arXiv:2601.03522v1 [cs.HC] 7 Jan 2026

# 一种用于估算虚拟现实中基于射线投射的对象选择成功率的工具

TATSUYA OKUNO,明治大学，日本
HARUTO SHIMIZU, 明治大学，日本
NOBUHITO KASAHARA,明治大学，日本
TAIYU HONMA, 明治大学，日本SHOTA YAMANAKA,LY Corporation，日本HOMEI MIYASHITA, 明治大学，日本

随着XR设备日益普及，三维交互已变得司空见惯，用户界面开发者也越来越需要考虑可用性，以提供更好的用户体验。人机交互社区长期以来一直在研究目标指向性能，针对3D环境的研究也取得了长足进展。然而，要让从业者能够直接将研究成果应用于用户界面的改进，仍需要实用工具。为弥合虚拟现实系统研究与开发之间的差距，我们提出了一种系统，可在开发工具Unity中估算对象选择成功率。本文将验证其理论基础，介绍该工具的功能，并报告尝试使用该工具的虚拟现实开发者对其效用的反馈。

CCS 概念： • **以人为中心的计算** → 交互系统与工具。

附加内容 关键词和短语：虚拟现实、射线投射、指向、成功率预测、端点分布、设计 t ool

## 1 引言

虚拟现实（虚拟现实）技术提供了传统 2D显示器无法实现的高度真实感和交互性。在虚拟现实环境中，使用控制器选择用户界面（用户界面）元素，是几乎所有交互所依赖的最基本操作之一。

由于受到三维交互中特有因素的影响，例如沿深度维度排列的目标布局，虚拟现实中的指向操作被认为比二维环境中的更为复杂 [1]。尤其是，选择距离用户较远或显示得较小的目标时，难度会显著增加。这可能导致操作错误和挫败感，最终降低整体虚拟现实经验的质量。因此，如果虚拟现实应用开发者和设计师能够定量评估用户界面元素的选择难易程度，就有可能改善虚拟现实经验。

为实现这一目标，我们构建了一个用于估算虚拟现实中指向操作成功率的数学模型，并基于该模型开发了一款用户界面分析工具。我们的模型补充了菲茨定律 [8], ，后者以预测运动时间而广为人知；我们的模型则聚焦于成功率。在估算成功率时，我们借鉴了 EDModel [28], 的见解，这是一种专为虚拟现实设计的端点分布模型。最终，我们将这一方法以实用形式呈现，类似于二维用户界面分析工具*Tappy* [18, 26], ，旨在推动人机交互领域的理论研究成果应用于实际的虚拟现实应用开发。

我们将目标指向成功率估算工具作为开源项目发布在 GitHub（ https://github.com/Fvkuinu/RayCastSuccessPredictor）。读者可以将其作为插件安装并在 Unity 引擎中使用。

© 2025 版权归所有者/作者所有。

作者联系信息：TATSUYA OKUNO，明治大学，日本东京；HARUTO SHIMIZU，明治大学，日本东京；NOBUHITO KASAHARA，明治大学，日本东京；TAIYU HONMA，明治大学，日本东京；Shota Yamanaka，syamanak@lycorp.co.jp，LY Corporation，日本东京；HOMEI MIYASHITA，明治大学，日本东京。稿件已提交至 arXiv 1

## 2 相关工作

### 2.1 虚拟现实空间中的指向

虚拟现实中存在多种指向选择技术，其中射线投射（从控制器发出一条射线来选择物体）得到广泛应用，因为它能够以较小的体力消耗操纵远处的物体。然而，当目标较小和／或距离较远时，射线投射的准确性会降低 [2]。为了解决这一问题，研究者提出了许多辅助指向的交互技术 [3, 4, 15, 20]。与此同时，对用户的指向行为进行建模，以了解并预测其表现，也被认为十分重要 [14]。许多研究使用了菲茨定律 [8] 来估算运动时间。

### 2.2 指向成功率

Crossman 和 Welford 的早期研究表明，在一维指向任务中，端点分布符合高斯分布 [7, 21]。后续关于二维指向的研究假设端点分布符合二元高斯分布，并计算指向成功率，将其转化为菲茨定律的难度指数（难度指数） [9]。其他研究基于有效目标宽度构建了鼠标指向的错误率模型，并证明这些模型适用于一维条形目标和二维圆形目标 [22, 23]。

Bi等基于双分布假设提出了双高斯分布模型 [5], ，该模型将点击点分布解释为两个独立高斯分布的混合：一个随目标大小变化，另一个则反映由手指厚度和运动精度等因素造成的绝对分布 [6]。此外，也有人提出将这一思路扩展到各种目标形状和条件（例如三维、移动目标）的模型 [10–12, 19, 27, 29]。

在这些模型中，EDModel [28] 专为虚拟现实指向任务中的端点分布而设计。该模型探究了目标宽度（$W$）、移动幅度（$A$）和 VR特定深度（$Z$）对端点分布的影响。研究表明，虚拟现实中的端点分布同样可以很好地近似为二元高斯分布，并推导出回归方程，根据任务条件项（例如$W$和 $A$）预测分布参数（均值和协方差）。预测的端点分布服从二元高斯分布，如公式 1所示。

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

根据预　　测分布，可以将目标区域 $D$ 的选择成功率$SR$ 计算为其中的概率
质量　　$D$:

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

然而，先前的研究 [28] 并未考察模型中所包含的项的不同组合会如何影响成功率估算的准确度。因此，本研究使用包含不同项集的模型预测端点分布，并比较其成功率估算准确度。

### 2.3 UI 设计支持工具

在二维 UI 设计中，基于定量预测模型开发实用支持工具的工作一直十分活跃。*Tappy* [18, 26] 是一套用于估算智能手机网页和应用程序中用户界面元素点击成功率的工具，其理论基础是双高斯分布模型。Tappy 能够准确识别仅凭外观难以判断的可点击区域（例如，文字周围的区域是否接受点击事件），并将成功率可视化。已提交至 arXiv 的稿件

使用 Tappy 进行的评估表明，它能够帮助开发者和设计师发现成功率低于预期的用户界面元素以及实现问题，从而促成具体的设计改进和数据驱动的决策。浏览器扩展版本*Tap Analyzer* [13], 也已提供。

我们的目标是实现一种将这一概念扩展至虚拟现实的成功率估算工具。由于虚拟现实不同于二维用户界面：它引入了深度，并且通常使用射线投射进行选择，因此我们重新审视并分析了一种适用于虚拟现实的基于终点分布的成功率模型。我们还实现了一个使用该模型的工具，并研究了虚拟现实开发者如何使用它。

## 3 用于构建估算模型的数据收集实验

我们的目标是实现一种将 *Tappy* [18, 26] 的概念扩展至虚拟现实的成功率估算工具。为此，我们开展了一项用户研究，以重新审视 EDModel [28]，并探索包含新术语或简化术语的替代模型，这些模型可能有助于实际进行成功率估算。

### 3.1 参与者与实验设备

18 名年龄在 18–24 岁之间的大学生（均值：21.0；女性 2 名，男性 16 名）参与了实验。我们使用了 Meta Quest 3 头戴设备和标准 Touch Plus 控制器。实验程序在 Unity 中实现。我们采用了射线投射选择技术，并通过控制器按钮执行触发操作。

### 3.2 任务

我们开展了一项指向任务，参与者依次选择排列成环形区域的 21 个球形目标，任务类似于 ISO 9241-411 [17]（图 1A）。参与者按照图 1B 所示的顺序选择目标。每次选择后，系统会播放一段短音效、高亮显示一个新目标，并开始下一次试次。随后，参与者将指针移至下一个高亮显示的目标。与先前研究 [28], 一致，我们没有提供有关选择是否正确的反馈。

我们操纵了目标宽度$W$和移动幅度 $A$（见图 1A）。这些变量以角度形式表示 [14, 16]。具体而言，我们根据每位参与者的视点，计算了与$W$和 $A$对应的角度。

我们在基于角度的坐标系中评估端点误差，而非使用物理距离。通常，三维空间中的一个点可以用球坐标表示，包括距离 $r$和两个角度（$\theta$, $\phi$）。由于控制器发出的射线可视为长度无限，因此我们可以忽略 $r$ 分量，将端点误差表示简化为仅使用两个角度分量的二维坐标。

因此，我们将端点 $p$ 定义为二维角坐标 $p = (x, y)$。其中， $x$ 表示平行于移动方向（从起始目标靶到目标靶的直线）的角误差， $y$ 表示垂直于该方向的角误差。原点设在目标靶的中心， $x$ 和 $y$ 均可取负值。

### 3.3 设计与流程

我们采用了包含两个因素的 $8 \times 3$ 被试内设计：目标宽度$W$和移动幅度 $A$。目标宽度$W$设有八个水平，从 1.0° 到 4.5°，步长为 0.5°；移动幅度 $A$ 设有三个水平（30°、 35°和40°）。这些数值根据先前研究 [28] 和预实验确定，并确认环形区域上的目标靶即使在最极端条件（$W = 4.5°$ 和 $A = 30°$）下也不会重叠。参与者与每个目标靶之间的距离固定为 100 米。$W$–$A$组合的呈现顺序按参与者随机排列

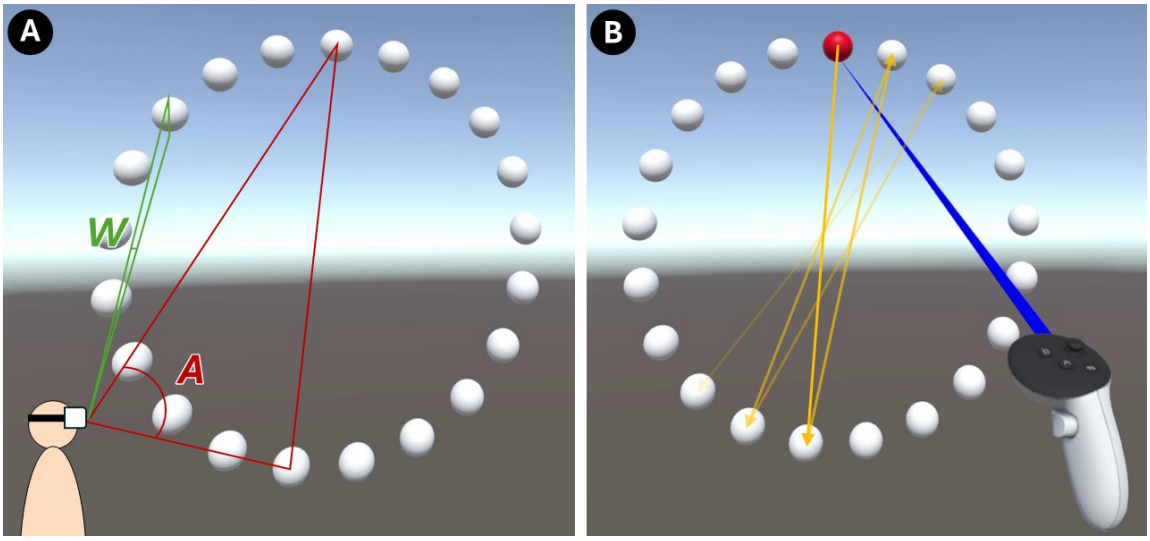



图 1. (A) 目标宽度 $W$ 和移动幅度 $A$ 的角度表示。(B) 参与者沿着箭头路径依次选择目标。

参与者。按照先前的研究 [28],，我们剔除了每个 $W$–$A$ 组合（即每个环形区域）的第一个试次，因此每种条件保留 20 个试次用于分析。我们总共收集了 8,640 个终点（$8\,W \times 3\,A \times 18$ 参与者 $\times 20$ 试次）。

参与者首先听取了关于 VR 设备和选择任务的说明。随后，他们佩戴 VR 头显，对前方方向进行校准，并完成练习试次，然后开始正式试次。实验结束后，参与者填写问卷，以收集年龄、性别和利手信息。

我们指示参与者按照舒适、自然的节奏选择目标，以记录更自然的选择行为。我们还告知他们，如有需要，可以自由进行短暂休息。

## 4 结果

### 4.1 数据筛选与正态性检验

我们从 8,640 个试次中获取了数据。按照先前的研究 [28],，我们针对每位参与者和每个目标条件移除了离群值：即第一次点击坐标在任一轴上偏离中心超过 3 个标准差的试次。我们还对运动时间应用了相同的 3$SD$ 规则。因此，共排除了 313 个试次。我们按参与者和条件对剩余数据进行分组，以便分析。

对于所有端点坐标，柯尔莫戈洛夫–斯米尔诺夫检验确认其在 $x$ 和 $y$ 轴上均符合正态性（$\alpha = 0.05$）。接下来，我们针对每位参与者和每个目标条件，使用最大似然估计来估计两个轴上的高斯均值 $\mu$ 和标准差 $\sigma$。我们还计算了 $\rho$ 两个轴之间的相关性。使用五个因变量 $\mu_x$、 $\sigma_x$、 $\mu_y$、 $\sigma_y$ 和 $\rho$，我们计算了均值向量 $\boldsymbol{\mu}$ 和协方差矩阵 $\Sigma$（见公式1）。

### 4.2 端点分布

我们针对五个因变量进行了重复测量方差分析（RM-ANOVA）。使用格林豪斯–盖瑟校正调整了自由度。$W$ 在 $\mu_x$（$F_{2.81} = 9.95$、$p < 0.001$，提交至 arXiv 的稿件中具有显著主效应

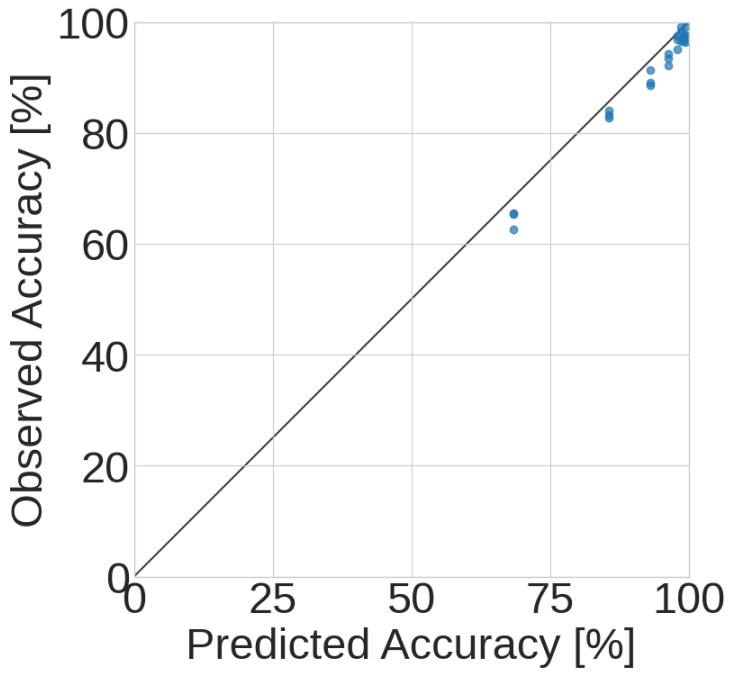



图 2. 观察到的 球形目标的成功率，以及根据我们的 r
实验。

$\eta_p^2 = 0.369$）、 $\sigma_x$ （$F_{6,91} = 56.30$、 $p < 0.001$、 $\eta_p^2 = 0.768$）和$\sigma_y$ （$F_{2,94} = 40.90$、 $p < 0.001$、 $\eta_p^2 = 0.706$）。未观察到其他主效应或交互作用。

对于具有显著主效应的因变量，我们进行了线性回归分析。结果表明， $W$与 $\mu_x$($R^2 = 0.73$)、$W$与 $\sigma_x$($R^2 = 0.98$)以及$W$与$\sigma_y$($R^2 = 0.89$)之间存在线性关系。根据这些结果，我们构建了以下二元高斯分布：

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

其中协 回归中的常数为 $a = 0.1102, b = 0.23130, c = 0.0715, d = 0.2311, e = -0.0623$ 和 $f = -0.0846$ .

### 4.3 成功率估算

接下来，我们使用根据实验（公式3）推导出的二元高斯分布，依据公式2估算了各条件下的目标选择成功率。图2 展示了估算的成功率与观测到的成功率。观测值与估算值之间的最大差异为 5.82%（$W = 1.0°$， $A = 30°$）。平均绝对误差（$MAE$）为 2.35%，且 $R^2$ 为 0.987。通过留一交叉验证（LOOCV），我们得到 平均绝对误差 $= 2.39\%$和 $R^2 = 0.985$。

## 5 模型细化的补充分析

为探究我们的模型在工具使用方面的适用性和实用性，我们针对三个关键因素进行了额外分析。我们的目标是从计算成本和可用性等实际角度，明确适用于成功率估算工具的合理模型配置。具体而言，我们从以下三个角度考察模型的有效性。

### 5.1 分析的因素

**使用移动幅度**（$A$）。首先，我们考察模型中是否有必要使用移动幅度 $A$。先前有关基于手部的射线投射的研究 [28] 将 $A$ 纳入端点分布预测模型。然而，在我们的任务中，重复测量方差分析表明其影响有限。如果不包含 $A$ 的模型仍能保持足够的准确度，那么只需考虑目标大小即可进行成功率估算。这将提升可用性，因为开发者无需考虑指针—目标距离即可使用该工具。因此，我们比较包含和不包含 $A$ 的模型，以确定能否在不牺牲估计准确度的前提下简化模型。

**简化偏移量**（$\mu_x$）。其次，我们评估假设 $\mu_x = 0$ 是否成立。许多基于菲茨定律、用于描述指向误差的基础概率模型都假设用户始终瞄准目标中心，并将平均误差（$\mu_x$，$\mu_y$）设为零 [6, 22, 25]。我们比较不包含 $\mu_x$ 的模型，以及平均误差随 $W$ 动态变化的模型。通过这一比较，我们考察较简单的假设在实践中是否足够。

**采用世界坐标系**。第三，我们考察将基于移动方向的坐标系（以移动方向作为 $x$，垂直方向作为 $y$）替换为 Unity 标准世界坐标系后是否仍然有效。此前的研究已采用基于移动方向的坐标系 [28]，且该坐标系适用于运动分析。相比之下，世界坐标系或许能够对按钮按压时所受力导致的指针漂移等效应进行建模，其中也包括重力和惯性等现实世界的影响。此外，如果能够在世界坐标系中进行成功率估算，开发者就无需考虑指针移动方向或目标方向等变化因素。这样一来，只需依据目标大小即可计算成功率，从而简化实现并降低计算成本。

### 5.2 结果

我们进行了三项额外分析，并采用与主要实验相同的分析流程。表1展示了各模型的成功率估算结果。与基线模型相比，估计准确度略有下降，但平均绝对误差在所有模型中仍维持在约 2–4%。此外，与基线相比，赤池信息准则的差异小于 10，表明所有模型都能提供具有实际用途的估算。因此，根据具体应用场景，可以采用各模型来提升效用、简化模型，并降低实现复杂度和计算成本，同时将准确度保持在可接受的范围内。

## 6 成功率估算工具

为了让虚拟现实应用开发者能够轻松使用成功率估算模型，我们实现了一款用户界面分析工具。该工具将智能手机UI分析工具的概念*Tappy* [18, 26] 应用于虚拟现实系统。

该工具以 Unity 编辑器扩展的形式实现。在 VR 场景设计过程中，设计师和开发者可以选择任意 UI 元素（例如按钮或面板），并实时查看其预测的选择成功率（图 3）。该工具会自动获取所选 UI 的尺寸、其与摄像机之间的距离（深度），以及假设的指向 

表 1. 附加分析中各模型的成功率估计准确度比较，以及通过留一交叉验证评估的泛化性能。

| | 训练数据 | | 留一交叉验证 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 模型 | 平均绝对误差（%） | $R^2$ | 平均绝对误差 (%) | $R^2$ | $AIC$ |
| 基线 | 2.354 | 0.987 | 2.394 | 0.985 | 82.50 |
| 带距离参数（$A$） | 2.352 | 0.985 | 2.405 | 0.982 | 85.57 |
| 偏移简化（$\mu_x = 0$） | 3.907 | 0.982 | 3.933 | 0.982 | 90.01 |
| 世界坐标系 | 3.827 | 0.989 | 3.871 | 0.988 | 78.91 |

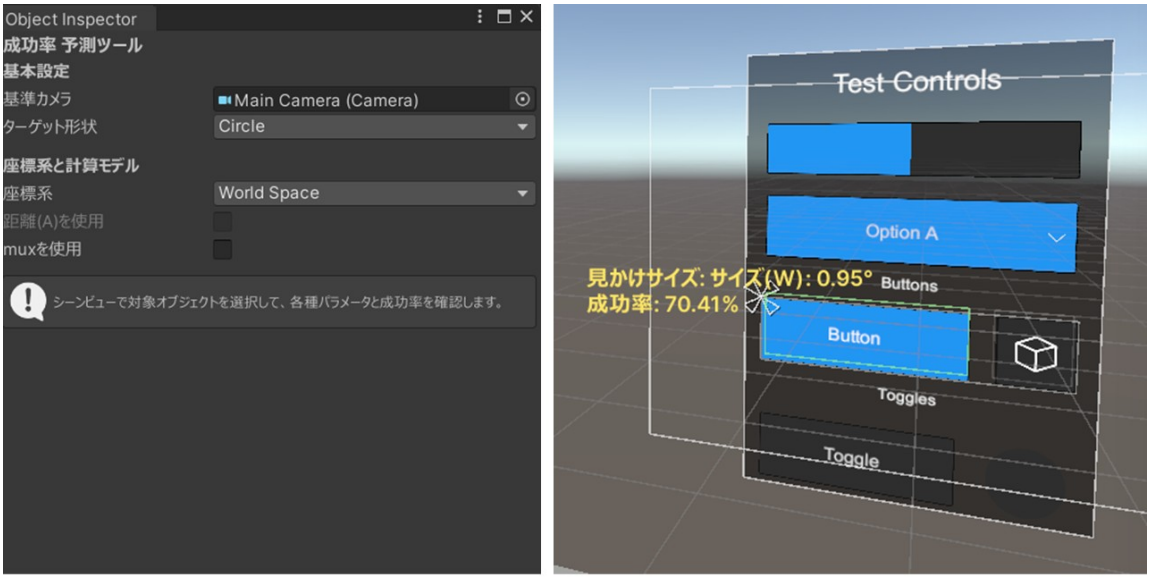



图 3。左：所提出的成功率估算工具的检查器窗口，该工具以 Unity 编辑器扩展的形式实现。开发者可指定分析设置，例如参考摄像机、目标形状（如圆形）、坐标系（如世界空间）以及可选的模型参数。右：Unity 场景视图显示了一个虚拟现实用户界面画布。选中某个 UI 元素后，工具会在对象附近叠加显示其表观视角大小（目标宽度 $W$，单位为度，例如 0.95°）以及预测的选择成功率（例如 70.41%）。

移动幅度，然后根据估算模型计算并显示成功率。这使开发者能够及早定量识别可用性问题，例如“这个按钮太远，不容易点击”或“这个菜单太小，可能导致选择错误”，并加以改进。

### 6.1 实现

基于先前的工作 [18, 26] 以及虚拟现实环境的特性，我们介绍了用于估算虚拟现实用户界面元素选择成功率的工具的主要特性。

**目标形状选择**。开发者可以选择球体或矩形作为目标形状。我们的实验使用了球形目标，因此模型默认支持的形状为球体。本研究未直接针对矩形目标开展实验。不过，由于我们观察到 $x$ 轴和 $y$ 轴的端点分布之间不存在相关性，因此我们通过假设各轴之间相互独立，实现了矩形目标成功率的估算。

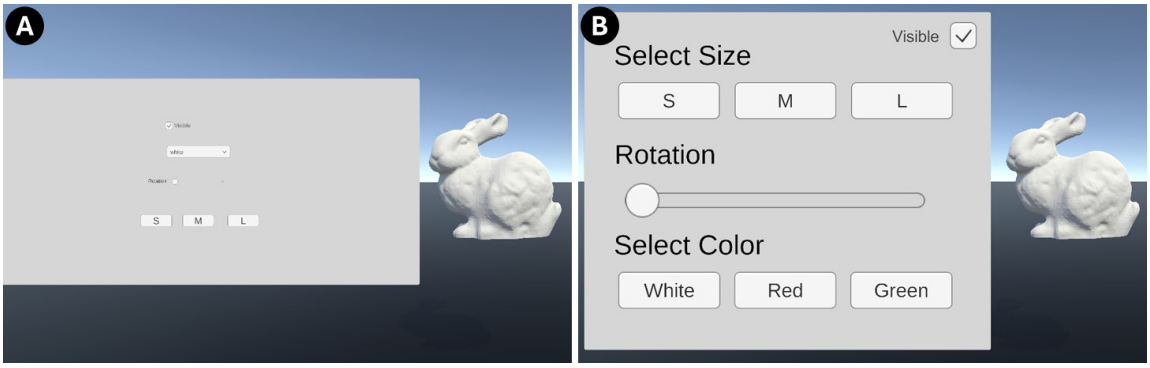



图 4. (A ) 调整前的用户界面。(B) 参与者调整后的用户界面。画布连接在左手控制器上 r.

此外，对于矩形，有效宽度和高度可能会因指针移动方向而异。为解决这一问题，我们借鉴了补充分析中的发现：在世界坐标系中仍可进行估算，并引入了一种在绝对坐标系中计算矩形尺寸的方法。

**考虑选择中心偏移**。开发者可以选择是否假设指向的“选择中心”是目标的几何中心。在我们的实验中，我们观察到，随着目标大小增加，选择中心有向用户方向（与移动方向相反）偏移的趋势。另一方面，进一步分析表明，即使假设目标中心就是选择中心，该模型仍然有效。因此，该工具提供了启用或禁用此偏移假设的选项，以满足开发者的需求。

**考虑与目标的距离**。我们提供了一个选项，可在成功率计算中纳入或排除指针到目标的距离。进一步分析表明，纳入距离不会使估计准确度产生明显差异。不过，我们的结果也显示，距离增加时，成功率略有下降的趋势。因此，我们为希望考虑这一影响的开发者提供了此选项。

### 6.2 使用方法

首先，开发者选择一个参考摄像机和一个希望估算其成功率的目标物体。然后，工具会在编辑器中目标物体周围显示该目标的大小和预测选择成功率（图 3，右）。此外，开发者还可以在工具窗口中选择上述选项（图 3，左），以选择最适合其用途的模型配置。

## 7 与虚拟现实开发者开展的用户研究

为了考察我们的成功率估算工具的实用性，我们邀请了两名具有虚拟现实游戏开发经验的参与者开展用户研究。考虑到他们的背景，我们要求每名参与者分别以不同形式试用该工具并提供反馈。由于这是一项仅有两名经验丰富开发者参与的小规模研究，因此无法全面评估所提出的系统。相反，我们的目标是为未来改进获取定性见解。

### 7.1 受控环境用户研究

其中一名参与者拥有约一年的 VR 应用开发经验，但目前并未从事相关工作。因此，我们没有在实际开发环境中评估该工具，而是在受控任务中考察了其有用性。

我们首先说明了该工具的基本操作（选择 UI 元素并查看其成功率）。作为任务，我们展示了一个用于调整 3D 模型（兔子）颜色和大小的示例 UI（图 4A），并请参与者“参考工具显示的选择成功率，改进 UI，使其更易于操作”。图4B 展示了参与者完成任务后的 UI。之后，我们采访了参与者，了解该工具如何帮助改进 UI，以及实际使用中存在哪些问题。

任务期间，参与者首先检查了 UI 面板上的每个按钮和滑块，并判断它们在功能上的重要性。例如，参与者认为更改颜色的按钮使用频率较高，而用于切换 3D 模型可见性的按钮使用频率较低。随后，参与者使用该工具逐一确认各 UI 元素的成功率数值。当参与者发现某个常用按钮的预测成功率较低时，便在监测显示的成功率的同时放大该元素。对于一组重要性较高的按钮，我们观察到参与者会设定具体目标，例如“增大按钮尺寸，直到工具显示的成功率达到 95% 或更高”，并据此进行操作。

参与者表示，无需反复佩戴头戴式显示器并在虚拟现实中测试，就能分析成功率并修改 UI 元素，这一点很有用。他们还指出，该工具提供了客观的数值指标，有助于发现那些可能因开发者的主观判断或习惯而被忽视的问题。关于预期的使用场景，参与者建议，在质量保证（QA）阶段开始前确认成功率等数值，可作为规划人员与工程师讨论 UI 可操作性时的设计指南。

### 7.2 真实开发环境中的用户研究

另一位参与者拥有五年的 VR 系统开发经验，是一名 VRChat 世界创作者。我们请这位参与者使用该工具一周，并通过问卷提供反馈。问卷主要采用开放式问题，询问内容包括可用性、在未来工作流程中采用该工具的可行性，以及他们在日常 UI 开发实践中遇到的挑战。

参与者表示，他们通常会根据经验和以往项目中积累的直觉等主观标准来调整 UI 尺寸和位置。他们认为，我们的工具能够为以往很大程度上依赖直觉的 UI 设计决策提供客观指标，这一点很有用。尤其是，他们认为该工具在确定 UI 尺寸的早期阶段很有帮助，并表示希望将其纳入开发工作流。他们还认为，该工具有望减少不同开发者之间设计决策的差异，并帮助减少那些看似易于操作、实际却难以操作的 UI。

本研究是在 VRChat UI 开发的背景下开展的，其中存在一些技术限制：由于 VRChatSDK 规范的限制，在 Unity 编辑器中难以对真实设备进行调试。参与者指出，我们的工具无需经过虚拟现实设备调试即可进行可用性评估，从而有助于缓解这一问题。此外，在 VRChat 中，用户的化身身高差异很大，因此不同用户的视点也各不相同。要设计出适用于不同身高用户的 UI，颇具挑战。参与者认为，我们的工具无需针对多个身高模型反复调试，就能帮助量化身高差异对 UI 可访问性的影响，从而有望为应对这一挑战作出贡献。

## 8 讨论

在本研究中，我们基于若干假设构建了模型，仍需进一步研究以确保其具有普适性。要将该工具应用于各种不同的用户界面，普适性至关重要。

首先，构成我们模型基础的实验设置存在一些局限。我们的实验使用了放置在环形区域上、与用户距离相等的球形目标。然而，在实际的用户界面中，目标通常放置在平面上，其距离和视角会动态变化。此外，中央和周边视野中的指向准确度可能有所不同。因此，将我们的模型应用于这类条件时，需要仔细考虑预测准确度。此外，在该工具中，我们假设每个轴的端点分布可以独立估计，因此支持矩形。验证这一假设以及模型在不同于我们实验的条件下的适用性，仍是一项重要的未来工作。

其次，参与者人口统计特征较为有限。参与者均为大学生，平均年龄为 21.0 岁。我们没有考虑年龄增长导致的运动能力变化，也未考虑 VR 经验对指向准确度的影响。为提高结果的普适性，仍需针对更多样化的用户群体（不同年龄组和 VR 熟练程度）开展进一步验证。

第三，输入设备和选择方法有所局限。我们的研究假设使用基于控制器的射线投射。输入设备的物理形状会影响选择准确性，例如海森堡效应（按下按钮时发生的指针漂移） [24]。因此，无法保证我们的模型在其他设备或选择方法上也能达到类似的准确性。若要将我们的发现应用于其他指向技术（例如虚拟手或眼动追踪），还需要开展单独的研究。

我们还开展了一项用户研究，以考察所开发工具的实用性。结果表明，该工具能够在用户界面设计过程中提供客观指标，并推动改进。例如，参与者给出了积极反馈：“现在我有了客观的 UI 尺寸指南，而过去我只能凭直觉设定 UI 尺寸。”这些发现表明，我们的工具有助于弥合人机交互知识与开发实践之间的差距，尤其是在 XR 开发（AR/VR）中；在这一领域，真实设备测试需要投入大量精力，而且身高、姿势等个体差异会影响 UI 可操作性。不过，我们开展这项用户研究的目的是收集反馈以改进工具，且受限于经验丰富的参与者人数较少。要进行全面评估，还需要开展大规模的定量研究。

作为未来工作，我们可以将该工具的应用范围扩展到编辑器之外。例如，佩戴头戴式显示器时，可以使用该工具显示从当前指针位置到每个 UI 元素的成功率。我们还计划通过比较使用和未使用该工具设计的 UI 在设计时间缩短和质量提升方面的表现，对其效用进行定量评估。此外，除了支持 UI 设计之外，我们的方法还可应用于动作游戏，通过调整方块等物体的大小和位置，作为一种定量设计和分析难度的工具。

## 参考文献

[1] Mohammadreza Amini、Wolfgang Stuerzlinger、Robert J Teather 和 Anil Ufuk Batmaz。2025。《三维扩展现实中菲茨定律的系统综述》。载于 *2025 CHI* 人机交互系统中的人为因素会议论文集（*CHI '25*）。美国计算机协会，纽约，美国，论文编号 625，共 25 页。https://doi.org/10.1145/3706598.3713623[2] Ferran Argelaguet 和 Carlos Andujar。2013。虚拟环境中三维对象选择技术综述。《计算机与图形学》 37，3（2013），121–136。 https://doi.org/10.1016/j.cag.2012.12.003[3] Marc Baloup、Thomas Pietrzak 和 Géry Casiez。2019。RayCursor：一种基于射线投射的三维指向辅助技术。载于 *2019 CHI* 人机交互系统中的人为因素会议论文集 （苏格兰格拉斯哥） （*CHI '19*）。美国计算机协会，纽约，美国，1–12。 https://doi.org/10.1145/3290605.3300331

[4] Scott Bateman、Regan L. Mandryk、Carl Gutwin 和 Robert Xiao。2013。相对射线投射指向中目标辅助技术的分析与比较。《国际人机交互研究期刊》71，5（2013），511–532。https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2012.12.006[5] Xiaojun Bi 和 Shumin Zhai。2013。FFitts 定律：用菲茨定律对手指触控进行建模。载于 SIGCHI 人机交互系统中的人为因素会议论文集（法国巴黎）（CHI '13）。美国计算机协会，纽约，美国，1363–1372。https: //doi.org/10.1145/2470654.2466180[6] Xiaojun Bi 和 Shumin Zhai。2016。基于双高斯分布模型预测手指触控准确度。载于第 29 届年度用户界面软件与技术研讨会论文集（日本东京）（UIST '16）。美国计算机协会，纽约，美国，313–319。https://doi.org/10.1145/2984511.2984546[7] Edward R.F.W. Crossman。1956。手动操作中知觉负荷的测量。博士论文。伯明翰大学。[8] Paul M Fitts。1954。人体运动系统控制运动幅度的信息容量。《实验心理学杂志》47，6（1954），381。[9] Tovi Grossman 和 Ravin Balakrishnan。2005。二维指向建模的概率方法。《ACM 计算机与人机交互汇刊》12，3（2005 年 9 月），435–459。https://doi.org/10.1145/1096737.1096741[10] Jin Huang、Feng Tian、Xiangmin Fan、Huawei Tu、Hao Zhang、Xiaolan Peng 和 Hongan Wang。2020。基于穿越的移动目标选择中的端点不确定性建模。载于 2020 CHI 人机交互系统中的人为因素会议论文集（美国夏威夷州檀香山）（CHI '20）。美国计算机协会，纽约，美国，1–12。https://doi.org/10.1145/3313831.3376336[11] Jin Huang、Feng Tian、Xiangmin Fan、Xiaolong (Luke) Zhang 和 Shumin Zhai。2018。理解一维单向移动目标选择中的不确定性。载于 2018 CHI 人机交互系统中的人为因素会议论文集（加拿大魁北克省蒙特利尔）（CHI '18）。美国计算机协会，纽约，美国，1–12。https://doi.org/10.1145/3173574.3173811[12] Jin Huang、Feng Tian、Nianlong Li 和 Xiangmin Fan。2019。二维移动目标选择中的不确定性建模。载于第 32 届年度 ACM 用户界面软件与技术研讨会论文集（美国路易斯安那州新奥尔良）（UIST '19）。美国计算机协会，纽约，美国，1031–1043。https://doi.org/10.1145/3332165.3347880[13] Kenta Kobayashi。2024。Tap Analyzer。https://chromewebstore.google.com/detail/tap-analyzer/omacmfialjnoognohplbhhbgpeillekn?hl=en[14] Regis Kopper、Doug A. Bowman、Mara G. Silva 和 Ryan P. McMahan。2010。远端指向任务的人体运动行为模型。《国际人机交互研究期刊》68，10（2010），603–615。https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2010.05.001[15] Yiqin Lu、Chun Yu 和 Yuanchun Shi。2020。探索用于改善虚拟现实中三维目标获取的射线投射气泡机制。载于 2020 IEEE 虚拟现实与三维用户界面会议（VR）。35–43。https://doi.org/10.1109/VR46266.2020.00021[16] Julian Petford、Miguel A Nacenta 和 Carl Gutwin。2018。指向周围各处：全覆盖显示器中鼠标指向与射线投射指向的选择性能。载于 2018 CHI 人机交互系统中的人为因素会议论文集。1–14。[17] R William Soukoreff 和 I Scott MacKenzie。2004。迈向指向设备评估标准：回顾人机交互领域 27 年的菲茨定律研究。《国际人机交互研究期刊》61，6（2004），751–789。[18] Hiroki Usuba、Junichi Sato、Naomi Sasaya、Shota Yamanaka 和 Fumiya Yamashita。2024。Tappy：通过逆向工程网页结构预测用户界面元素的点击准确度。arXiv:2403.03097 [cs.HC] https://arxiv.org/abs/2403.03097[19] Hiroki Usuba、Shota Yamanaka、Junichi Sato 和 HOMEI MIYASHITA。2022。利用一维任务结果预测矩形目标的触控准确度。《ACM 人机交互汇刊论文集》6，ISS，论文编号 579（2022 年 11 月），13 页。https://doi.org/10.1145/3567732[20] Lode Vanacken、Tovi Grossman 和 Karin Coninx。2007。探索环境密度和目标可见性对三维虚拟环境中对象选择的影响。载于 2007 IEEE 三维用户界面研讨会。https://doi.org/10.1109/3DUI.2007.340783[21] Alan Traviss Welford。1968。技能基础。（1968）。[22] Jacob O. Wobbrock、Edward Cutrell、Susumu Harada 和 I. Scott MacKenzie。2008。基于菲茨定律的指向误差模型。载于 SIGCHI 人机交互系统中的人为因素会议论文集（意大利佛罗伦萨）（CHI '08）。美国计算机协会，纽约，美国，1613–1622。https://doi.org/10.1145/1357054.1357306[23] Jacob O. Wobbrock、Alex Jansen 和 Kristen Shinohara。2011。二维指向误差的建模与预测。载于 SIGCHI 人机交互系统中的人为因素会议论文集（加拿大不列颠哥伦比亚省温哥华）（CHI '11）。美国计算机协会，纽约，美国，1653–1656。https://doi.org/10.1145/1978942.1979183[24] Dennis Wolf、Jan Gugenheimer、Marco Combosch 和 Enrico Rukzio。2020。理解空间交互中的海森堡效应：空间追踪输入设备引发的选择诱发误差。载于 2020 CHI 人机交互系统中的人为因素会议论文集（美国夏威夷州檀香山）（CHI '20）。美国计算机协会，纽约，美国，1–10。https://doi.org/10.1145/3313831.3376876[25] Shota Yamanaka 和 Hiroki Usuba。2020。重新思考用于预测屏幕起始指向任务中触控准确度的双高斯分布模型。《ACM 人机交互汇刊论文集》4，ISS，论文编号 205（2020 年 11 月），20 页。https://doi.org/10.1145/3427333[26] Shota Yamanaka、Hiroki Usuba、Junichi Sato、Naomi Sasaya、Fumiya Yamashita 和 Shuji Yamaguchi。2024。Figma 的 Tappy 插件：预测开发中的智能手机用户界面元素的点击成功率。arXiv:2411.00381 [cs.HC] https://arxiv.org/abs/2411.00381[27] Shota Yamanaka、Hiroki Usuba、Haruki Takahashi 和 HOMEI MIYASHITA。2020。用于预测手动追踪成功率的伺服高斯模型：一维移动目标的路径转向与追随。载于第 33 届年度 ACM 用户界面软件与技术研讨会论文集。844–857。[28] Difeng Yu、Hai-Ning Liang、Xueshi Lu、Kaixuan Fan 和 Barrett Ens。2019。虚拟现实环境中指向选择任务的端点分布建模。《ACM 图形学汇刊》38，6，论文编号 218（2019 年 11 月），13 页。https://doi.org/10.1145/3355089.3356544

[29] 郑雅雯、Jin Huang、Hao Zhang、边玉龙、刘娟、杨成磊、Feng Tian 和孟祥旭。2025。三维三元高斯模型：对虚拟现实中三维移动目标选择的指向不确定性进行建模。《国际人机交互研究期刊》198（2025），103454。https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2025.103454