



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(4)

ー 配置許容誤差がドラッグ&ドロップ操作に及ぼす影響 ー

黒瀬佳那¹⁾, 橋口哲志²⁾, 柴田史久¹⁾, 木村朝子¹⁾

1) 立命館大学 情報理工学研究科 (〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150)

2) 立命館大学 デザイン・アート学部 (〒603-8577 京都市北区等持院北町 56-1)

概要: 足を用いた入力(フットジェスチャ)は, 従来手に割り当てられていた操作の一部を代替することで操作負荷の分散や, 手が他の作業に従事している際の補助的な入力手段に活用できる可能性がある. 本研究では特に, VR 空間におけるオブジェクトのドラッグ&ドロップ操作を対象とし, オブジェクトを指定位置に配置する際の配置許容誤差を複数設定し配置が完了するまでの手法ごとの操作特性を, 操作時間および主観的評価をもとに比較した. 結果, 許容誤差の増加に伴い全手法で操作時間が短縮し, 特にフットジェスチャでは段階的な短縮が認められた. また, NASA-RTLX による作業負荷は低下する傾向が示された.

キーワード: VR, フットジェスチャ, 3D インタラクション, 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り, その操作に対応した多様な UI 設計が求められている. 身体動作を入力方法とした研究では, ハンドジェスチャが多く検討されているが, 手は他の動作に利用されている状況も考えられる. 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進められている. それらはハンズフリーで利用でき, 複数の足関節・脚部動作を入力に割り当てられる利点があるという利点がある[1].

そこで, VR/MR 空間におけるオブジェクトのドラッグ&ドロップ操作を対象とし, フットジェスチャを用いた操作手法を検討する. 本研究では先行研究[2]で高い評価を得たフットジェスチャ 2 手法において, 操作時間を短縮するための設計要因としてオブジェクトを指定位置に配置する際の配置許容誤差を複数設定し, 各条件における操作特性を分析・比較する.

2. インタフェースの設計

VR/MR 空間におけるドラッグ&ドロップに必要な操作として, 水平・鉛直・奥行き方向の 3 方向の操作および把持・解放の操作が考えられる.

本研究では 3 方向の操作について先行研究[2]で高い評価を得た 2 手法を採用し(図 1), 同様に決定の操作に「背

屈」を割り当てた. HMD (VIVE XR Elite) を用いて VR 空間を体験し, 両足の位置・姿勢の検出には VIVE Ultimate Tracker を使用する. 操作姿勢は座位で実施し, 右足で 3 方向の操作を行い, 左足で把持・解放の操作を行う(図 2). 先行研究[2]に示す方法でポインティングやフットジェス

	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

図 1 操作とフットジェスチャの組み合わせ



図 2 システム構成と入力姿勢

チャからカーソル位置への変換を行う。なお奥行き方向の操作については、VR 空間上での奥行き方向の最大変化量がタスクの前後方向の最大出現範囲である 0.96m となるように倍率を決定する。

3. 実験

3.1 実験目的

本実験は、フットジェスチャを用いて操作対象であるオブジェクトを指定位置に配置する際に、配置許容誤差が及ぼす影響を調査する。具体的には 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をもとに複数の配置許容誤差における各手法の振る舞いを評価する。

3.2 実験設計

3.2.1 配置許容誤差条件

本実験では、操作対象オブジェクトを配置した際に、その中心と目標位置の中心との 3 次元ユークリッド距離が閾値以内であれば配置成功と判定する。この閾値を本稿では配置許容誤差と呼ぶ。

本研究で条件として設定した値は、先行研究 [3] の全参加者・全試行について、操作中の各時点における目標位置までの距離を手法別に集計した結果 (図 3) をもとに算出した。具体的には距離 0m 側から滞在時間割合を累積し、累積滞在時間が 25%および 50%に達する距離を算出した。手法 1 では累積 25%点が 0.050m, 50%点が 0.125m, 手法 2 ではそれぞれ 0.050m, 0.075m であった。

これを参考に、配置許容誤差条件は基準である 0.025m に 0.050m, 0.075m, 0.125m を加えた 4 条件とした。なお本研究の主対象はフットジェスチャであるため、条件設定には手法 1 および手法 2 の分布を用いた。

3.2.2 実験タスク

タスク設計にあたっては、Yu ら[4]の VR 空間における視線および手入力を用いた 3D オブジェクト操作タスクを参考にした。具体的には、目標位置を視点から距離 1m の位置に設定し、視野角 30° 以内でランダムに提示した。これにより、オブジェクトを掴んでから目標位置を探索する時間の影響を小さくした。

操作対象オブジェクトは、目標位置を基準として 3 次元空間を $x \cdot y \cdot z$ 軸で分割した 8 象限のうち、1 象限をランダムに選択し、その象限内で目標位置から指定距離だけ離れた位置に生成した (図 4)。指定距離は、先行研究[3]と同条件で実施した予備調査を参考に、0.48m とした。なお操作対象オブジェクトおよび目標位置は関連研究[5]を参考に 0.128m とした。

実験参加者は、フットジェスチャ 2 手法およびコントローラの計 3 手法について、8 条件 (生成される象限) $\times$ 2 週の計 16 試行を、配置許容誤差条件である 4 条件分を行った。入力手法の実施順序は、ラテン方格法を用いてカウンターバランスをとった。各入力手法内での配置許容誤差条件の実施順序はランダムで生成した後、実施順序に偏りが少ないものを採用した。

3.2.3 評価方法

評価項目として各試行の操作時間を取得した他、System Usability Scale (SUS) による主観的な使いやすさの評価を行う。本実験で用いた質問項目を表 1 に示す。質問項目は SUS を基に一部改変したものを用いた (以降「改変 SUS」)。また、NASA Raw Task Load Index (NASA-RTLX) を用いた主観的メンタルワークロードの評価を行う。

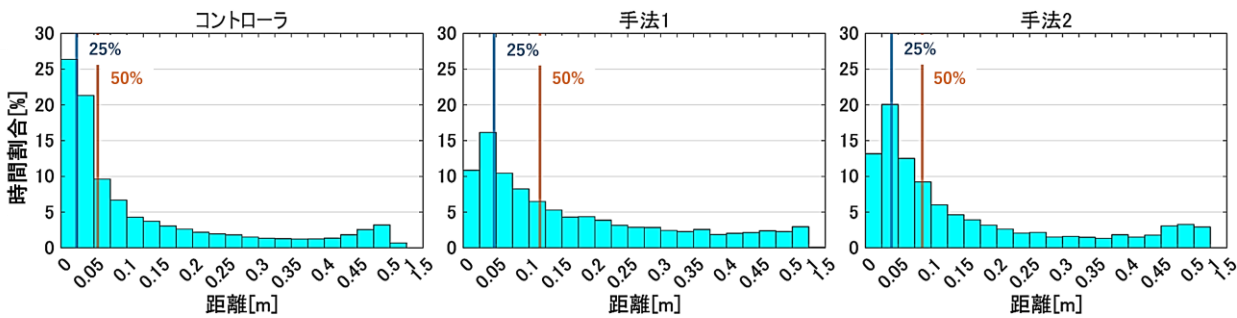


図 3 操作開始から終了までの各距離区間における滞在時間割合

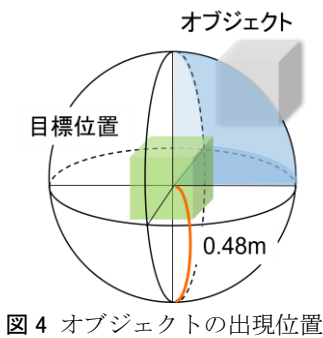


図 4 オブジェクトの出現位置

表 1 改変 SUS の質問項目

頻繁に使用したいと思うか
必要以上に複雑だと感じたか
使いやすいと思ったか
使用に技術的なサポート (ブレ補正の追加など) が 必要だと思うか
機能がうまく統合されていると感じたか
一貫性がないと思ったか
使い方はすぐに習得できると思うか
非常に使いづらいつと感じたか
自信を持って使えたか
事前に多くのことを学ぶ必要があると感じたか

3.3 実験手順

実験参加者は 21～32 歳の 30 名（うち女性 2 名）であり、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) 入力手法を決定し、練習を行わせる
- (3) 配置許容誤差条件を決定
- (4) オブジェクトを出現させる象限を決定した後、その象限内でランダムに配置し、タスクを行わせる
- (5) (4) を 8 象限×2 周 = 16 試行繰り返す
- (6) 改変 SUS, NASA-RTLX に回答させる
- (7) 残りの配置許容誤差条件についても (3) ～ (6) を繰り返す
- (8) 残りの入力手法についても (2) ～ (7) を繰り返す

3.4 実験結果

各項目について ShapiroWilk 検定を行い、正規性が確認された項目は反復測定 ANOVA、確認されなかった項目については、Aligned Rank Transform ANOVA (ART-ANOVA) を適用した。ART-ANOVA は混合効果モデルに基づき、Kenward-Roger 法による自由度近似を用いて解析した。交互作用が有意であった場合は、ART-C による多重比較を行い、Holm 法により多重比較補正を行った。

図 5 に操作時間について ART-ANOVA を実施した結果を示す。手法の主効果 ($F(2, 319) = 415.28, p < .001$)、配置許容誤差の主効果 ($F(3, 319) = 128.85, p < .001$)、および交互作用 ($F(6, 319) = 16.06, p < .001$) が有意であった。多重比較の結果、コントローラでは 0.025m 条件が他 3 条件より有意に長く（全て $p < .001$ ）、0.050m 条件が 0.125m 条件より有意に長かった ($p = .014$)。手法 1 では全ての配置許容誤差条件の間で有意差が認められ、0.025m, 0.050m, 0.075m, 0.125m の順に操作時間が短縮した（全て $p < .05$ ）。手法 2 においても同様に、全ての配置許容誤差条件の間で有意差が認められ、配置許容誤差の増加に伴って操作時間が段階的に短縮した（全て $p < .05$ ）。

次に改変 SUS の総合スコアについて反復測定 ANOVA を実施した結果を図 6 に示す。手法の主効果が有意であった ($F(2, 58) = 48.23, p < .001, \eta^2_G = .431$) ため、多重比較を行った結果、コントローラは手法 1、手法 2 より有意に高いスコアを示したが、手法 1 と手法 2 の差は認められなかった。また、配置許容誤差の主効果も有意であった ($F(2.13, 61.8) = 33.40, p < .001, \eta^2_G = .099$)。多重比較の結果、0.025m 条件は他 3 条件より有意に低いスコアを示した。手法と配置許容誤差の交互作用は有意ではなかった

($F(3.82, 110.9) = 2.43, p = .054$)。

NASA-RTLX の各尺度に ShapiroWilk 検定を行った結果、努力尺度のみ正規性が確認された。そのため努力尺度に反復測定 ANOVA、他の尺度に ART-ANOVA を行った結果、配置許容誤差の主効果は、知的要求 ($F(3, 319) = 18.74, p < .001$)、身体的要求 ($F(3, 319) = 22.15, p < .001$)、タイムプレッシャー ($F(3, 319) = 12.48, p < .001$)、努力 ($F(2.29, 66.41) = 41.63, p < .001$)、フラストレーション ($F(3, 319) = 23.99, p < .001$)、成績 ($F(3, 319) = 14.73, p < .001$)、および総合スコア ($F(3, 319) = 29.11, p < .001$) の全てにおいて認められた。また手法と配置許容誤差の交互作用は、知的要求 ($F(6, 319) = 2.71, p = .014$)、努力 ($F(6, 174) = 4.19, p < .001$)、フラストレーション ($F(6, 319) = 2.60, p = .018$)、および総合スコア ($F(6, 319) = 2.54, p = .021$) で認められた。交互作用が有意であったこれらの下位尺度および総合スコアは、各手法内で配置許容誤差条件間の比較を行った。

総合スコアの結果を図 7 に示す。コントローラは 0.025m 条件が 0.075m 条件 ($p = .047$)、0.125m 条件 ($p = .031$) より有意に高く、手法 1 は 0.025m 条件が 0.075m 条件 ($p = .010$) および 0.125m 条件 ($p < .001$) より有意に高かった。手法 2 では 0.025m 条件が 0.050m 条件 ($p = .019$)、0.075m 条件 ($p < .001$)、0.125m 条件 ($p < .001$) より有意に高かった。また、0.050m 条件も 0.125m 条件より有意に高かった ($p = .032$)。

次に知的要求の結果を図 8 に示す。コントローラにおいて配置許容誤差条件間の有意差は認められなかった一方、手法 1 では 0.025m 条件と 0.125m 条件の間に有意差が認められ ($p = .007$)、手法 2 では 0.025m 条件と 0.050m 条件 ($p = .017$)、0.075m 条件 ($p = .001$)、0.125m 条件 ($p < .001$) の間に有意差が認められた。

次に努力の結果を図 9 に示す。コントローラでは 0.025m 条件は 0.050m 条件 ($p = .006$)、0.075m 条件 ($p = .005$)、0.125m 条件 ($p = .007$) より有意に高かったが、0.050m 条件以降の差は認められなかった。手法 1 では 0.025m が 0.050m 条件 ($p = .011$)、0.075m 条件 ($p = .007$)、0.125m 条件 ($p < .001$) より有意に高く、0.050m 条件は 0.125m 条件より有意に高かった ($p = .005$)。手法 2 では、0.025m 条件が他 3 条件より有意に高かった（全て $p < .001$ ）。0.050m 条件も 0.075m 条件 ($p = .035$) および 0.125m 条件 ($p < .001$) より有意に高く、0.075m 条件も 0.125m 条件より有意に高かった ($p = .035$)。

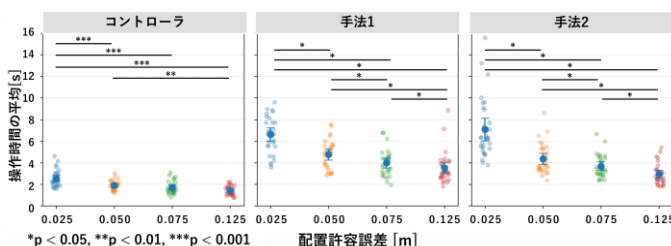


図 5 操作時間の平均（誤差範囲は 95%信頼区間）

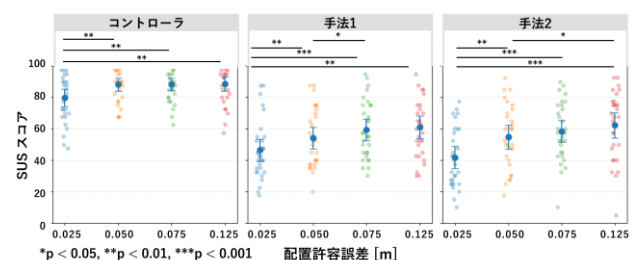


図 6 改変 SUS 総合スコア（誤差範囲は 95%信頼区間）

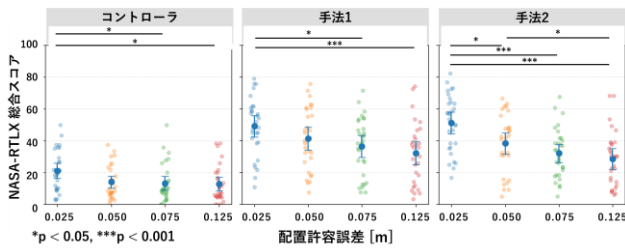


図7 NASA-RTLX 総合スコア（誤差範囲は95%信頼区間）

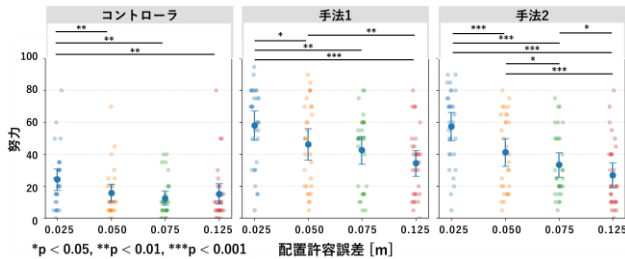


図9 努力（誤差範囲は95%信頼区間）

図10に示すフラストレーションでは、コントローラで0.025m条件が0.125m条件より有意に高く($p = .011$)、手法1では0.025m条件が0.050m条件($p = .047$)、0.075m条件($p = .010$)、0.125m条件($p < .001$)より有意に高かった。さらに手法2では0.025m条件が0.075m条件($p = .001$)および0.125m条件($p < .001$)より有意に高く、0.050m条件も0.125m条件より有意に高かった($p = .023$)。

3.5 考察

配置許容誤差を変えることで、いずれの手法でも操作時間に有意な差が見られた。コントローラでは0.050m以上で操作時間の短縮が限定的となった一方、フットジェスチャ2手法では0.125mまで段階的な短縮が認められた。フットジェスチャは細かい位置調整が難しく、許容誤差の拡大による調整時間の削減効果がより大きく働き0.075m条件および0.125m条件でも短縮が継続した可能性がある。

次に改変SUSの総合スコアについて、配置許容誤差を0.025mから0.050m以上へ増加させることでスコアが向上することが示された。また、NASA-RTLXの結果から、各尺度および総合スコアにおいて配置許容誤差の主効果が認められた。これらの結果より、配置許容誤差の増加に伴い利用者の主観的な作業負担が低下する傾向が示された。また、知的要求、努力、フラストレーション、および総合スコアでは手法と配置許容誤差の交互作用が有意であった。この結果より、一部の尺度および総合スコアについて、配置許容誤差の影響が手法によって異なることが示唆される。特に手法2ではコントローラ、手法1に比べ多くの配置許容誤差条件の間で有意差が認められ、配置許容誤差の増加に応じた主観的な作業負担の低減効果が段階的に表れる可能性が考えられる。

4. まとめ

本研究では、フットジェスチャを用いてドラッグ&ドロップを行う際に、配置許容誤差が操作に及ぼす影響を調査した。配置許容誤差を4条件設定し、コントローラ、

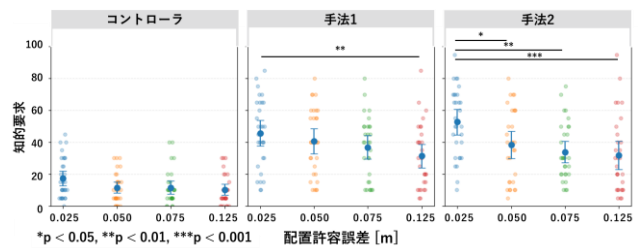


図8 知的要求（誤差範囲は95%信頼区間）

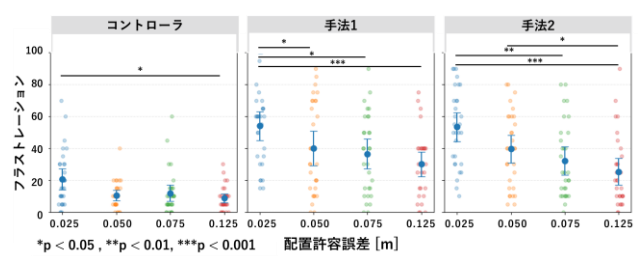


図10 フラストレーション（誤差範囲は95%信頼区間）

手法1、手法2の3手法を比較した結果、手法によって異なる傾向が確認された。

まず操作時間（客観評価）について、コントローラでは一部の配置許容誤差条件の間のみで有意差が確認された一方で、手法1および手法2では全ての条件間で有意差が確認された。このことからコントローラと比較して、フットジェスチャ2手法は、配置許容誤差を緩和することによる操作時間への影響が大きいと考えられる。

また、改変SUSおよびNASA-RTLXにおいては、全体的に配置許容誤差の増加に伴う作業負担の低減が確認された。特に手法2では、NASA-RTLXの複数の尺度および総合スコアにおいて、許容誤差の増加に応じた段階的な作業負担の低減が確認された。

以上より本研究の条件下において配置許容誤差の緩和は、3手法の中でもフットジェスチャ2手法の操作時間を短縮した。また主観的評価の面でもフットジェスチャ、特に手法2において複数のNASA-RTLXの下位尺度において段階的な負担の低減が認められた。

参考文献

- [1] 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”, 情報処理学会全国大会講演論文集, Vol. 2019, No. 1, pp. 271 – 272, 2019.
- [2] 樋口雄大, 他: “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・考察”, HI学会論文誌, Vol. 27, No. 4, pp. 302 – 312, 2025.
- [3] 黒瀬佳那, 他: “VR/MR 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(3) - ドラッグ&ドロップ操作における操作特性分析 -”, 情報処理学会第88回全国大会発表論文集, pp. 4-175 - 4-176, 2026.
- [4] D. Yu et al., “Gaze-Supported 3D Object Manipulation in Virtual Reality,” Proc. CHI '21, Article 734, pp. 1 - 13, 2021.
- [5] 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.