

VR環境におけるレイキャストによるオブジェクトの 選択成功率推定ツールの提案

奥野 達也* 清水 春翔* 笠原 暢仁* 本間 大一優* 山中 祥太† 宮下 芳明*

概要. XR デバイスの普及により三次元空間におけるインタラクションが一般化する中、UI 開発者はより優れたユーザ体験を実現するためにユーザビリティへの配慮が強く求められている。HCI 分野では、この課題解決のため古くからポインティング研究が行われ、三次元空間を対象とした研究も大きく進展している。しかし、研究が進む一方で、そこで得られた指針を実際の開発者が UI 改善のサイクルに直接活用するためには、実用的なツールを提供することが求められる。本研究は、VR 開発におけるこの「研究と開発のギャップ」を埋めることを目指し、開発ツール内でオブジェクトの選択成功率を推定するシステムを提案する。本稿ではその理論の検証を行い、ツールの機能について説明する。また、VR 開発者に本ツールを試用してもらい、そのフィードバックから有用性を検証する。

1 はじめに

仮想現実 (VR) 技術は、従来の 2D ディスプレイでは得られない高いリアリティとインタラクティブ性を提供する。VR 環境において、ユーザがユーザインタフェース (UI) 要素をコントローラーで選択する動作は、あらゆるインタラクションの基礎となる最も重要な操作の一つである。

VR におけるポインティングは、奥行き方向のターゲット配置の定義など、2D 環境にはない要因によってポインティング操作が複雑化することが指摘されている [1]。特に、ユーザから遠くに、あるいは小さく表示されるターゲットを選択する際の難易度は著しく上昇し、ユーザの操作ミスやフラストレーション、ひいては VR 体験全体の質の低下に繋がりがかねない。したがって、VR コンテンツの開発者やデザイナーが、UI 要素がどの程度選択しやすいかを定量的に評価できれば、VR 体験を向上させられる可能性がある。

本稿では、この課題に応えるため、VR 環境におけるポインティング操作の成功率を推定する数理モデルを構築し、そのモデルを用いた VR における UI 分析ツールの検討を行う。このモデルは、ポインティング操作時間の予測で広く知られるフィッツの法則 [6] を補完し、成功率に焦点を当てるものである。成功率推定には、VR 環境に特化した終点分布モデルである EDModel [23] の知見を用いる。最終的に、2D UI 分析ツール Tappy [25] のように実用的な形で提供することで、HCI 分野の理論的知見の VR コンテンツ開発の現場への応用を実現する。

2 関連研究

2.1 VR 空間でのポインティング

VR 空間でのポインティングには様々な選択手法が存在するが、特にコントローラーからレイを伸ばして対象を選択するレイキャストは、少ない身体的負荷で遠方のオブジェクトを操作できるため、広く採用されている。しかし、この手法はターゲットが小さい、または遠い場合に精度が低下する課題を抱えている [2]。この課題を解決するため、ポインティングを補助する様々なインタラクション技術 [4, 16] が提案されている。一方、ユーザのポインティング行動をモデル化し、パフォーマンスを理解・予測するアプローチも重要視されており [12]、多くの研究が Fitts の法則 [6] を用いて移動時間推定を行っている。

2.2 ポインティングの成功率

古くは Crossman や Welford が 1D タスクにおいて終点分布がガウス分布に従うことを示した [5, 17]。その後の研究では、終点分布が二変量ガウス分布に従うと仮定し、ポインティングの成功率を求め、難易度 (ID) に変換した報告 [7] や、有効ターゲット幅に基づいたマウスのポインティングにおけるエラー率モデルを構築し、そのモデルが 1 次元のバー形状のターゲットと 2 次元の円形ターゲットの両方に適用可能であることを示した報告がある [18, 19]。Bi らは指によるタップ座標の分布が、ターゲットの大きさに応じて変化する分布と、指の太さや身体的な操作精度に起因する絶対的な分布、という 2 つの独立したガウス分布の重ね合わせで説明できるという二重分布仮説 [3] に基づく Dual Gaussian Distribution Model を提案した [4]。このモデルを 3 次元や、移動ターゲットなど、様々なターゲット形状や条件に

Copyright is held by the author(s).

* 明治大学

† LINE ヤフー株式会社

応用したモデルが提案されている [8–10, 15, 22, 24].

その中でも EDModel [23] は, VR 環境におけるポインティング終点分布に特化したモデルである. このモデルは, ターゲットの幅 (W), 移動距離 (A), そして VR 特有の要素である奥行き (Z) が終点分布にどう影響するかを調査した. その結果, VR における終点分布もまた, 二変量ガウス分布で非常によく近似できることを示し, 各パラメータ (W, A) から分布の形状 (平均と共分散) を予測する回帰式を導出した. 分布の形状は回帰式を用いて式 (1) に示すような二変量ガウス分布に従う.

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_x \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

予測した分布の形状から, ターゲット D の選択成功率は式 (2) で求めることができる.

$$y = \iint_D \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\left(\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\right) dx dy \quad (2)$$

しかし, 先行研究 [23] では, モデルを構成する複数のパラメータの組み合わせによって, 成功率の推定精度がどのように変化するかという点についての検証がなされていない. そのため, 本研究では異なるパラメータを持つモデルを用いて終点分布を予測し, 成功率の推定精度を比較検討する.

2.3 UI デザイン支援ツール

2D 平面上の UI デザインにおいては, 定量的な予測モデルに基づく実用的な支援ツールの開発が活発に行われている. Tappy [21, 25] は, Dual Gaussian Distribution Model を理論的基盤とし, スマートフォン用のウェブページやアプリケーションにおける UI 要素のタップ成功率を推定するツール群である. 本ツールは, テキストの周囲領域がタップイベントを受け付けているかなど, 外観からの判断が困難なタップ可能領域を正確に識別し, その成功率を表示する. Tappy を用いた評価によって, 開発者やデザイナーが想定よりもタップ成功率の低い UI 要素や実装上の誤りを発見するきっかけとなり, デザインの具体的な修正や, 定量的指標に基づいてチームでの意思決定を促進するなど, その有効性が示されている. また, Tappy をブラウザ上の拡張機能として実装した Tap Analyzer [11] も提供されている.

3 推定モデル構築のためのデータ収集実験

本研究の目的は, Tappy [25] を VR 上に拡張した成功率推定ツールの実現である. そこで, 既存の EDModel [23] を再検証するとともに, 成功率推定に有効な新たなパラメータを用いた代替モデルを検討するためのユーザ実験を行う.

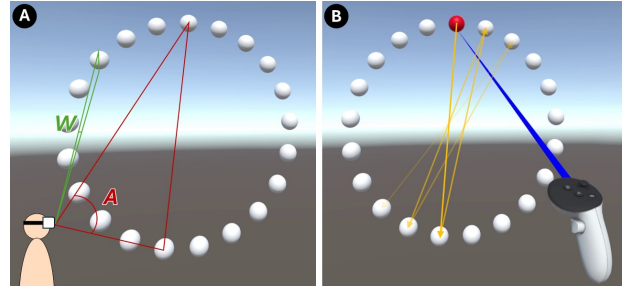


図 1. (A) ターゲットの幅 W , 移動距離 A の角度形式. (B) 被験者は矢印で示された経路に従って, 順次ターゲットを選択した.

3.1 参加者・装置

18歳から24歳 (平均:21.0歳) の大学生18名 (女性2名, 男性16名) が実験に参加した. 実験には Meta Quest 3 と標準の Touch Plus コントローラーを使用し, 実験プログラムは Unity で作成された. レイキャスティング手法を用い, トリガーにはコントローラーのボタンを使用した.

3.2 実験タスク

本実験では, ISO9241-411 の多方向タッピング課題 [14] のように, リング状に配置された21個の球状ターゲットを次々に選択するポインティングタスクを実施した (図1A). 被験者は, 図1Bに示された順序に従ってターゲットを選択した. 選択が完了すると短い音が鳴り, 新たな目標ターゲットがハイライトされて次の試行が開始された. その後, 被験者はポインターを新たな目標ターゲットへ移動させる. 先行研究 [23] にならって, 選択の正誤を示すフィードバックは提供されなかった.

本実験では, ターゲット幅 W と移動距離 A を変化させた (図1A参照). これら2つの変数は, 角度形式で記述した [12, 13]. すなわち, W と A それぞれのなす角を各被験者の視点を基準に計算した.

また, 本研究では終点の誤差を物理的な距離ではなく角度を基準とした座標系で評価する. 本来, 3次元空間上の一点は, 被験者からの距離 r と2つの角度 (θ, ϕ) を用いた球面座標系で表される. しかし, コントローラーから発せられるレイは無数の長さを持つと見なせるため, 距離 r の要素は無視できる. これにより, 終点の誤差の表現を, 2つの角度成分のみを用いた2次元座標へと単純化できる.

そこで本実験では, 終点 p を2次元の角度座標 $p = (x, y)$ で定義した. ここで x は, ポインティングの移動方向 (開始ターゲットから目標ターゲットへの直線) に平行な角度の誤差, y はその移動方向に対して垂直な角度の誤差を表す. なお, 座標軸の原点は目標ターゲットの中心に設定しており, x と y は共に負の値を取り得る.

3.3 設計と手順

本研究では、2つの要因（ターゲットの幅 W と移動距離 A ）を用いた 8×3 の被験者内計画を採用した。ターゲットの幅 W は 1° から 4.5° まで 0.5° 刻みの8段階、移動距離 A は 30° 、 35° 、 40° の3段階とした。これらの値は先行研究 [23] および予備実験によって決定され、極端な条件下 ($W=4.5^\circ$ かつ $A=30^\circ$) でも配置されたリング上のターゲットが互いに重ならないことを確認した。被験者と各ターゲット間の距離は一定値 (100m) とした。ターゲットの幅 W と移動距離 A の組み合わせの提示順序は、被験者ごとにランダムであった。先行研究 [23] にならない、各 W と A の組み合わせ (1つのリング) において、最初の試行は破棄され、20回の試行が分析対象として残った。最終的に、この実験から合計8640個のエンドポイント ($8W \times 3A \times 18人 \times 20$ 試行) を収集した。

被験者は初めに VR デバイスと選択タスクについての説明を受けた。次に、VR ヘッドセットを装着し、正面方向のキャリブレーションの後、練習試行を実施した。その後、本試行へ進んだ。実験の後に、被験者にアンケートへの記入を依頼し、年齢・性別・利き手の情報を収集した。

本実験では、各被験者が自身の快適なペースで各タスクを完了できるような選択行動を記録したいと考えたため、自然なスピードでターゲットを選択するように指示した。被験者には、試行間に小休憩を自由に取ることができると伝えた。

4 結果

4.1 データスクリーニングと正規性検定

実験において、8640 試行のデータが得られた。先行研究 [23] に倣い、各被験者の各ターゲット条件において、平均移動時間および各試行の最初のクリック座標が各軸の中心から3標準偏差以上離れた外れ値を除去した結果、313 試行が除外された。残ったデータを被験者ごと、条件ごとにグループ分けして分析した。

すべての終点座標は、コルモゴロフ-スミルノフ検定により、 x 軸および y 軸の両方において分布の正規性が確認された ($\alpha = 0.05$)。次に、各集合に対して、 x 軸と y 軸の両方で、最尤推定を用いてガウス分布の平均 μ と標準偏差 σ を推定した。2軸間の相関 ρ も計算した。したがって、5つの従属変数 μ_x 、 σ_x 、 μ_y 、 σ_y 、および ρ を用いて、平均ベクトル μ と共分散行列 Σ を計算した (式 (1) 参考)。

4.2 終点分布

5つの従属変数に対する反復測定分散分析 (RM-ANOVA) を行った。自由度は Greenhouse-Geisser 法により調整した。 W は μ_x ($F_{2,81} = 9.95$, $p <$

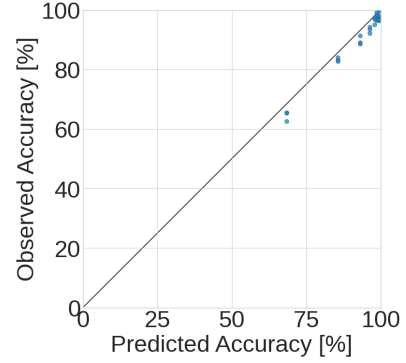


図 2. 球体ターゲットの観測成功率と、実験より導出した終点分布を用いて推定された成功率

0.001 , $\eta_p^2 = 0.369$) と σ_x ($F_{6,91} = 56.30$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.768$), σ_y ($F_{2,94} = 40.90$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.706$) に有意な主効果を示した。その他の主効果や交互作用は見られなかった。

従属変数に主効果をもつ要因について線形回帰分析を実施した。回帰分析の結果、 W と μ_x ($R^2 = 0.73$), W と σ_x ($R^2 = 0.98$), そして W と σ_y ($R^2 = 0.89$) の間に線形関係が示された。

この結果に基づき以下の二変量ガウス分布を作成した。

$$\mu = \begin{bmatrix} eW + f \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \Sigma = \begin{bmatrix} (aW + b)^2 & 0 \\ 0 & (cW + d)^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここでそれぞれの定数は回帰の結果より $a = 0.1102$, $b = 0.23130$, $c = 0.0715$, $d = 0.2311$, $e = -0.0623$, $f = -0.0846$ である。

4.3 成功率推定

次に、本実験より導出された二変量ガウス分布 (式 (3)) を使用して、式 (2) に基づき各条件のターゲット選択の成功率を推定した。推定結果と観測値を図 2 に示す。観測された成功率と推定された成功率の最も大きい差は 5.82% ($W = 1.0^\circ$, $A = 30^\circ$) で、平均絶対誤差 (MAE) は 2.35% , R^2 は 0.987 であった。LOOCV (leave-one-out cross-validation) を行うと、 $MAE = 2.39\%$, $R^2 = 0.985$ であった。

5 追加分析

本研究で提案するモデルの応用性と実用性を探るため、3つの主要なパラメータに関する追加分析を実施する。ここでの目的は、成功率推定ツールに適用した時の計算コストや使いやすさといった実用的な観点から、最適なモデル構成を明らかにすることにある。具体的には、以下の3つの観点からモデルの妥当性を検証する。

距離 (A) の使用。 第一に、ターゲットまでの距離

表 1. 追加分析における各モデルの成功率推定精度の比較と LOOCV による汎化性能の評価

モデル	学習データ		LOOCV		AIC
	MAE (%)	R^2	MAE (%)	R^2	
ベースライン	2.354	0.987	2.394	0.985	82.50
距離パラメータ (A) あり	2.352	0.985	2.405	0.982	85.57
オフセット単純化	3.907	0.982	3.933	0.982	90.01
ワールド座標系	3.827	0.989	3.871	0.988	78.91

A を使用するモデルの妥当性を検証する。ハンドベースのレイキャスティングを用いた先行研究 [23] では、その終点分布予測モデルに距離 A が含まれていた。しかし、実験のタスクにおいては、RM-ANOVA の結果からその影響は限定的だった。また、距離を使用しないモデルの精度が十分であった場合、ターゲットのサイズのみを考慮し、成功率推定が行える。その結果、開発者はポインターとターゲット間の距離を考慮せずにツールを使用でき、使いやすさが向上する。そこで、距離を含むモデルと含まないモデルの性能を比較し、A を除外しても推定精度を損なうことなくモデルの簡潔性を高められるかを検討する。

オフセット (μ_x) の単純化。 第二に、中心からの誤差の平均 μ_x を 0 と仮定するモデルの妥当性を評価する。ポインティングの誤差に関するフィッツの法則に基づいた確率的モデル [14] などの多くの基本モデルは、ユーザは常にターゲットの中心を狙うと仮定し、中心からの誤差平均 (μ_x, μ_y) を 0 としている。本研究では、この仮定に基づくモデル（「 μ_x なし」モデル）と、ターゲット幅 W に応じて誤差の平均が動的に変動するモデル（「 μ_x あり」モデル）の性能を比較する。この比較を通じ、 μ_x を導入しない単純なモデルが実用上十分であることを検証する。

ワールド座標系の採用。 第三に、進行方向を基準とした座標系（進行方向を x, その垂直方向を y）から、Unity 標準のワールド座標系へ置き換えた場合のモデルの有効性を検証する。進行方向基準の座標系は、先行研究 [23] でも使用されており、運動の解析に適していると考えられる。一方、ワールド座標系は、コントローラーのボタン押下時、力が加わって生じるポインターのズレなど、実世界における重力や慣性の影響を含めてモデル化できる可能性がある。加えて、ワールド座標系での成功率推定が可能であれば、ポインターの進行方向やターゲットの向きといった変動要素を考慮する必要がなくなり、ターゲットサイズのみで成功率を計算できるようになる。これは、応用ツールを開発する上で、計算コストを削減し、実装を簡素化できる利点をもたらす。

5.1 結果

上記 3 つの追加分析を実施し、本実験と同様の手順で分析を行った。各モデルにおける成功率の推

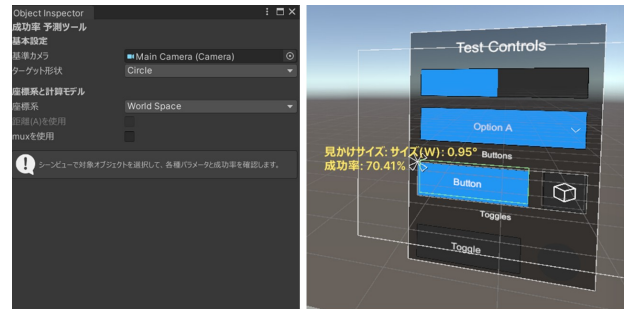


図 3. 左：成功率推定ツールのウィンドウ。ウィンドウ上で基準となるカメラ、ターゲット形状などのオプションを設定する。右：Unity のシーンビュー。あるオブジェクトをクリックすると、サイズ（単位：度）、選択成功率が表示される。

定結果を表 1 に示す。結果として、ベースラインとなるモデルと比較して推定精度は若干低下したものの、平均絶対誤差 (MAE) はいずれも 2-4% 程度に収まっていた。また、各モデルの AIC をベースラインと比較すると、その差は 10 未満であり、実用上十分に機能する推定が可能であることが確認された。よって、検討した 3 つのモデルはそれぞれ、精度への影響を許容範囲に留めつつ、使いやすさの向上、モデルの単純化、実装の簡素化や計算コストの削減といった利点をもたらす。そのため、応用場面に応じて各モデルを十分に利用可能であると考えられる。

6 成功率推定ツール

成功率推定モデルを VR コンテンツ開発者が容易に利用するため、VR 上の UI 分析ツールを開発した。これは、スマートフォンの UI 分析ツール「Tappy」[25] のコンセプトを VR に応用したものである。

このツールは Unity のエディタ拡張機能として実装されている。デザイナーや開発者は VR シーン的设计中に、任意の UI 要素（ボタン、パネルなど）を選択することで、その選択成功率をリアルタイムに確認できる (図 3)。ツールは、選択された UI のサイズ、カメラからの距離 (奥行き)、想定されるポインティングの移動距離を自動で取得し、推定モデルに基づき成功率を計算・表示する。これにより、開

発者は「このボタンは遠すぎてクリックしにくい」「このメニューは小さすぎて誤操作を招く」といったユーザビリティ上の問題を、開発の初期段階で定量的に特定し、改善することが可能となる。

6.1 実装

先行研究 [25] および VR 環境の特性に基づき、VR 空間の UI の選択成功率を推定するツールの詳細な機能について述べる。

ターゲット形状の選択. 開発者は分析対象となるターゲットの形状を、球体または矩形から選択できる。本研究における実験は球体を対象としているため、球体はモデルの標準的な対応形状である。一方、矩形に関して本研究で直接的な実験は行っていない。しかし、実験において x 軸方向と y 軸方向の終点分布に相関が見られなかったため、各軸に対して独立に成功率を推定可能であると仮定し実装した。

また、矩形はポインタの進行方向によって有効な縦横サイズが変動する。この問題に対しては、追加分析によって得られた「ワールド座標系においても推定が可能である」という知見を用い、絶対座標系で矩形の寸法を計算する手法を導入した。

選択中心オフセットの考慮. 開発者は、ターゲットを指し示す際の座標（選択中心）を、ターゲットの幾何学的な中心と仮定するか否かを選択できる。実験では、ターゲットサイズが大きくなるにつれて、選択中心がターゲット中心からユーザの進行方向手前側へ偏移する傾向が確認されている。一方で、追加分析により、選択中心をターゲット中心と仮定した場合でもモデルの有効性が保たれることが示されているため、システムはこの仮定の有無を選択できるオプションを提供する。

ターゲットまでの距離の考慮. ポインタの初期位置からターゲットまでの距離を、成功率の算出に含めるか否かを選択するオプションを提供する。追加分析の結果、ターゲットまでの距離の有無によって推定精度に大きな差異は生じないことが明らかになっている。しかし、本研究では、距離が大きくなるほど選択成功率がわずかに低下する傾向も示されている。そのため、この影響を考慮したい開発者向けに本オプションを提供する。

6.2 使用方法

まず、開発者が基準となるカメラと、成功率を推定したいターゲットオブジェクトを選択する。するとエディタ上で指定されたターゲットの周辺にそのサイズと選択成功率が表示される（図 3 右）。これらの手順に加え、開発者は前節で述べたオプションを選択する（図 3 左）ことで、目的に合わせた推定モデルを使用することが可能である。

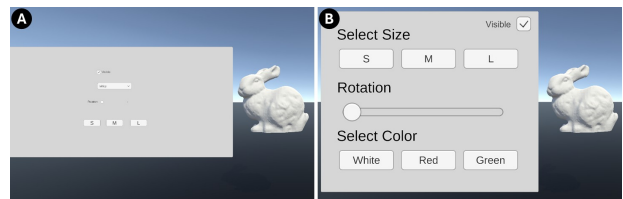


図 4. (A) 調整前の UI (B) 参加者が調整した後の UI. キャンバスは左手のコントローラーに紐づけられた。

7 開発経験者を対象としたユーザスタディ

本稿で提案する成功率推定ツールの有用性を検討するため、VR ゲーム開発経験がある 2 名を対象にユーザスタディを実施した。参加者の経歴を考慮し、それぞれ異なる形式でツールの試用とフィードバックの提供を依頼した。本ユーザスタディは 2 名の経験者を対象とした小規模なものであり、提案システムの有用性を網羅的に検証するものではなく、今後の改善に向けた質的な示唆を得ることを目的とした簡易的な調査である。

7.1 制御環境下でのユーザスタディ

参加者の 1 名は、過去 1 年間の VR 開発経験があるが、現在は VR 開発に従事していなかった。そのため、実環境でのツールの使用ではなく、制御下のタスクにおけるツールの有効性の調査を目的とした。

まず、参加者にツールの基本的な操作方法（UI 要素を選択し、成功率を確認する手順）を説明した。次にタスクとして、3D モデル（ウサギ）の色や大きさを調整するサンプル UI（図 4A）を提示し、「本ツールで表示される選択成功率を参考に、UI をより操作しやすく改善してください」と依頼した。参加者がタスクを完了した後の UI を、図 4B に示す。タスク完了後には、ツールが実際の UI 改善プロセスにおいてどのように役立ったか、また実用上の課題は何かについて意見を聴取した。

調査中、参加者はまず UI パネル上の各ボタンやスライダーを視認し、それぞれの機能的な重要度を判断した。例えば、色を変更するボタンは頻繁に使うが、3D モデルの表示・非表示を切り替えるボタンはあまり使わないといった判断が見られた。その後、本ツールを使い、個々の UI 要素の選択成功率を数値で確認した。使用頻度が高いにもかかわらず成功率が低いと表示されたボタンを発見すると、ツールで成功率を表示させながら、適切な大きさまで要素を拡大させる操作をした。重要度が高いと判断したボタン群については、参加者が「ツールで成功率を確認した後、ボタンサイズを 95% 以上の成功率が表示されるまで拡大する」という具体的な選択成功率の目標を設定して作業を進める様子が観察された。

参加者からは、実際に HMD を装着して何度も実

行・確認する手間をかけずに、選択成功率を分析し、UIを修正できる点が有用であるとの意見が得られた。また、開発者の主観や操作への慣れで見過ごされがちな問題を客観的な数値で判断できるため、UI開発の一つの指標になるとされた。具体的な活用場面として、品質保証(QA)フェーズの前段階で、プランナーやエンジニアがUIの操作性を議論する際に成功率などの数字が確認できると、一つの設計指針になるという意見があった。

7.2 実開発環境でのユーザスタディ

もう1名の参加者は、VR開発経験5年のVR-Chatワールド制作者である。参加者には1週間ツールを試用してもらい、アンケート形式でフィードバックを得た。アンケートはツールの使用感や今後の導入可能性、さらに普段のUI開発における課題などについて、主に自由記述形式で回答を求めた。

アンケートで参加者は普段、UIのサイズや配置を過去の制作物での経験や体感といった主観的な尺度に頼って調整しており、本ツールがこれまで直感に頼りがちだったUI設計に客観的な指標を与えた点が有用であるとした。特にUI設計の初期段階でUIの大きさを決定する際に有用であるとし、今後の開発ワークフローにも導入したいと回答した。本ツールが提供する指標は、開発者ごとの設計判断のばらつきを抑制し、見た目は問題ないが、実は操作しにくいUIの削減に貢献できると期待された。また、本ユーザスタディはVRChatのUI開発という環境で行われた。そこでは、VRChatSDKの仕様によりUnityエディタ上での実機デバッグが困難であるという技術的制約が存在する。本ツールは、その影響を軽減し、VR環境を介さずにUIのユーザビリティを検証する有効な手段となり得ることが示された。さらに、VRChatではユーザが使用するアバターの身長が多岐にわたるため、ユーザによって視点が異なり、あらゆる身長のユーザにとってアクセスしやすいUIを設計することが困難という課題も存在する。本ツールを用いることで、複数の身長モデルで実機デバッグを繰り返すことなく、身長差がUIのアクセシビリティに与える影響を定量的に把握でき、この課題の解決にも寄与する可能性が確認された。

8 議論

本研究では、いくつかの前提条件のもとでモデルを構築しており、その一般化可能性については今後の課題が残されている。これは、ツールを多様なUIへ適用する上で不可欠な要素である。第一に、モデルの基盤となる実験設定の限界がある。本実験はユーザから等距離の円周上に配置された球体ターゲットを対象とした。しかし、実用的なUIはユーザからの距離や視野角が常に変動する平面上に配置されるこ

とが多い。加えて、視野の中心部と周辺部ではポインティング精度が異なる可能性もあり、本モデルを適用する際の予測精度については慎重な検討が求められる。また、ツールでは実験結果から各軸を独立に推定できると仮定し、矩形にも対応している。この仮定の妥当性を含め、本実験と異なる条件でのモデルの適用可能性は今後の重要な検証課題である。

第二に、被験者属性の偏りが挙げられる。本実験の参加者は平均年齢21.0歳の大学生に限定されていた。加齢による運動能力の変化や、VR経験の有無がポインティング精度に与える影響は考慮されていない。より多様なユーザ層に対してモデルの一般化可能性を確保するためには、異なる年齢層やVR習熟度のユーザを含めた追加検証が必要である。

第三に、入力デバイスと選択手法が限定的である点が挙げられる。本研究はコントローラーを用いたレイキャスティング方式を前提としている。ボタン押下時にポインターがずれるハイゼンベルク効果[20]のように、入力デバイスの物理的な形状が選択精度に与える影響は無視できない。本モデルが異なるデバイスや選択方法で同様の精度を持つかは保証されない。さらに、バーチャルハンドやアイトラッキングといった他のポインティング手法に本研究の知見を適用できるかは、別途検証が必要である。

本研究では、開発したツールの有用性を検証するためにユーザスタディを実施した。その結果、本ツールがUI設計プロセスに客観的な指標を提供し、改善のきっかけとなり得ることが示唆された。具体的には「これまで直感で設定していたUIのサイズに客観的な目安ができた」といった肯定的な意見が得られた。このことから、本ツールはHCIの知見と開発現場のギャップを埋める可能性があり、特に実機検証に労力を要し、身長や姿勢といった個人差がUIの操作性に影響するAR/VRなどのXR開発における有用性が示唆された。しかし、本ユーザスタディはツールの改善に向けた意見収集を目的としており、参加者数が少ない点や、参加者が経験者に限定されるという制約がある。そのため、定量的かつ網羅的な評価のためには追加の大規模な実験が必要であると考えられる。

今後の展望として、エディタ上での使用のみならず、HMDを装着した状態でツールを使用し、現在のポインターの位置から各UIへの選択成功率を表示する機能拡張などが考えられる。また、本システムを用いて設計したUIと利用せずに設計したUIを比較し、設計時間の短縮や品質向上の観点からシステムの有用性を定量的に評価することも考えられる。さらに、UI設計支援にとどまらず、アクションゲームにおいて、ブロックのサイズや配置を調整することで、難易度を定量的に設計・分析するツールとしても応用が可能であると考えている。

参考文献

- [1] M. Amini, W. Stuerzlinger, R. J. Teather, and A. U. Batmaz. A Systematic Review of Fitts' Law in 3D Extended Reality. In *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '25, New York, NY, USA, 2025. Association for Computing Machinery.
- [2] F. Argelaguet and C. Andujar. A survey of 3D object selection techniques for virtual environments. *Computers & Graphics*, 37(3):121–136, 2013.
- [3] X. Bi, Y. Li, and S. Zhai. FFitts law: modeling finger touch with fitts' law. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, p. 1363–1372, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [4] X. Bi and S. Zhai. Predicting Finger-Touch Accuracy Based on the Dual Gaussian Distribution Model. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, p. 313–319, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [5] E. R. Crossman. *The measurement of perceptual load in manual operations*. PhD thesis, University of Birmingham, 1956.
- [6] P. M. Fitts. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of experimental psychology*, 47(6):381, 1954.
- [7] T. Grossman and R. Balakrishnan. A probabilistic approach to modeling two-dimensional pointing. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 12(3):435–459, Sept. 2005.
- [8] J. Huang, F. Tian, X. Fan, H. Tu, H. Zhang, X. Peng, and H. Wang. Modeling the Endpoint Uncertainty in Crossing-based Moving Target Selection. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, p. 1–12, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [9] J. Huang, F. Tian, X. Fan, X. L. Zhang, and S. Zhai. Understanding the Uncertainty in 1D Unidirectional Moving Target Selection. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, p. 1–12, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [10] J. Huang, F. Tian, N. Li, and X. Fan. Modeling the Uncertainty in 2D Moving Target Selection. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, p. 1031–1043, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [11] K. Kobayashi. Tap Analyzer, 2024.
- [12] R. Kopper, D. A. Bowman, M. G. Silva, and R. P. McMahan. A human motor behavior model for distal pointing tasks. *International Journal of Human-Computer Studies*, 68(10):603–615, 2010.
- [13] J. Petford, M. A. Nacenta, and C. Gutwin. Pointing all around you: selection performance of mouse and ray-cast pointing in full-coverage displays. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–14, 2018.
- [14] R. W. Soukoreff and I. S. MacKenzie. Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of Fitts' law research in HCI. *International journal of human-computer studies*, 61(6):751–789, 2004.
- [15] H. Usuba, S. Yamanaka, J. Sato, and H. Miyashita. Predicting Touch Accuracy for Rectangular Targets by Using One-Dimensional Task Results. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, 6(ISS), Nov. 2022.
- [16] L. Vanacken, T. Grossman, and K. Coninx. Exploring the Effects of Environment Density and Target Visibility on Object Selection in 3D Virtual Environments. In *2007 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, 2007.
- [17] A. T. Welford. *Fundamentals of skill*. 1968.
- [18] J. O. Wobbrock, E. Cutrell, S. Harada, and I. S. MacKenzie. An error model for pointing based on Fitts' law. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '08, p. 1613–1622, New York, NY, USA, 2008. Association for Computing Machinery.
- [19] J. O. Wobbrock, A. Jansen, and K. Shinohara. Modeling and predicting pointing errors in two dimensions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, p. 1653–1656, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [20] D. Wolf, J. Gugenheimer, M. Combosch, and E. Rukzio. Understanding the Heisenberg Effect of Spatial Interaction: A Selection Induced Error for Spatially Tracked Input Devices. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, p. 1–10, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [21] S. Yamanaka, H. Usuba, J. Sato, N. Sasaya, F. Yamashita, and S. Yamaguchi. Tappy Plugin for Figma: Predicting Tap Success Rates of User-Interface Elements under Development for Smartphones, 2024.
- [22] S. Yamanaka, H. Usuba, H. Takahashi, and H. Miyashita. Servo-gaussian model to predict success rates in manual tracking: Path steering and pursuit of 1d moving target. In *Proceedings of the 33rd annual ACM symposium on user interface software and technology*, pp. 844–857, 2020.
- [23] D. Yu, H.-N. Liang, X. Lu, K. Fan, and B. Ens. Modeling endpoint distribution of pointing selection tasks in virtual reality environments. *ACM Trans. Graph.*, 38(6), Nov. 2019.
- [24] Y. Zheng, J. Huang, H. Zhang, Y. Bian, J. Liu, C. Yang, F. Tian, and X. Meng. 3D Ternary-Gaussian model: Modeling pointing uncertainty

of 3D moving target selection in virtual reality. *International Journal of Human-Computer Studies*, 198:103454, 2025.

[25] 山中 祥太, 薄羽 大樹, 山下 郁矢, 笹谷 奈翁美, 佐

藤 潤一. スマートフォン用ウェブページとアプリにおけるタップ成功率推定ツール Tappy の実用化. 情報処理学会シンポジウムインタラクション, No. 014 in INT25, pp. 119–128, 2025.