実験の評価は、フィッツの法則を用いる。フィッツの法則は、式(4.1)によって表される。

$$MT = a + bID \quad (4.1)$$

MT (Moving Time) はターゲットを選択するまでにかかる時間であり、 a, b は実験的に決定される定数である。 ID (Index of Difficulty) は式(4.2)によって表される。

$$ID = \log_2\left(\frac{A}{W} + 1\right) \quad (4.2)$$

A はポインタがある場所から目標となるターゲットまでの距離(ターゲット間の距離)であり、 W はターゲットの大きさである。 ID が大きくなるほどポインティングの難度が増加することになる。操作性能として、性能指標であるスループット(TP : Throughput)は式(4.3)で表される。

$$TP = \frac{ID}{MT} \quad (4.3)$$

フィッツの法則は一般的には2Dでのポインティングに用いられるが、VR空間におけるポインティングの性能評価にも使用されている。Qianら[9]はVR空間での視線や頭の向きによるポインティングを、角度解釈した ID を用いたフィッツの法則によって評価している(式4.4)。

$$ID = \log_2\left(\frac{\alpha}{\omega} + 1\right) \quad (4.4)$$

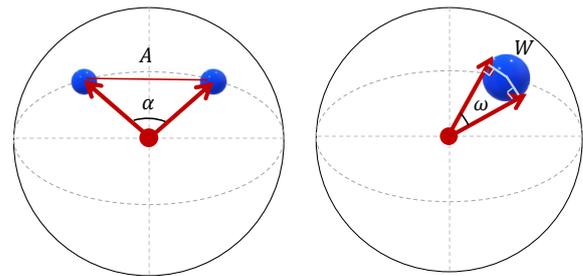
ターゲット間の距離を角度解釈した α とターゲットの大きさを角度解釈した ω を図示したものを図6に示す。この指標を用いて3Dインタラクション手法における選択の性能を評価する。

4.3 実験タスク

VR空間において、マルチディレクショナルポインティングタスクを実施する。Monteiroら[10]のVR空間における視線や頭の向きなどのハンズフリー入力を用いたフィッツの法則タスクを参考に、視点から1mの距離に9個の球のターゲットを円形に配置する。実験参加者は図7に示すように、均等に円形配置されたターゲットを順に選択していき、1試行当たり10回の選択を行う。図8に示すように、視点から1mの距離にターゲットを配置し、ターゲット間の距離は球面座標系の角度解釈によって決定する。本実験ではターゲット間距離とターゲットの大きさを以下のように変更する。

- ・ターゲット間の距離: 30°, 60°, 90°
- ・ターゲットの大きさ: 64mm, 94mm, 128mm

ターゲット配置の条件の組み合わせは、3条件(ターゲット間の距離) × 3条件(ターゲットの大きさ) = 9条件である。よって、フットジェスチャ4手法とコントローラの計5手法を用いて、9個のターゲットを選択するタスクを9条件で実施した。評価項目として、各ターゲットの選



(a) ターゲット間の距離 (b) ターゲットの大きさ

図6 IDの角度解釈

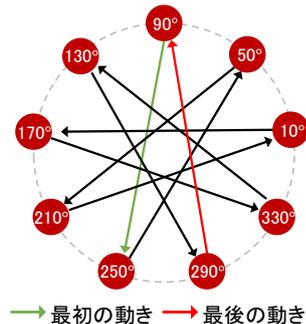


図7 ターゲットの配置

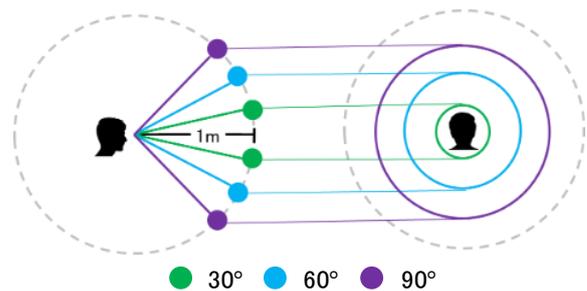


図8 横・後方から見たターゲット間の距離

択時間、エラー率を収集した。また、NASA-TLXを用いて主観的メンタルワークロードを評価した。

4.4 実験手順

実験参加者は21~24歳の18名(男性17名,女性1名)で実験手順は以下の通りである。

- (1) キャリブレーションを実施
- (2) 入力手法をランダムに決定し、練習を行わせる
- (3) ターゲットの配置条件をランダムに決定し、実験タスクを行わせる
- (4) 手順(3)を9条件のターゲット配置で繰り返す
- (5) NASA-TLXに回答させる
- (6) 残りの手法についても手順(2)~(5)を繰り返す
- (7) コメントの聴取

4.5 結果

【フィッツの法則について】図9は得られた MT を縦軸、 ID を横軸に示す。各手法の平均された MT の値に近似直線を算出し

たところ、各手法で $R^2 > 0.94 \sim 0.96$ となった。この結果からすべての入力手法がフィッツの法則に適合していることがわかる。したがって、本研究で用いた手法は一般的なポインティング手法に適合していることを示唆している。

スループットの結果を図 10 に示す。各手法のスループットの平均値は、手法 1 が 1.42[bits/s]、手法 2 が 1.71[bits/s]、手法 3 が 1.05[bits/s]、手法 4 が 1.56[bits/s]、コントローラが 3.57[bits/s]であった。エラーバーは標準偏差を示す。ShapiroWilk 検定の結果、すべての手法においてスループットが正規分布をしていることが確認された ($p_s > 0.158$)。そのため、まず一要因の分散分析を行った結果、主効果が確認できた ($F(4,68) = 420.265, p < 0.01, \eta p2 = 0.961, 1-\beta = 1$)。検出力 ($1-\beta$) は十分である。なお検出力の値は Fisher の重み付き Z 変換値による平均相関を用いて算出した。参加者内誤差について Mauchly の球面性検定を行った結果、有意であった (Mauchly's $W = 0.299, p = 0.029$)。このため Greenhouse-Geisser の自由度調整係数による修正検定を行った結果、手法間による差は有意であることを確認した (G-G corrected $p = 0$)。ホルムの方法を用い有意水準を調整した対応のある t 検定により、多重比較を行った。その結果、フットジェスチャの全手法とコントローラ間でその差が有意であった (各手法間で $p_s < 0.01$)。フットジェスチャ間では、手法 1 と手法 2 ($p < 0.01$)、手法 1 と手法 3 ($p < 0.01$)、手法 1 と手法 4 ($p = 0.032$)、手法 2 と手法 3 ($p < 0.01$)、手法 2 と手法 4 ($p = 0.016$)、手法 3 と手法 4 ($p < 0.01$) で有意差が認められた。有意な差異があったペアを図中で示している。これらの結果から、スループットは手法 2 が手法 1、手法 3、手法 4 より有意に評価が高いことがわかる。また、手法 4 は手法 1、手法 3 よりも有意に評価が高い。選択時間、エラー率の結果においても、手法 2、手法 4 が比較的に評価が高いことが同様に確認された。

【NASA-TLX の結果】NASA-TLX の結果を図 11 に示す。ShapiroWilk 検定の結果、いくつかの手法においてスコアが正規分布をしていないことが確認された ($p_s < 0.040$)。そのため、まずフリードマン検定を行った結果、主効果が確認できた ($\chi^2(4) = 28.312, p < 0.01, \eta^2 = 0.393$)。ホルムの方法を用い有意水準を調整したウィルコクソンの符号付順位和検定により、多重比較を行った。その結果、フットジェスチャの全手法とコントローラ間でその差が有意であった (各手法間で $p_s < 0.05$)。フットジェスチャ間では、手法 2 と手法 3 ($p = 0.004$)、手法 3 と手法 4 ($p = 0.006$) で有意差が認められた。有意な差異があったペアを図中で示している。この結果から、手法 3 が手法 2、手法 4 より有意に負荷が大きいのことがわかる。

4.6 考察

実験結果から、フットジェスチャはコントローラと同様にフィッツの法則に適合していることを示した。フットジ

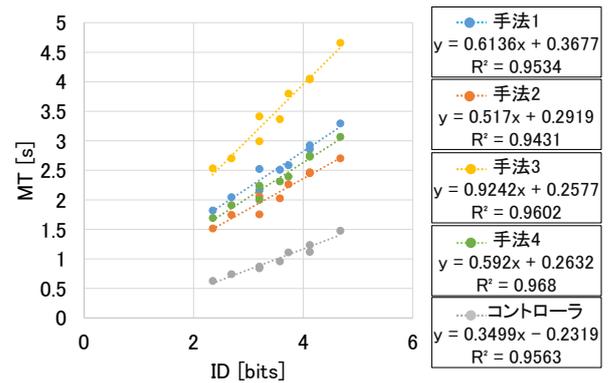


図 9 IDとMTの関係 (回帰直線)

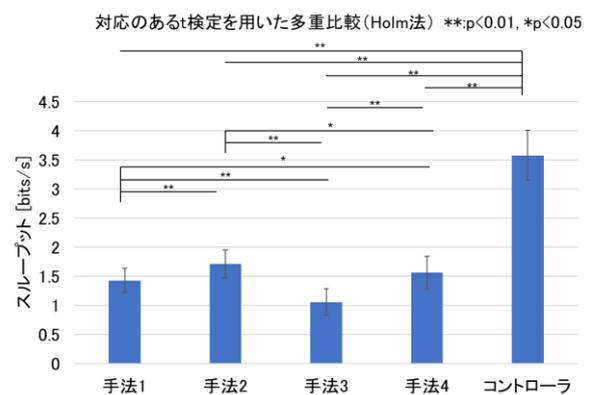


図 10 スループット

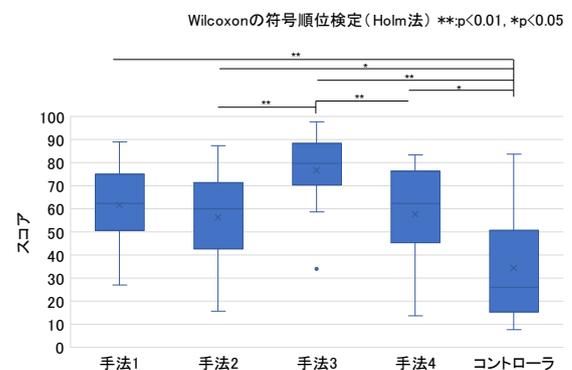


図 11 NASA-TLX

ェスチャの精度として、最もスループットが高かったのは手法 2 の 1.71[bits/s]であり、これはコントローラの 3.57[bits/s]の約 0.48 倍である。このことから、足でのポインティングで手と同程度の選択時間で選択させるためには、ターゲットの大きさや配置を工夫する必要があると考えられる。また、エラーや疲労感においても、フットジェスチャはコントローラほど評価を得られなかった。ここから、足を用いる場合はエリアカーソルのようなポインティング

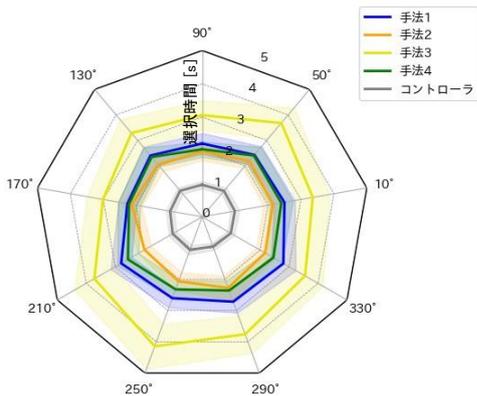


図 12 ターゲット方向ごとの選択時間の平均値

の支援を通じてエラーや疲労感を減らす工夫が必要であると考えられる。

フットジェスチャ間では、各指標において手法 2 が最も評価が高く、続いて手法 4 の評価が高いことがわかる。これは、「背屈・底屈」が安定しない、「背屈・底屈」は疲労感がある」といったコメントが得られた通り、手法 1 と手法 3 の「背屈・底屈」によるポインティングが困難であったことがわかる。また、ターゲット方向ごとの選択時間の平均値の結果を図 12 に示す。グラフ内の直線が平均値を表し、その周りに着色している箇所が標準誤差を表す。この結果から、手法 1、手法 3 の「背屈・底屈」における底屈による下方向の選択に時間がかかっていることがわかる。これより、背屈と底屈のゲインの調整の必要性や、底屈を用いて下方向のポインティングを行う際、ターゲットの大きさや配置をより工夫する必要があると考えられる。

5. 実験 2

5.1 実験目的

実験 2 では、フットジェスチャを用いた 3D インタラクシオン手法におけるドラッグ&ドロップの評価を行う。VR 空間内におけるドラッグ&ドロップタスクを通じて得られた成績や主観評価により、各手法の精度や特性を分析する。

5.2 実験タスク

VR 空間内で任意の位置に提示されたオブジェクトを目標位置にドラッグ&ドロップさせるタスクを実施する。移動させるオブジェクトと目標位置はランダムに提示する。目標位置は視点から距離 1m とした。目標位置の出現範囲は、視野角 30°以内に提示させる。これは Yu ら[11]の VR 空間における視線や手入力を用いた 3D オブジェクト操作タスクを参考にした。これにより、計測データからオブジェクトを掴んでから目標位置を探索する時間を省くことができる。実験参加者は提示されたオブジェクトを掴み、目標位置の誤差 2.5cm 以内に配置することでタスク完了となる。図 13 のように実験タスクにおけるオブジェクトの移動条件として、水平・鉛直方向の移動と奥行き方向の移動

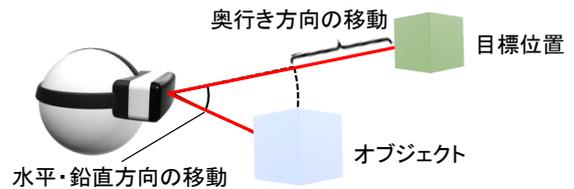


図 13 オブジェクトの移動

表 1 SUS の質問項目

この入力手法は頻繁に使いたいと思う
この入力手法は必要以上に複雑だと思った
この入力手法は使いやすいと思った
この入力手法を使えるようになるためには技術スタッフの助けがいるだろうと思う
この入力手法における動作と操作の組み合わせは統一感があると思った
この入力手法の動作と操作の組み合わせには一貫性が全くないと思った
ほとんどの人がこの入力手法をすぐに使いこなせるようになると思う
この入力手法を使うのは煩わしいと思った
この入力手法は確信をもって使えた
この入力手法を使うには多くの学習を要した

を以下のように変化させる。

- ・水平・鉛直方向の移動：35°, 55°
- ・奥行き方向の移動：-15cm, -7.5cm, 7.5cm, 15cm (正面方向に正)

実験参加者はフットジェスチャ 4 手法とコントローラの計 5 手法で、2 条件 (水平・鉛直方向の移動) × 4 条件 (奥行き方向の移動) × 2 = 16 試行をドラッグ&ドロップの実験タスクとして実施した。評価項目として、操作時間 (オブジェクトを掴んでからタスク完了するまでの時間)、掴んだ回数、位置の誤差を収集し、定量的評価を行う。

また、実験 1 と同様に NASA-TLX を実施した。加えて、System Usability Scale (SUS) による主観的な使いやすさの評価した。本実験で用いた SUS の質問項目を表 1 に示す。実験の最後にフットジェスチャ 4 手法に好ましい順位を付けて評価した。

5.3 実験手順

実験参加者は 21~24 歳の 18 名 (男性 18 名) で実験手順は以下の通りである。

- (1) キャリブレーションを実施
- (2) 入力手法をランダムに決定し、練習を行わせる
- (3) オブジェクトをランダムに配置し、実験タスクを行わせる
- (4) 手順(3)を 16 試行繰り返す

- (5) SUS, NASA-TLX に回答させる
- (6) 残りの手法についても手順(2)~(5)を繰り返す
- (7) 手法の順位付けアンケートに回答させる
- (8) コメントの聴取

5.4 結果

【定量的評価の結果】操作時間の結果を図 14 に示す。ShapiroWilk 検定の結果、いくつかの手法において操作時間が正規分布をしていないことが確認された ($p_s < 0.05$)。そのため、まずフリードマン検定を行った結果、主効果が確認できた ($\chi^2(4) = 48.978, p < 0.01, \eta^2 = 0.680$)。ホルムの方法を用いて有意水準を調整したウィルコクソンの符号付順位和検定により、多重比較を行った。その結果、フットジェスチャの全手法とコントローラ間でその差が有意であった (各手法間で $p_s < 0.01$)。フットジェスチャ間では、手法 2 と手法 4 ($p = 0.008$) で有意差が認められた。また、手法 1 と手法 4 ($p = 0.075$)、手法 2 と手法 3 ($p = 0.058$) で有意傾向が確認された。有意な差異があったペアを図中で示している。ここから、フットジェスチャ間での操作時間は、手法 2 が有意に早く、手法 4 が有意に遅いことがわかる。掴んだ回数に関しては、操作時間の結果と同様に手法 2 の評価が高かったが、位置の誤差の結果についてはどの手法間にも有意差は認められなかった。

【SUSの結果】SUSの結果を図 15 に示す。ShapiroWilk 検定の結果、いくつかの手法においてスコアが正規分布をしていないことが確認された ($p_s < 0.016$)。そのため、まずフリードマン検定を行った結果、主効果が確認できた ($\chi^2(4) = 37.449, p < 0.01, \eta^2 = 0.520$)。ホルムの方法を用いて有意水準を調整したウィルコクソンの符号付順位和検定により、多重比較を行った。その結果、フットジェスチャの全手法とコントローラ間でその差が有意であった (各手法間で $p_s < 0.01$)。一方で、フットジェスチャ間での有意差は認められなかったが、手法 1 と手法 4 ($p = 0.077$) で有意傾向が確認された。また、「この入力手法における動作と操作の組み合わせは統一感があると思った」の質問項目において、フットジェスチャ間では、手法 1 と手法 4 ($p = 0.035$) で有意差が認められ、同様に「この入力手法の動作と操作の組み合わせには一貫性が全くないと思った」という質問項目において、フットジェスチャ間では、手法 1 と手法 3 ($p = 0.035$) で有意差が認められた。この結果から、フットジェスチャ間での入力動作と操作の統一感において、手法 1 が有意に高い評価であったことがわかる。

【NASA-TLXの結果】NASA-TLXの結果を図 16 に示す。ShapiroWilk 検定の結果、いくつかの手法においてスコアが正規分布をしていないことが確認された ($p_s < 0.024$)。そのため、まずフリードマン検定を行った結果、主効果が確認できた ($\chi^2(4) = 39.832, p < 0.01, \eta^2 = 0.553$)。ホルムの方法を用いて有意水準を調整したウィルコクソンの符号付順位和検定により、多重比較を行った。その結果、フット

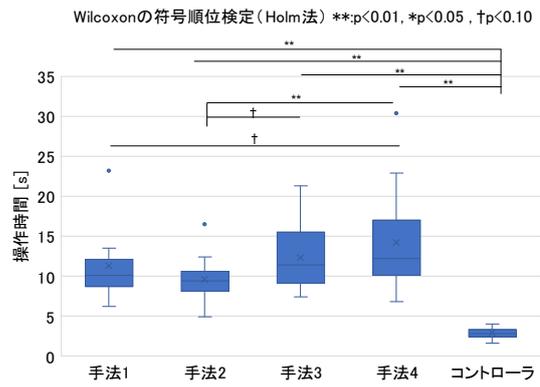


図 14 操作時間

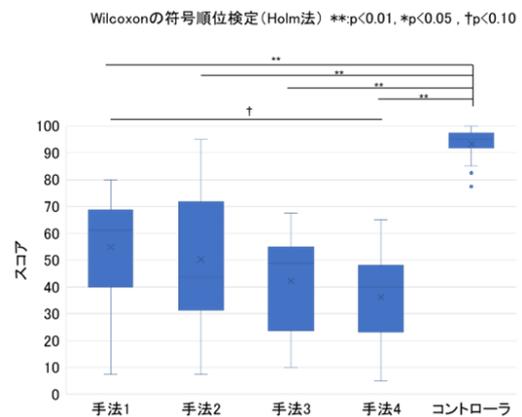


図 15 SUS

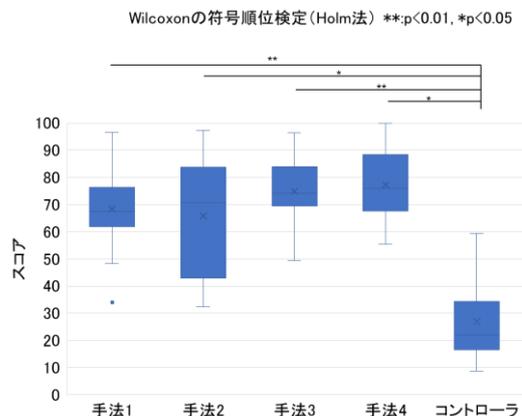


図 16 NASA-TLX

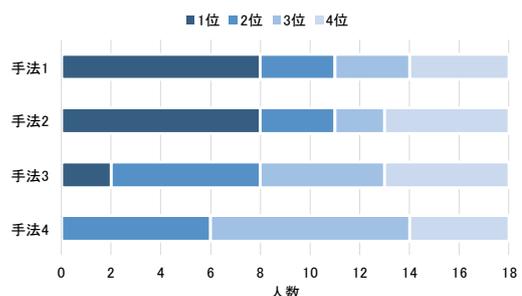


図 17 順位付け

トジェスチャの全手法とコントローラ間でその差が有意であった(各手法間で $ps < 0.01$)。一方で、フットジェスチャ間での有意差は認められなかった。しかし、下位尺度の作業成績において、手法2と手法4($p = 0.027$)で有意差が認められた。

最後に、フットジェスチャ手法での順位付けの結果を図17に示す。結果より、フットジェスチャ間では手法1と手法2が多く好まれていることがわかる。

5.5 考察

実験2の結果を通じて、フットジェスチャ間で全体的に高成績な項目が多かったのは手法1と手法2であった。手法1に関しては、SUSにおける「この入力手法における動作と操作の組み合わせは統一感があると思った」の項目で高評価だった。これは「水平方向と鉛直方向の操作に使われているジェスチャの種類が共通しているため直観的だった」というコメントも得られたことから、学習容易性や直観的な操作に繋がったと考えられる。

手法2は操作時間や掴みなおし、NASA TLXにおける作業成績の項目で高評価となった。この結果から、手法2は作業の効率が良い手法であることが考えられる。

全体的なフットジェスチャの評価としては、本実験では手やコントローラ向けの実験タスクを用いたため、足では精度や疲労感において低成績であった。

6. 全体考察

実験1、実験2を通じて、フットジェスチャ間では手法2が多く項目で優れていた。しかし、実験1のような選択のみを想定した場合に、手法2の次に評価の高かった手法4を用いることも検討できる。また、実験2のようなドラッグ&ドロップを想定する場合に、評価の高かった手法1を用いることも検討できる。

実験1、実験2ともに足とコントローラでは精度や疲労感に差が見られたため、足を用いて操作を行う際には、ターゲットの配置の工夫や位置決め支援が必要となると考えられる。例えば、図1に示したようなウィンドウのような大きな物体を移動させる場合に使用できる可能性がある。これは実験1の結果からも自身の近くにある大きな物体であれば、コントローラの操作と同等に操作できる可能性があるからである。図18はフットジェスチャを用いて、MR空間でウィンドウを動かしている例である。このように用いることで、キーボード入力やマウス操作を行っている場合でも、ウィンドウを動かすことが可能となる。

また、キーボード入力やマウス操作のような細かい作業をしたい場合でも、エリアカーソルのようなポインティングの位置決め支援を行うことで実現できる可能性がある。

7. むすび

本研究ではVR空間における3Dインタラクションにフ

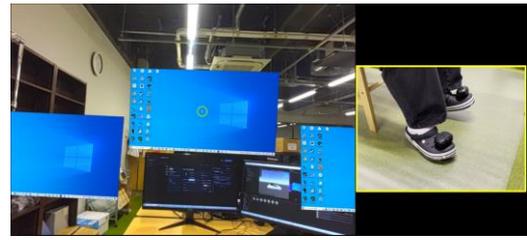


図18 MR空間でウィンドウを動かす様子

ットジェスチャを割り当て、特性や精度の分析を行った。まず、3Dインタラクションとして、選択とドラッグ&ドロップを対象とし、操作にフットジェスチャを割り当てた4種類の手法を整理した。実験1では、VR空間での選択に各手法を利用した場合のフィットの法則による精度を評価した。実験2ではドラッグ&ドロップの評価を行った。実験結果から、選択に適した操作として「左右スライド」、「前後スライド」、「内転・外転」を用いた手法2と手法4が適していることが示唆された。また、ドラッグ&ドロップには、水平方向と鉛直方向の操作に割り当てたジェスチャの種類が共通している手法1と手法2が適していることが示唆された。

今後の展望としては、細かい作業をしたい場合にエリアカーソルのようなポインティングの位置決め支援を実現することやマルチタスクに活用できるのかを検証していく。

参考文献

- [1] Apple Vision Pro – Apple <https://www.apple.com/jp/apple-vision-pro/> (最終閲覧日: 2024年11月12日)
- [2] 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.
- [3] T. Wan *et al.*: “Exploration of Foot-based Text Entry Techniques for Virtual Reality Environments,” Proc. CHI, pp. 1 - 17, 2024.
- [4] J. v. Willich *et al.*: “Podoportation: Foot-Based Locomotion in Virtual Reality,” Proc. CHI, pp. 1 - 14, 2020.
- [5] 市川佑, 他: “奥行き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.
- [6] 樋口雄大, 他: “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--”, ヒューマンインタフェースシンポジウム2023論文集, 6T-D1 2023.
- [7] C. McKenzie and A. Glazier, Designing Screen Interfaces for VR (Google I/O '17), May 2017, [online] <https://www.youtube.com/watch?v=ES9jArHRFHQ>. (最終閲覧日: 2024年11月15日)
- [8] P. M. Fitts: “The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement.” Journal of experimental psychology, Vol. 47, No. 6, pp. 381 - 391, 1954.
- [9] Y. Y. Qian *et al.*: “The eyes don't have it: an empirical comparison of head-based and eye-based selection in virtual reality.” Proc. the 5th Symposium on Spatial User Interaction (SUI '17), pp.91 - 98, 2017.
- [10] P. Monteiro *et al.*: “Evaluation of Hands-Free VR Interaction Methods During a Fitts' Task: Efficiency and Effectiveness,” in IEEE Access, vol. 11, pp. 70898 - 70911, 2023.
- [11] D. Yu *et al.*: “Gaze-Supported 3D Object Manipulation in Virtual Reality.” Proc. CHI '21, Article. 734, pp. 1 - 13. 2021.