arXiv:2602.00973v1 [cs.HC] 1 Feb 2026

探索基于雷达的障碍物可视化，以提升无摄像头户外虚拟现实中的安全性和临场感

AVINASH AJIT NARGUND, 美国加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校
ANDREW L. HUARD, 美国加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校TOBIAS HÖLLERER,美国加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校MISHA SRA,美国加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校

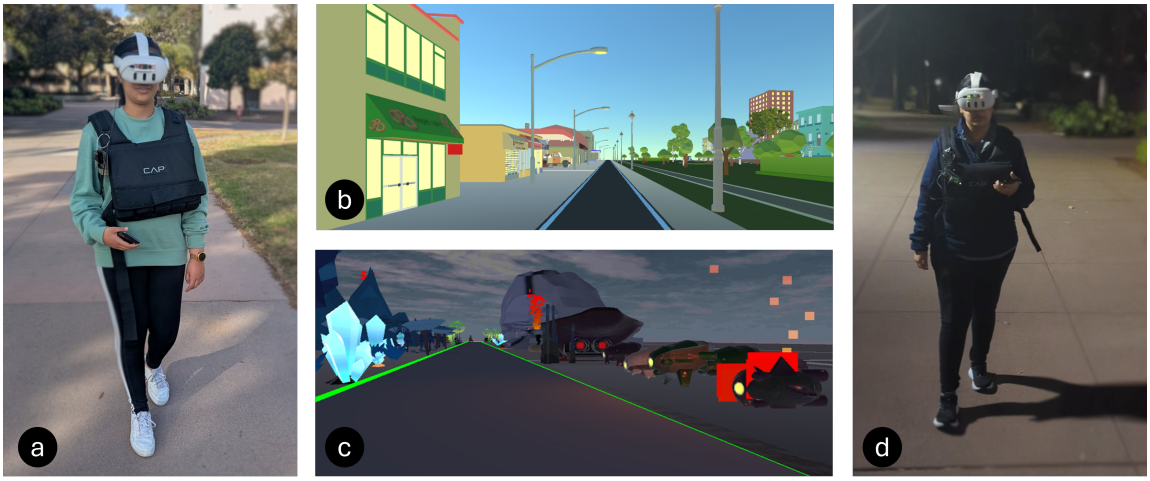


图 1. 我们研究如何可视化毫米波检测到的旁观者和障碍物，以提升户外虚拟现实中的安全性、态势感知和临场感。首先，我们使用 WaveWalker [28] 在城市主题环境（b）中、不同光照条件（a、d）下验证了一套无摄像头感知流程。在此基础上，我们在外星主题环境（c）中开展了可视化研究，比较了三种障碍物表征：叙事内外星人化身、叙事外人类化身和抽象点云。结果揭示了用户体验中的不同权衡，凸显了毫米波户外虚拟现实系统需要采用灵活多变的可视化策略。

户外虚拟现实 (VR) 将用户置于动态物理环境中，他们沉浸在虚拟场景时，必须时刻留意现实世界中的障碍物，包括静态结构和移动的旁观者。这种双重需求给用户安全和临场感都带来了挑战。毫米波 (mmWave) 雷达无需采集可识别的视觉图像即可检测障碍物，为基于摄像头的传感提供了一种保护隐私的替代方案；然而，如何有效地向用户传达其稀疏的空间信息，仍有待深入研究。在本研究中，我们开发并验证了 WaveWalkerClone，这是对 WaveWalker 系统的复现 [28],

作者联系信息：Avinash Ajit Nargund，anargund@ucsb.edu，电气与计算机工程，加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校，美国加利福尼亚州圣塔芭芭拉；Andrew L. Huard，ahuard@ucsb.edu，电气与计算机工程，加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校，美国加利福尼亚州圣塔芭芭拉；Tobias Höllerer，holl@cs.ucsb.edu，计算机科学，加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校，美国加利福尼亚州圣塔芭芭拉；Misha Sra，sra@cs.ucsb.edu，计算机科学，加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校，美国加利福尼亚州圣塔芭芭拉。

允许免费制作本作品全部或部分内容的数字副本或纸质副本，供个人使用或课堂教学使用，但不得为盈利或商业利益而制作或分发副本，且副本首页必须包含本声明和完整引文。必须尊重本作品中由作者以外的其他方拥有版权的内容。注明出处后可以摘录。若要以其他方式复制、再版、发布到服务器或重新分发至列表，必须事先获得明确许可和/或支付费用。请通过 permissions@acm.org 申请许可。© 2018年 版权所有者/作者所有。出版权已授权给 ACM。提交至 ACM 的稿件

以在各种户外光照条件下建立可靠的基于雷达和 GPS–IMU 的感知能力（n = 9）。在验证其可行性的基础上，我们开展了一项用户研究（n = 18），比较了三种针对雷达探测障碍物的可视化技术：（1）叙事内外星人化身，将障碍物视觉融入虚拟叙事；（2）叙事外人类化身，将障碍物表现为与虚拟叙事不一致的人类；（3）以障碍物为中心的抽象点云，在不引入拟人化或叙事关联的情况下传达空间数据。结果表明，三种方法均能支持用户安全和态势感知，但在感知努力、挫折感和用户偏好方面各有取舍。定性反馈还揭示了用户在不同条件下反应各异，凸显了“一刀切”方法的局限性。最后，我们总结了户外虚拟现实系统中障碍物可视化的设计考量，以期在沉浸感、安全性和旁观者隐私之间取得平衡。

ACM概念：• **请勿使用此代码 → 请为您的论文生成正确的术语**; 请为您的论文生成正确的术语; 为您的论文生成正确的术语; 请为您的论文生成正确的术语。

附加关键词和短语：请勿使用此代码，请使用适合您论文的正确术语

ACM参考格式：
Avinash Ajit Nargund、Andrew L. Huard、Tobias Höllerer 和 Misha Sra。2018年。《基于雷达的障碍物可视化：支持无摄像头户外虚拟现实中的安全性与临场感探索》。载于论文集：请从权利确认邮件中填写正确的会议名称（会议简称 '*XX*）。ACM，纽约州纽约市，19页。https://doi.org/XXXXXXX.XXXXXXX

1 引言

户外虚拟现实（VR）体验（例如步行应用 DreamWalker [52]）有望带来新形式的交互式参与。尽管室内虚拟现实支持游戏或导览旅游等活动，但其受到房间尺度边界的限制，并且通常依赖人工移动技术，这可能会削弱用户的临场感 [44]。户外虚拟现实利用完整规模的环境来实现更自然的移动，为解决虚拟现实移动这一挑战提供了潜在方案 [1]，并推动了混合现实体验的愿景 [36]。

要实现安全的户外虚拟现实，需要应对追踪、空间感知和旁观者隐私方面的挑战。商用虚拟现实头显通常依赖基于摄像头的追踪和透视视频，但这些方法在多变的户外环境中并不可靠（例如日光变化或雾霾），追踪范围有限（例如 Meta Quest 3 的追踪范围为 10–15 英尺），还会引发旁观者的隐私问题 [7, 14]。为克服这些限制，户外虚拟现实系统可以采用替代传感器。在本研究中，我们创建了 *WaveWalkerClone*，这是对 WaveWalker 系统 [28], 的复现，它将 GPS–IMU 融合用于定位，并利用毫米波（mmWave）雷达检测静态与动态障碍物。尽管毫米波能够解决摄像头的许多缺点（例如光照、天气、范围或隐私问题），但它产生的空间数据较为稀疏，因此如何以最佳方式向用户呈现障碍物信息，仍是一个有待解决的问题。

以往研究探索了在虚拟现实中呈现现实世界中的障碍物的各种技术，包括虚拟化身、地图或合成模型等叠加层 [12, 22, 51, 52], ，以及点云和深度网格等视觉编码 [18, 20]。这些策略展示了平衡安全性与沉浸感的不同方式，但相关研究主要聚焦于室内环境或基于摄像头的系统。要将这些方法扩展到户外虚拟现实，就需要在稀疏、无摄像头的感知约束下重新思考可视化方式。

在本研究中，我们首先在不同的户外光照条件下验证了 *WaveWalkerClone* ，以确认毫米波–GPS–惯性测量单元处理流程能够可靠地检测附近的旁观者，同时不损害用户安全或沉浸感。在完成这一步系统可行性验证后，我们开展了主要研究，比较了三种在虚构的外星人虚拟现实环境中呈现毫米波检测到的旁观者的可视化技术。这些技术的区别在于，其视觉呈现是作为属于虚构世界的实体显示，还是作为感知上存在但主题上不协调的呈现形式显示。为刻画这一区别，我们借鉴了游戏与媒体研究中的叙事内概念。根据提交至 ACM 的稿件

Galloway [9], 我们将叙事内元素定义为符合虚拟环境内部逻辑和叙事框架的元素，将故事外元素定义为违背该框架的元素。根据这一定义，我们测试了叙事内外星人化身、叙事外人类化身以及抽象点云基线。

我们的工作做出了以下贡献：

- 对*WaveWalkerClone*进行了实证验证，结果表明，毫米波雷达结合 GPS–IMU 跟踪，在各种户外光照条件下均能可靠运行，并有望支持安全的户外虚拟现实。
- 对三种基于雷达的障碍物可视化技术进行了比较评估，揭示了户外虚拟现实中安全性、临场感与沉浸感之间的权衡。
- 在用户对基于毫米波的*WaveWalkerClone*的偏好与使用体验基础上，提出了将障碍物信息整合到保护隐私的户外虚拟现实系统中的设计考量

总而言之，我们的工作迈出了一步，让户外虚拟现实既安全又沉浸，同时保护旁观者隐私。通过验证 WaveWalkerClone 并比较障碍物可视化技术，我们为支持隐私保护型户外虚拟现实的雷达系统提供了初步证据和设计考量，为未来的混合现实体验奠定了基础。

2 相关工作

我们的工作建立在先前研究的基础上，这些研究致力于提升用户对追踪区域边界以及其近旁静态与动态障碍物的感知，以支持安全且沉浸式的虚拟现实体验。

2.1 用户对周围环境的感知

虚拟现实面临的一项核心挑战是，用户与物理环境隔绝，因此存在与边界、家具或旁观者发生碰撞的风险 [29]。先前的工作主要通过两种方式应对这一问题：帮助用户感知活动区域边界，以及呈现追踪空间内的障碍物。

HTC Vive 的 Chaperone 和 Meta Quest 的 Guardian 等消费级系统，会在用户接近预先设定的活动区域边界时提供提示，例如显示网格或切换到透视视频。研究原型通过重定向行走 [8, 33], 重置或干扰项 [30, 48], , 以及音频或触觉反馈等替代感官通道 [10, 47] , 进一步拓展了这一思路，引导用户远离边界。这些技术在室内效果显著，但其前提是边界固定，因此未必适用于户外环境；户外空间往往没有明确边界，障碍物也难以预测。

除了固定边界外，用户还必须留意静态障碍物（如家具）和动态障碍物，尤其是可能意外进入空间的旁观者；其不可预测的行为和移动会带来额外挑战 [22, 29]。为此，通过有选择地将现实世界元素融入虚拟现实，在实现安全交互的同时避免给用户造成过重负担，从而增强了旁观者感知 [26]。然而，其他方法表明，即使是抽象的可视化，也能有效提醒用户附近存在障碍物或旁观者，同时保持沉浸感[11, 46]。

虽然以往研究通过边界感知、障碍物检测、旁观者通知系统以及将现实世界几何结构纳入虚拟现实来探索虚拟现实中的安全性，但这些工作大多局限于模拟的公共场景，或光照稳定、预先绘制地图的室内空间。对于户外虚拟现实场景中的障碍物表征应如何设计，目前所知甚少；在这些场景中，传感信息稀疏，障碍物可能是动态的，而旁观者隐私又不允许将摄像头用作



图2. 一名用户佩戴*WaveWalkerClone*户外虚拟现实系统，该系统包含一部提供GPS和惯性测量单元数据的Pixel 8智能手机。Jetson Nano融合GPU-IMU数据，处理TI毫米波雷达数据，并将输出流式传输至Meta Quest 3头戴式显示器。

传感设备。基于这些室内研究的见解，我们通过视觉表征静态与动态障碍物（使用 *WaveWalkerClone* 检测），探究户外虚拟现实中的旁观者感知与障碍物感知，以帮助提升用户的安全感。

2.2 障碍物可视化策略

为提供障碍物与旁观者感知，研究人员开发了若干不同的可视化策略。这些技术包括用虚拟代理替换真实物体 [42, 50], 、叠加预扫描几何 [18, 20], 、将实时RGB-D采集合成到虚拟世界中 [17], ，或融合附近物体的基于深度的表征 [5]。这些技术能够向用户传达现实世界中的障碍物，但在户外应用时，由于依赖密集视觉感知，往往可能破坏沉浸感或引发隐私问题。

其他研究探索了更为抽象的编码，例如点云或网格，以提供对障碍物最低限度但有效的空间感知 [24]。尽管此类表征有助于安全性，但它们可能无法自然融入虚拟环境的叙事世界。相反，针对现实世界物体的具象化身或代理可以增强连贯性与参与度 [42, 50], ，但当障碍物处于动态或不可预测状态时，它们如何影响感知安全性仍不明确。

总体而言，这些研究展现了用于传达环境危险的多种可视化技术。然而，它们主要是在室内、基于摄像头的情境中进行研究的。对于传感数据稀疏且注重隐私保护的户外虚拟现实，抽象式与具象式方法应如何设计，仍鲜有探索。

2.3 叙事内表征

叙事内这一概念与叙事世界中的元素有关。在虚拟现实中，该概念被用于描述那些作为虚拟环境自然组成部分出现的界面线索，而非叠加层或外部信号 [9, 38]。研究表明，叙事内表征有助于增强电影式VR等应用中的临场感和连贯性

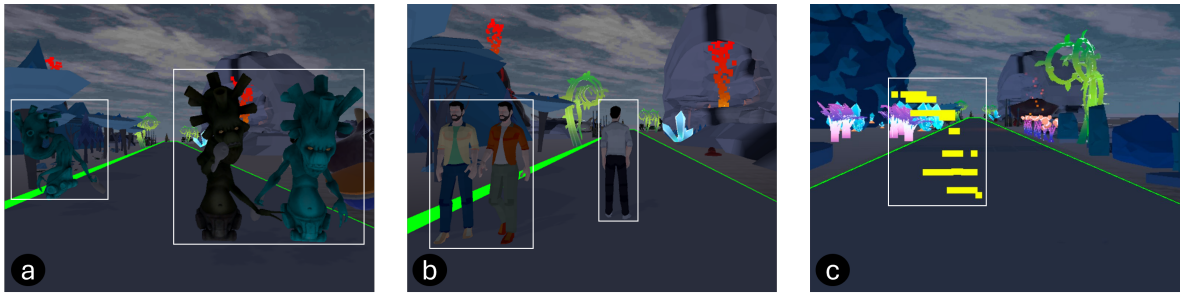


图3. 在我们的可视化研究中，参与者探索了一个外星主题虚拟现实环境，其中现实环境中的旁观者通过三种可视化策略呈现：（a）叙事内外星人化身，（b）叙事外人类化身，以及（c）抽象点云。为便于辨识，图中用边界框标出了研究参与者在虚拟现实中看到的旁观者表征。

以及重定向行走 [4, 37, 48]。进一步佐证这一点的是，Gottsacker 等人 [12] 测试了五种不同的中断通知对用户体验的影响，主要发现是用户最偏好叙事内通知。

先前研究表明，叙事内线索能够增强沉浸感，但它们在安全关键情境中的作用尚不明确。具体而言，对于如何在虚拟现实中呈现现实环境中的静态或动态障碍物，叙事内与故事外方法会如何影响用户对安全性的感知和空间感知，目前所知甚少。现有研究大多聚焦于娱乐或引导任务，因此，当目标是在移动过程中保障用户安全时，应如何设计可视化策略仍有待探讨。本研究的动机源于叙事内设计的叙事优势与户外虚拟现实中空间感知的功能需求之间的具体权衡。

尽管既有研究已提出用于虚拟现实中边界感知、障碍物可视化和叙事内设计的技术，但这些方法主要是在室内、基于摄像头的场景中进行研究的。同时，虽然叙事内设计已知能够增强沉浸感，但它在提升用户安全感方面的具体作用，在虚拟现实研究中仍未得到充分探索。据我们所知，我们的工作是首批在此类情境下，通过实证比较叙事内、故事外和抽象障碍物可视化的研究之一，并采用毫米波雷达作为隐私保护型感知方式。

3 系统设计

为了评估户外虚拟现实中的可视化技术，我们需要一个无需摄像头、能够检测现实环境中障碍物的系统。我们创建了 *WaveWalkerClone*，这是对原始 WaveWalker 系统的复现 [28], ，该系统结合 GPS–IMU融合进行定位，并利用毫米波（mmWave）雷达检测静态与动态障碍物。此设置支持户外运行，无需持续录像，从而保护旁观者隐私。

图 2 展示了我们实现中使用的组件：

- **Google Pixel 8：**提供 GPS 和 IMU 数据。
- **德州仪器 IWR6843AOP 毫米波雷达：**检测静态和动态物体。
- **Meta Quest 3 头戴式显示器：**配备了安装好的雷达模块。
- **NVIDIA JetsonNano：**通过误差状态卡尔曼滤波器 (ESKF) 融合 GPS–IMU 数据， [45], 处理雷达数据，并将输出流传输至头戴式显示器。

雷达模块通过 USB-串口连接到 Jetson，其他组件则使用 ROS [32] 通过 Wi-Fi 通信。用户的姿态更新以 20 Hz 发布，障碍物检测以 10 Hz 发布。我们根据户外试点测试选择了这两个频率。该系统为我们的研究提供了基础平台。在研究1中，我们评估了

WaveWalkerClone 在不同光照条件下的功能，以验证其在户外安全使用的可行性。在研究 2 中，我们基于这一验证，探究不同的可视化技术如何传达障碍物信息，从而增强用户的安全感。

3.1 虚拟现实应用程序

我们使用 OpenXR[2] 后端，在 Unity[1] （版本 2022.3）中开发了虚拟现实应用程序。我们以 WaveWalker [28] 的点云可视化为基准，新增了两种可视化模式，分别采用叙事内和故事外虚拟化身，以考察不同策略如何影响用户安全和沉浸感。

在系统验证（研究 I）中，我们构建了一个虚拟现实环境，其空间布局与校园中的一处区域严格保持 1:1 对应，并以 OpenStreetMap[3] 的三维建筑与路径数据为基础。我们在此布局上叠加了建筑、行人、车辆和树木等城市主题的 Unity 资源，打造沉浸式城市环境（图 1(b)）。毫米波雷达检测到的障碍物以点云形式呈现在该环境中，使我们能够评估 *WaveWalkerClone* 在不同户外光照条件下用于户外虚拟现实的可行性。

在可视化研究（研究二）中，我们设计了一个以外星行星为背景的虚拟现实环境，同时保留底层的校园空间布局，以维持虚拟空间与实体空间之间的对齐（图 1(c)）。参与者需要在环境中实际步行，前往约 200 米外的一艘宇宙飞船，并安全绕开雷达感知系统检测到的附近旁观者。为支持移动，我们保留了可行走路径和实体地标；而建筑物和不可通行区域则替换为主题协调的元素，例如未来主义建筑、大型巨石和茂密的外星植被。我们设定了一个叙事：用户正在穿越陌生的外星世界，前往自己的航天器；这一设定为环境及非人类实体的存在提供了故事内的合理解释。这种叙事框架为用户在移动和避让过程中解读障碍物表征提供了一致的故事内情境。在此环境中，我们考察了附近旁观者的不同可视化技术如何影响感知安全性和临场感。具体而言，我们评估了三种可视化条件（图 3）：

1. 外星人化身（叙事内）：旁观者被呈现为外星角色，其外观、运动和行为均符合外星世界的设定。2. 人类化身（故事外）：旁观者被呈现为身着当代休闲服装的人物，与外星环境在视觉上格格不入。3. 点云（WaveWalker [28] 的抽象基线）：旁观者被呈现为动态点云，用于指示位置和运动，不包含叙事或角色线索。

3.2 可视化实现

为了将雷达检测结果转化为虚拟现实中的有效提示，我们制定了一套规则，用于确定如何在虚拟环境中追踪、创建和维护障碍物。设计目标有两个：（i）确保可视化能够及时响应并支持户外安全性；（ii）清晰呈现静态与动态障碍物。

一项关键的设计决策是将障碍物表示为虚拟化身，而不是抽象标记。先前研究表明，在虚拟现实中接近虚拟化身会引发用户可测量的生理反应，例如皮肤电导升高，从而增强用户对附近移动的感知 [25]。因此，我们预期，与抽象标记相比，虚拟化身能更显著地传达障碍物

[1] https://unity.com/ [2] https://www.khronos.org/openxr/ [3] https://www.openstreetmap.org/

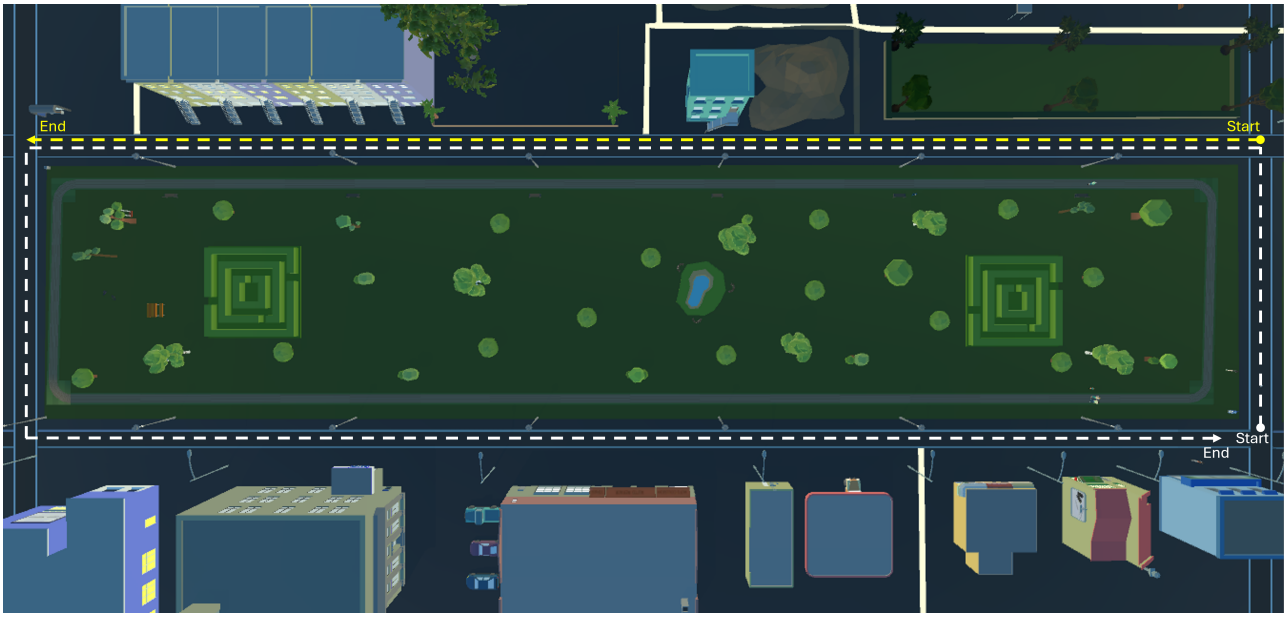


图 4. 研究 I 中用于城市主题户外虚拟现实环境的校园广场俯视图。在初步系统评估中，参与者沿整个广场步行约 500 米（白色虚线）。在可视化研究中，参与者沿一侧走较短的 200 米路线（黄色虚线），从圆圈处出发，至箭头尖端结束。

的存在，尤其是动态障碍物的存在。我们保留点云作为抽象基线，以便进行对比评估。

我们将用户周围 8 米 ×6 米 的区域定义为感兴趣区域（ROI），这与雷达的有效范围（略超 8 米）以及铺装道路的宽度（每侧 ±3 米）相对应。仅跟踪并可视化此感兴趣区域内的障碍物。以这种方式限定感兴趣区域，有助于减少超出有效步行距离范围的虚假检测，同时仍覆盖与避免碰撞最相关的区域。

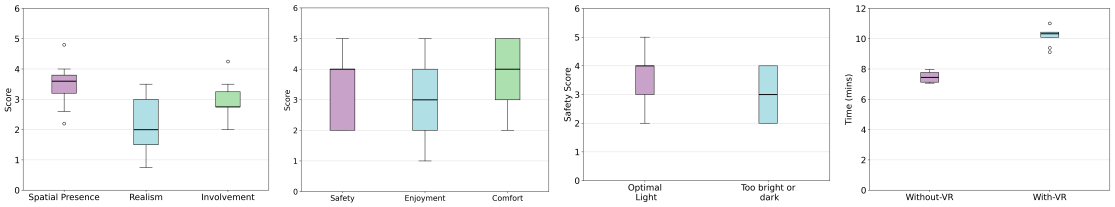
通过大量户外试验，我们调整了雷达跟踪参数，以尽量减少漏检，并将轨迹创建延迟——即障碍物进入感兴趣区域至其轨迹创建所需的时间——控制在 0.4–0.6 秒。对于步行速度相遇（1.2 至 1.4 米/秒 [2]），这一延迟可以接受；即使按较保守的 2.8 米/秒接近速度计算（用户和旁观者均在移动），用户在此时间内也只会移动约 1.5 米，足以留出避让距离。此外，人类视觉反应时间平均约为 250 毫秒 [41],，因此用户在系统与人体综合响应时间内移动的总距离仍远小于 8 米的感兴趣区域范围，从而确保安全性。

感兴趣区域内的所有障碍物均被同等对待，包括行人、骑自行车者以及静态物体（如锥桶或自行车），这是因为WaveWalker的 [28] 使用了基于DBSCAN聚类的目标检测器，我们在*WaveWalkerClone*中复现了该检测器。虽然该检测器无法提供语义标签或朝向，但详细分类对我们的任务并非必需。先前关于代理物体的研究 [42] 表明，提示某一空间是否被占用通常足以实现碰撞规避。

可视化行为根据不同条件进行了调整。在点云条件下，每个被追踪的物体都使用累积三帧（0.3 秒）的雷达点进行渲染，从而减少抖动，同时不会引入可感知的延迟。在

化身条件下，静态障碍物（包括静止行人）以闲置化身的形式呈现，并带有轻微动画（如转头、呼吸），以减轻先前虚拟现实研究发现会损害可信度的“雕像般僵硬”效果[37]。对于动态障碍物，我们优先保证轨迹精度，同时调整运动行为以维持叙事一致性。故事外的人类化身通过全身行走动画行走，以模仿真实步态；而叙事内外星人化身则沿路径平滑滑行。这种对比使我们能够检验叙事一致性与表征清晰度如何影响用户体验 [9]。

最后，我们实施了持久化规则，以减少视觉杂乱和困惑。当物体离开感兴趣区域时，其化身仍留在原地，仿佛停止了移动，同时继续显示细微的闲置动画。用户身后的过期轨迹会逐渐淡出。我们选择平滑淡出而非立即移除，以避免突兀的“弹出”效果，这与先前空间安全可视化中已证明有助于保持沉浸感的混合技术一致 [17]。



(a) IPQ 评分 (b) 愉悦感与舒适度 (c) 感知安全评分 (d) 行走时间

图5. 本图展示了我们初步系统评估（研究 I）的结果。图中显示：(a) IPQ 的空间临场感、真实感和投入感量表得分，(b) 感知安全性、愉悦感和舒适度评分，(c) 不同光照条件下的感知安全性，以及 (d) 使用虚拟现实与不使用虚拟现实条件下行走时间的比较。

4 用户研究 I：系统评估

我们首先开展了一项小规模可行性研究，以评估我们的*WaveWalkerClone* 系统在户外环境中的安全性和舒适度（N=9）。研究地点是一个繁忙的校园广场，人流持续但没有机动车交通，选择该地点是为了近似公园、广场和人行道等公共步行空间的特征。我们旨在评估该系统在真实户外条件下是否能够可靠运行，包括不同的光照以及不可预测的旁观者移动。

4.1 参与者

我们招募了九名参与者（5名男性、3名女性、1名非二元性别；年龄18–24岁，中位年龄19岁）。四人的虚拟现实经验有限，三人是频繁用户（游戏或课程作业）。所有参与者均获得20美元的时间补偿，本研究已获得当地机构审查委员会批准（方案编号已匿名化）。为评估传感器在户外的功能，参与者在不同的户外光照条件下完成了研究：烈日（n=2）、黄昏/黑暗（n=2）、毛毛雨（n=1）和温和日光（n=4）。

4.2 流程

参与者在研究开始前提供了知情同意，并完成了人口统计学问卷。在开始使用 VR 条件之前，他们听取了步行路线（图4）的简要说明，并观看了点云障碍物可视化。这是研究 I 中使用的唯一可视化。每位参与者完成了两次平衡顺序的步行圈数（一次使用 VR，一次提交至 ACM 的

不使用）绕校园广场行走。在使用 VR 的一圈结束后，参与者填写了 Igroup 临场感问卷（IPQ）[34, 39, 40], 模拟器晕动症问卷（SSQ） [21], 以及 NASA 任务负荷指数（NASA-TLX） [16], ，并完成了针对感知安全性、舒适度和愉悦感的自定义 5 点李克特量表评分。不使用 VR 的一圈为步行速度提供了基线。

4.3 结果

如图 5 所示，参与者报告了较强的空间临场感（$M = 22.130$）和投入感（$M = 17.724$），但真实感评分较低（$M = 12.624$），这表明环境设计还有进一步细化的空间。参与者对感知安全性（$M = 3.95$）和舒适度（$M = 3.95$）的评价较为积极，且在所有光照条件下均保持一致，表明这种体验在户外环境中具有稳健性。愉悦感评分处于中等水平（$M = 35$），反映出改善虚拟内容仍有空间。

使用 VR 条件下的步行速度（$M = 0.78$ m/s）低于基线条件（$M = 1.08$ m/s）。在使用 VR 条件下，参与者在全程（500 m）平均进行了 4.6 次路线修正（SD=1.15）。所有参与者均安全地完成了步行。SSQ 评分较低（总分 $M = 5.4$），且没有参与者报告晕动症。

4.4 讨论

无论光照条件如何，较高的感知安全性评分都表明，WaveWalker [28] 适用于户外虚拟现实。较低的 SSQ 评分以及未报告晕动症的情况说明，该系统能够有效支持用户在虚拟现实中行走，同时保持舒适度。与基线相比，步行速度有所下降，这可能是因为参与者佩戴虚拟现实头显时更加谨慎；这一结果与先前研究 [27], 一致，也可能与视觉探索虚拟环境所需的停留时间增加有关。

5 用户研究 II：可视化实验

研究 I 表明，该系统使用起来足够安全、舒适，因此我们进一步评估障碍物表示如何影响用户体验。研究 II 比较了三种针对静态与动态障碍物的可视化技术，以了解它们对临场感和步行行为的影响。本研究首次对无摄像头户外虚拟现实系统中的障碍物可视化进行了比较评估。

5.1 参与者

先验功效分析（中等效应量 $f = 0.25, \alpha = 0.05, 1 - \beta = 0.8$，重复测量间相关性为 =0.7）表明，18 人的样本量已足够。我们招募了另一组 18 名参与者（9 名男性、9 名女性；年龄 18–23 岁，中位数 = 20），他们自述对虚拟现实有中等程度的熟悉度（在 5 点李克特量表上为 $M = 3.2$ ）。他们均未参加过研究 I。为提高生态效度，我们没有明确控制光照条件，因此有 10 名参与者在非理想光照条件下（过亮或过暗）完成研究，另有 8 名参与者在光照条件良好的环境中完成研究。所有参与者均提供了知情同意，并获得 15 美元的报酬；本研究已获当地机构审查委员会批准（方案编号：匿名）。

5.2 流程

每位参与者沿校园广场的一段 200 米路段（图 4 中的黄色虚线）步行三次，每次采用一种可视化条件，并使用拉丁方设计对顺序进行平衡。与研究 I 一样，为确保安全性，所有步行过程中均由一名人工陪护人员陪同。选择 200 米的距离是为了确保参与者有足够的接触时间

1. 您是否及时注意到了动态障碍物？ 2. 我害怕与正在移动的人发生碰撞 3. 我害怕与正在站立/坐着（静止）的人发生碰撞 4. 我感到不舒服，因为我无法判断周围其他人的位置 5. 我感到不舒服，因为我无法判断自己在现实世界中的位置 6. 我始终知道自己与周围其他人相距多远 7. 步行时您感觉有多安全？

表 1. 研究二中使用的自定义感知安全问卷。回答采用 5 点李克特式量表记录（1=从不，5=总是）。题项改编自碰撞焦虑问卷（CAQ） [35]，用于评估参与者在户外虚拟现实移动期间的意识和安全感。

（每次试验约 3-4 分钟），以体验每种可视化，并提高自然遇到旁观者的可能性。

实验开始前，参与者接受了叙事诱导，研究人员向他们说明了任务目标：穿越敌对外星景观，抵达宇宙飞船。随后，他们在虚拟现实中完成了为时两分钟的教程。教程中，研究人员引导员被用作障碍物，以演示障碍物的出现方式，确保参与者在研究期间能够识别它们。体验每种条件后，参与者填写了 Igroup 临场感问卷（IPQ） [34, 39, 40], 、NASA-TLX [16], 、跨现实交互问卷（CRIQ）[12], 以及改编自碰撞焦虑问卷（CAQ）的自定义问卷 [35] ，如表 1 和表 2 所示。这些工具共同评估了空间临场感、任务负荷、意识和碰撞相关焦虑。研究结束时，参与者指出了自己偏好的可视化条件，并就感知安全性和用户体验提供了开放式反馈。

1. 我害怕与正在移动的人发生碰撞 2. 我害怕与站着/坐着（静止）的人发生碰撞 3. 我无法判断周围其他人的位置，因此感到不自在 4. 我无法判断自己在现实世界中的位置，因此感到不自在 5. 我关注的是其他人的位置，而不是应用程序 6. 我始终清楚自己与周围其他人相距多远 7. 步行时，为了避免碰撞，我会克制或缩小自己的动作幅度

表 2. 研究二中使用的定制版碰撞焦虑问卷。回答采用 5 点李克特量表（1=从不，5=总是）进行记录。题项改编自碰撞焦虑问卷（CAQ） [35] ，用于评估参与者在户外虚拟现实移动过程中的碰撞相关焦虑。

5.3 结果

我们报告感知安全性、碰撞焦虑、空间临场感和任务负荷方面的结果，随后介绍参与者偏好和定性反馈。

5.3.1 数据分析。我们对所有因变量进行了夏皮罗-威尔克检验，以评估正态性。满足正态性假设时，我们采用重复测量方差分析；否则采用弗里德曼检验。所有事后两两比较均采用邦费罗尼校正。提交至 ACM 的稿件

5.3.2 障碍物与定位指标。 在所有条件下，每位参与者平均在雷达视野内遇到 26.3（$\sigma = 5.28$）个动态障碍物（例如行人、骑自行车者）。系统成功检测并为超过 96% 的这些情况渲染了可视化。总体漏检率为 3.3%，大多数漏检对应于在雷达探测范围边缘（8m）或视野处以超过 8 英里/小时的速度移动的物体（±70°。用户定位同样稳定，在 200 米步行路径上的平均累积误差为 1.64m （$\sigma = 0.93$），平均更新间隔为 0.051s （$\sigma = 0.0015$）。

5.3.3 感知安全性。 参与者在所有可视化条件下普遍报告了较高的感知安全性（图 7a）。重复测量方差分析显示，对于问题：“你是否及时注意到了动态障碍物？”（$F = 4.63$，$p = 0.017$）存在显著差异。事后检验表明，与外星人化身相比，点云能显著更快地检测到动态障碍物（$p = 0.043$），而点云与人类化身之间，以及两种化身条件（叙事内与故事外）之间均无显著差异。

5.3.4 碰撞焦虑。所有条件下的碰撞焦虑评分均较低（图 7b），且未观察到显著差异。

5.3.5 空间临场感。所有条件下的空间临场感评分均处于中等水平，且彼此相近（图 7c）。未发现具有统计显著性的差异，表明可视化方式的选择并未导致可检测到的临场感变化。

5.3.6 任务负荷。尽管不同可视化条件下的 NASA-TLX 总评分没有显著差异（$F = 0.59$，$p = 0.54$，$\eta_p^2 = 0.03$），努力程度和挫折感评分却呈现出相反的模式，且效应量为中到大。叙事内外星人化身的努力程度评分最低（$M = 30.3$），其次是叙事外人类化身（$M = 37.5$）和抽象点云（$M = 41.1$）（$F = 2.86$，$p = 0.071$，$\eta_p^2 = 0.14$）。挫折感则呈现相反模式：抽象点云的评分最低（$M = 17.8$），其次是叙事外人类化身（$M = 19.2$），叙事内外星人化身的评分最高（$M = 26.9$）（$F = 2.62$，$p = 0.08$，$\eta_p^2 = 0.13$）。尽管这些子量表差异未达到统计显著性阈值 $p < 0.05$，但中到大的效应量表明，更大的样本量或许能够揭示沉浸感与认知简易性之间的权衡。

5.3.7 偏好与反馈。 尽管量化得分相近，参与者仍表达了各自不同的偏好。18 名参与者中有 12 名偏好叙事内外星人化身，认为它与叙事契合，且运动更加流畅。然而，有些人觉得它含义模糊，不确定它是否可以交互。抽象点云被形容为“清晰但抽象”，因其安全性受到认可，但也被认为沉浸感较低。叙事外人类化身很少受到青睐，有几位参与者指出，它们在外星主题环境中显得“格格不入”。这些看法与先前研究的发现一致：在空间感知任务中，用户更偏好叙事内线索 [12]。

总体而言，结果表明，尽管所有可视化样式都支持安全导航，但努力程度、挫折感和用户偏好方面的细微差异，反映了清晰度、沉浸感与认知负荷之间存在显著的权衡。

5.3.8 定性结果。 参与者在每种条件结束后都提供了书面反馈，我们采用归纳式内容分析对其进行编码 [23]。编码由两名研究人员完成，并通过讨论解决分歧。反馈内容归纳为三个主要的安全相关主题，以及一组可视化偏好。

安全性。 尽管参与者普遍感到安全，但偶尔出现的安全感缺失可归因于三个问题：

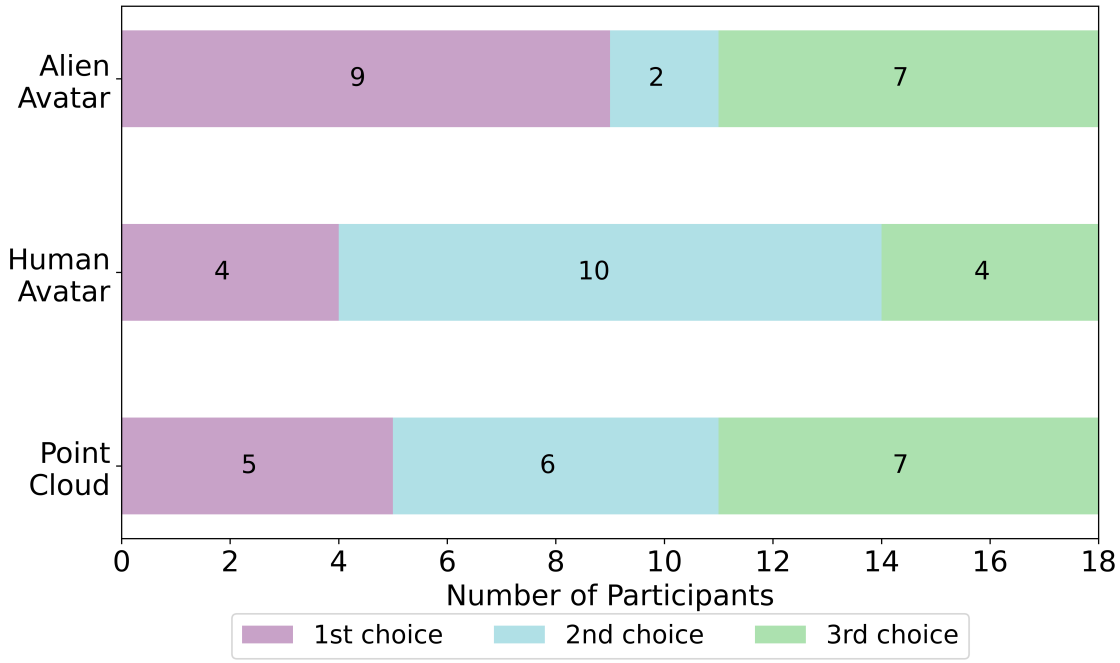


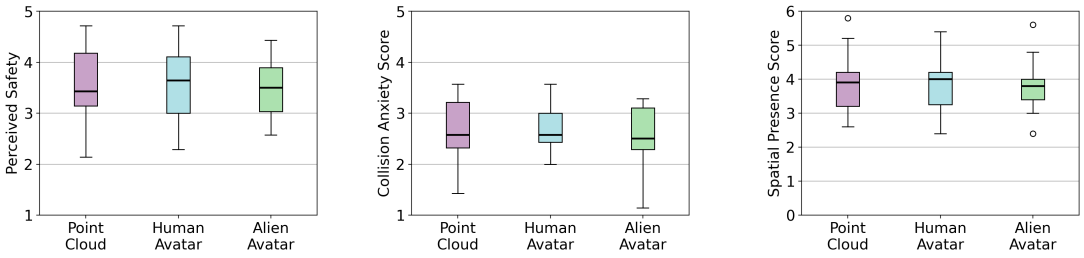
图6. 图示了三种可视化类型的参与者偏好。叙事内外星化身被9名参与者选为首选，而叙事外人类化身被10名参与者排在第二位。抽象点云在各排名中的分布更为均衡，有7名参与者将其认定为最不偏好的选项。

漏检障碍物：几位参与者（P2、P3、P10、P12、P16、P18、P20）表示，当他们能听到附近有旁观者，却在虚拟现实中看不到相应的呈现时，会感到不适。这种感官不匹配是造成不适的原因之一。例如，一位参与者指出：“……我看不到他们，但知道他们就在附近，这可能让我有点不舒服。”（P10，叙事内外星人化身）。另一位参与者解释说，他们感到不安全：“只有在听到周围有人、却看不到外星人相应移动时，才会这样。”（P2，叙事内外星人化身）。

幽灵轨迹：多径雷达反射偶尔会生成“弹出”到场景中的“幽灵”障碍物。7名参与者（P5、P6、P13、P14、P15、P18、P20）报告了幽灵轨迹，在共计54次试验中出现了8次。一名参与者描述道，“……那个外星人就在我正前方，我不得不停下，但实际上那个人并没有那么近”（P20，叙事内外星化身）。另一名参与者在经历幽灵轨迹时表示，“有人正好跑到 [他们]面前”（P5，叙事外人类化身）。

障碍物的位置和范围： 参与者发现，虚拟化身有助于判断障碍物的位置，而点云则更能呈现人群的规模或密度。例如，一位参与者指出，虚拟化身让人更容易判断距离（“更容易把握他们离得有多近”，P19，叙事外人类化身）；另一位参与者则表示，点云让人更容易看出何时有很多人聚集在一起（“我能看出是否有更多人聚在一起”，P11，抽象点云）。

可视化偏好。 当被要求对条件进行排序时，参与者最常将叙事内外星人化身可视化选为首选（18 人中有 9 人），其次是抽象点云（18 人中有 5 人）和叙事外人类化身（4 提交至 ACM 的稿件



(a) 感知安全评分 (b) 碰撞焦虑评分 (c) 感知空间临场感水平

图 7. 为了解用户对研究二中所用可视化的感知，我们测量了三个关键实验因素。此图展示了参与者在三种可视化条件下的评分：(a) 感知安全性、(b) 碰撞焦虑和 (c) 空间临场感；三种条件分别为叙事内外星人化身、叙事外人类化身和抽象点云。

18 人中）。叙事内外星人化身因其叙事一致性而受到重视，但很少被排在第二位（18 人中有 2 人），表明反应存在两极分化。抽象点云因清晰度而更受青睐，但因缺乏沉浸感而受到批评；叙事外人类化身则常被描述为与外星场景不协调。尽管各条件下的表现与安全性得分相近，主观偏好仍倾向于叙事内可视化。

这些结果表明，尽管三种可视化条件都保障了安全性，但它们在功能清晰度与叙事沉浸感之间各有取舍。

6 讨论与设计考量

我们的研究结果揭示了无摄像头户外虚拟现实系统中障碍物可视化设计的一些启示。在此，我们探讨如何在可视化选择中兼顾用户的安全感，以及营造沉浸、舒适且引人入胜的用户体验这一目标，并提出相关设计考量。

6.1 感知安全性与舒适度

在户外虚拟现实中，感知安全性既受追踪可靠性的影响，也取决于障碍物的呈现方式。尽管参与者始终表示感到安全，但我们的研究结果表明，安全性并非由单一因素决定，而是源于追踪稳定性、传感器覆盖范围和表征清晰度之间的相互作用。

路径偏差。 虚拟路径与实际路径之间即便出现轻微偏移，也会削弱用户对系统空间定位能力的信心。这些疏漏表明，户外虚拟现实中的安全性并不那么依赖绝对的位置精度，而更多取决于系统能否在偏差造成干扰之前及时提供修正。

传感器覆盖范围。 尽管单个雷达足以提供基本的安全保障，但其有限的视野以及易受多径信号反射影响的特性，仍会让人产生疑虑。这体现了一种权衡：最低限度的硬件配置虽能维持基本功能，但要在动态现实环境中增强信任，可能还需要更广的覆盖范围和冗余。

表征方式的作用。 不同的可视化样式提供了互补的安全提示。例如，虚拟化身能够有效呈现单个障碍物的位置和轨迹；相比之下，点云更能体现障碍物及障碍物群的密度和范围。这种权衡有助于解释一项重要的定量发现：尽管总体安全性评分相近，但在及时检测动态障碍物方面，点云的表现显著更好。这可能是因为点云所呈现的原始空间数据更能避免漏检或感官冲突，即便虚拟化身更有助于理解单个已检测物体的移动情况。未发现显著差异

总体评分表明，用户最终会利用特定情境中最显著的线索，这凸显了混合式或灵活设计的价值。

碰撞焦虑。 各条件下碰撞焦虑均未升高，这凸显了可靠性和一致性比风格差异更为重要。只要用户能够信赖稳定一致的障碍物提示，他们就能有信心地自然行走，不会犹豫。

设计启示。 这些模式揭示了提升无摄像头户外虚拟现实安全性的若干方向。细微的引导功能（例如地面引导带或周边漂移指示器）可以帮助用户自行纠正对齐误差。适时采用雷达锚定校正和多雷达融合，或许能够在保护隐私的同时解决幽灵伪影问题。将用于定位的虚拟化身与用于表示范围的抽象叠加层相结合的混合可视化，或许能兼顾沉浸感与清晰度。在密度较高或存在不确定性的环境中，叠加预测轨迹或强度渐变等紧迫性提示，可能有助于维持信任。

6.2 临场感

我们的研究结果表明，在户外虚拟现实中，用户的临场感或许较少取决于障碍物表征的视觉风格，而更多取决于感知—显示环路的稳定性和连贯性。与我们的预期相反，叙事内化身并未比其他可视化条件带来更强的临场感，这反而凸显了技术保真度和跨模态一致性的首要地位。

跟踪延迟。 即使是轻微的感知延迟，也会削弱环境稳定的印象。这些时刻表明，临场感不仅取决于视觉设计，还取决于系统在身体运动与环境响应之间保持同步的可靠程度。

虚拟形象运动。 当根据障碍物运动推断的方向估计存在噪声时，虚拟化身偶尔会以不可信的方式移动。这种行为真实感的中断削弱了可信度，说明临场感依赖于用户预期与系统输出之间的一致映射，而不仅仅依赖于视觉丰富度。先前的研究将此类不一致与可信度和参与度的降低联系起来 [19, 49]。

感官冲突。 跨模态不匹配，例如听到旁观者却没有相应的视觉线索，或看到幽灵轨迹却没有任何可听见的存在迹象，破坏了环境的连贯性。这些不一致表明，临场感既取决于感官通道的对齐，也取决于任何单一模态的保真度。已知这些跨模态不一致会因违背具身预期和多感官整合而干扰临场感[13, 31]。

可视化风格。 不同可视化类型之间的临场感没有显著差异，这表明障碍物表征发挥的作用更像是感知线索，而非沉浸式叙事元素。在此情境下，稳定可靠的提示可能比叙事内或风格上的连贯性所带来的益处更重要，这与碰撞焦虑反应中观察到的模式相呼应。

设计启示。 要在户外虚拟现实中支持临场感，除了可视化技术，还必须优先确保感知—显示管线的连贯性。通过机会式校准降低延迟，并引入基于雷达的定位更新，有助于维持空间一致性。当方向不确定时，与其采用暗示精确性的虚拟化身，不如使用抽象表征；而平滑处理或预测滤波器则有助于保持可信度。细微的多模态线索有助于协调不同感官之间的差异。因此，在临场感关键型虚拟现实场景中，应将可视化风格视为对技术稳定性和多感官连贯性的补充，而非替代。

6.3 语义—行为一致性

一个关键的设计挑战在于，可视化中嵌入的语义线索与用户据此推断出的行为之间存在不一致。例如，外星人化身的设计遵循了虚拟现实环境的内在叙事逻辑。然而，它们的视觉形态和风格可能传达了某些关于可交互性的预期，但这些预期并未得到实现。

将行人、骑自行车者及其他动态障碍物可视化为用户附近手持武器的外星人，可能会传达出它们具有潜在交互行为（例如攻击性、意图）的信号。然而，这些虚拟化身表现得很被动，只是在用户周围移动，并未表现出任何意图或互动。这种传达的含义与观察到的行为之间的不一致构成了预期违背，可能导致了认知失调 [15]，并可能造成临场感中断 [43]。

相比之下，点云条件具有较高的功能清晰度，并将语义提示降至最低。虽然这降低了预期不匹配的风险，但参与者的反馈表明，这也增加了解释负担。由于缺乏可识别的形态，用户不得不通过额外的认知映射，主动推断障碍物身份和距离等空间属性。综上，这些发现凸显了语义丰富度与行为可理解性之间的权衡。

设计启示。这表明，无摄像头户外虚拟现实系统的设计存在一项根本性权衡。提高障碍物表征的主题一致性，可能会模糊其作为旁观者的现实身份，从而在视觉语义暗示其可交互时令用户感到困惑。因此，使用叙事内表征时，设计者应考虑避免暗示可交互性的线索，因为这些线索可能促使用户靠近障碍物，而非保持安全距离。这可以通过克制的视觉风格设计、一致的叠加层，或强调其被动功能状态的细微线索来实现。混合方法可将极简的抽象标记（例如光环或地面锚点）叠加在叙事内化身上，从而在保留沉浸感的同时，明确传达虚拟化身对应现实世界中的旁观者。归根结底，评估可视化策略时，不应只看其视觉逼真度，还应考量其管理用户对障碍物预期的效果。

6.4 表征设计

对障碍物表征的偏好，受到功能清晰度和叙事整合两方面的影响。叙事内外星人化身虽然与 VR 环境的主题一致，却引发了两极分化的反应：半数参与者将其排在首位，但它同时也是并列获得最多末位排名的选项。这表明，高度的叙事内整合能够增强部分用户的沉浸感，但也可能使其他用户困惑于物体的用途。叙事外人类化身虽然在视觉上较为熟悉，却常常显得与外星世界格格不入，因此很少受到青睐。相比之下，点云因功能清晰度高、作用明确而受到认可，但沉浸感有限，因此排名适中且意见不一。参与者对叙事内可视化的偏好，与先前关于用户在感知任务中偏好叙事内线索的研究结果一致 [12],，尽管不同条件之间的量化差异并不显著。

这些结果凸显了设计兼具直观易懂和叙事连贯性的表征所面临的挑战。过度叙事内化的形式可能被误解为可交互或具有能动性，而抽象的可视化虽然功能更清晰，却可能降低参与度。参与者表示，希望可视化选项更加灵活或可自定义，例如可以根据情境和个人偏好，在符号指示物（如轮廓或图标）与沉浸式虚拟化身之间切换。融合易于识别的人物或符号线索，并采用与环境相匹配的美学风格的混合设计，或许能更好地兼顾清晰度与沉浸感。

综合来看，我们的研究结果表明，户外虚拟现实中的可视化设计必须兼顾两个相互依存的目标：确保安全导航的**功能清晰度**，以及促进沉浸式参与的**叙事整合**。在两项研究中，所有可视化类型都支持安全使用，但临场感、努力程度、挫折感和偏好方面的细微差异揭示了叙事内与抽象方式之间的权衡。没有任何一种策略被证明普遍最优，这表明灵活可调或混合设计或许最能满足不同的用户需求，并适应动态的户外环境。对设计者而言，这凸显了将可靠感知与灵活且能感知情境的表征相结合的重要性，以在提升舒适度和沉浸感的同时，优先保障安全性。

7 局限性与未来工作

尽管我们的研究为户外虚拟现实中的障碍物可视化设计提供了见解，但也存在一些局限性，并指明了未来工作的方向。

我们未测量虚警和漏检率、端到端延迟，或头部运动对目标检测的影响等客观安全指标。未来研究可以系统地评估障碍物检测和跟踪性能，例如采用 ROC 分析或延迟基准测试，以补充本研究收集的主观安全性报告。两项研究均在校园广场开展，该场所可代表公共步行空间，但缺少公园或城市街道中常见的特征，例如宠物、不平坦地形或车辆交通。这些因素可能会影响感知可靠性和用户行为。未来工作应在更多样的环境中评估户外虚拟现实系统，以了解其普适性。偶发的 GPS 噪声和雷达反射造成了延迟、漏检和幽灵轨迹，尤其是在高楼附近。使用更高精度的 GPS/IMU 模块、增设雷达或采用传感器融合方法，或许能缓解这些问题，但使用摄像头会引发隐私问题，值得审慎考量。探索保护隐私的多模态感知仍是一个重要方向。

为避免掩盖现实世界中的提示信息，我们的实现未纳入声音景观。然而，参与者偶尔会表示，不确定雷达视野之外是否存在障碍物。添加朝后的雷达，并配合轻微的听觉提示或环境声音景观，或许能够提升空间感知和沉浸感 [3, 6]。未来研究应考察此类提示能否在不造成干扰或误解的情况下增强临场感。

尽管我们的可视化位于视野范围内，但虚拟环境中的交互或叙事元素较少。这些因素可能降低了感知清晰度，并限制了不同可视化条件之间的区分度。增强可视化的显著性、通过添加更多角色或交互元素丰富虚拟场景，或提升图形保真度，都有助于扩大临场感和用户偏好方面的差异。

总之，这些局限表明，尽管我们的研究结果显示无摄像头户外虚拟现实具有可行性，且混合可视化策略前景可期，但仍需开展更多研究，以验证其在大规模应用中的安全性，将评估扩展至更复杂的环境，并改进感知与呈现设计。

8 结论

我们的研究表明，采用毫米波雷达的无摄像头户外虚拟现实能够在广泛的光照条件下支持安全且沉浸式的体验，同时保护旁观者隐私。在初步系统评估中，参与者报告称在各种户外条件下均感到安全且舒适。在此基础上，我们比较了三种障碍物可视化策略，发现尽管它们都能有效传达空间感知，但各自具有不同优势：虚拟化身有助于位置与方向的判断，点云强调范围，而叙事内整合塑造了偏好，同时也引入了歧义。基于这些发现，我们提炼出在户外虚拟现实中平衡清晰度与沉浸感的设计考量。未来系统或许能从混合式或可定制的可视化方法中受益，这些方法提交至 ACM 的稿件

以适应用户需求与环境复杂性。更广泛而言，这项工作表明，可靠感知与审慎的可视化设计相结合，对于将虚拟现实从受控室内环境扩展到兼顾安全性与隐私的日常户外体验至关重要。

参考文献

[1] M. Al Zayer、P. MacNeilage 和 E. Folmer。虚拟移动：综述。《IEEE 可视化与计算机图形学汇刊》，26(6):2315–2334，2018年。[2] R. W. Bohannon。20—79岁成年人舒适步行速度与最大步行速度：参考值及决定因素。《年龄与老龄化》，26(1):15–19，1997年。[3] I. d. V. Bosman、B. 、O˘guz ‘Oz’、J. 、Kristine、以及 J. Hamari。音频对虚拟现实体验的影响：范围综述。《行为与信息技术》，43(1):165–199，2024年1月。[4] C. Cao、Z. Shi 和 M. Yu。电影式虚拟现实中叙事内引导的自动生成。载于《2020年 IEEE 混合与增强现实国际研讨会（ISMAR）》：600–607页，巴西 Porto de Galinhas，2020年。IEEE。[5] S. Chung、T. Lee、B. Jeong、J. Jeong 和 H. Kang。Vrcat：保障用户安全的虚拟现实碰撞警示技术。《视觉计算机》，39(7):3145–3159，2023年。[6] J. J. Cummings 以及 J. N. Bailenson。沉浸感达到什么程度才算足够？沉浸式技术对用户临场感影响的元分析。《媒介心理学》，19(2):272–309，2016年4月。出版商：Routledge _电子版：https://doi.org/10.1080/15213269.2015.1015740。[7] Y. Do、F. Brudy、G. W. Fitzmaurice 和 F. Anderson。Vice vrsa：通过虚拟现实内外的感知提示平衡旁观者与虚拟现实用户的隐私。载于《Graphics Interface》，加拿大不列颠哥伦比亚省维多利亚，2023年。加拿大人机交互通信协会。[8] L. Fan、H. Li 和 M. Shi。使用头戴式显示器探索沉浸式虚拟空间的重定向行走：全面综述与最新进展。《IEEE 可视化与计算机图形学汇刊》，29(10):4104–4123，2023年10月。会议名称：《IEEE 可视化与计算机图形学汇刊》。[9] A. R. Galloway。游戏：论算法文化。明尼苏达大学出版社，美国明尼苏达州明尼阿波利斯，2006年。[10] C. George、P. Tamunjoh 和 H. Hussmann。不可见边界：作为现实世界边界指示器的听觉与触觉信号。《IEEE 可视化与计算机图形学汇刊》，26(12):3414–3422，2020年。[11] S. Ghosh、L. Winston、N. Panchal、P. Kimura-Thollander、J. Hotnog、D. Cheong、G. Reyes 和 G. D. Abowd。Notifivr：探索虚拟现实中的中断与通知。《IEEE 可视化与计算机图形学汇刊》，24(4):1447–1456，2018年。[12] M. Gottsacker、N. Norouzi、K. Kim、G. Bruder 和 G. Welch。用于无缝跨现实中断的叙事内表征。载于《2021年 IEEE 混合与增强现实国际研讨会（ISMAR）》：310–319页，意大利巴里，2021年10月。IEEE。国际标准连续出版物号：1554-7868。[13] S. Grassini、K. Laumann、V. de Martin Topranin 和 S. Thorp。评估多感官刺激对头戴式显示器介导的虚拟现实体验期间模拟器晕动症与临场感的影响。《人体工学》，64(12):1532–1542，2021年12月。[14] H. Hadan、D. M. Wang、L. E. Nacke 和 L. Zhang-Kennedy。沉浸式扩展现实中的隐私：探索用户感知、担忧与应对策略。载于《CHI 人机交互系统会议论文集》：1–24页，美国夏威夷州檀香山，2024年。计算机协会。[15] A. Hameed、S. Möller 和 A. Perkis。虚拟现实体验的整体质量分类体系。《虚拟现实前沿》，5，2024年8月。出版商：Frontiers。[16] S. G. Hart 和 L. E. Staveland。NASA-TLX（任务负荷指数）的开发：实证与理论研究结果。载于 P. A. Hancock 和 N. Meshkati 编，《人类心理工作负荷》，《心理学进展》第52卷：139–183页。North-Holland，荷兰阿姆斯特丹，1988年。[17] J. Hartmann、C. Holz、E. Ofek 和 A. D. Wilson。Realitycheck：将虚拟环境与情境化物理现实相融合。载于《2019年 CHI 人机交互系统会议论文集（CHI ’19）》：文章347，12页。ACM，2019年。[18] S. Huang、H. Bai、V. B. H. Mandalika 和 R. W. Lindeman。利用深度感知改进虚拟现实安全防护措施。载于《第30届澳大利亚计算机与人类交互会议论文集》：528–531页，澳大利亚墨尔本，2018年12月。ACM。[19] S. Jung 和 R. W. Lindeman。观点：真实感能提升虚拟现实中的临场感吗？为虚拟现实体验评估提出一种模型与度量指标。《虚拟现实前沿》，2，2021年7月。出版商：Frontiers。[20] K. Kanamori、N. Sakata、T. Tominaga、Y. Hijikata、K. Harada 和 K. Kiyokawa。用于虚拟现实沉浸的真实空间障碍物规避方法。载于《2018年 IEEE 混合与增强现实国际研讨会（ISMAR）》：80–89页，德国慕尼黑，2018年10月。IEEE。[21] R. S. Kennedy、N. E. Lane、K. S. Berbaum 和 M. G. Lilienthal。模拟器晕动症问卷：一种量化模拟器晕动症的增强方法。《国际航空心理学杂志》，3(3):203–220，1993年。[22] Y. Kudo、A. Tang、K. Fujita、I. Endo、K. Takashima 和 Y. Kitamura。平衡虚拟现实沉浸感与旁观者感知。Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.，5(ISS)，2021年11月。[23] H. Kyngäs。归纳式内容分析。载于 H. Kyngäs、K. Mikkonen 和 M. Kääriäinen 编，《内容分析在护理科学研究中的应用》：13–21页。Springer国际出版社，Cham，2020年。

[24] H. Liu、Z. Wang、A. Mazumdar 和 C. Mousas。面向真实环境约束的虚拟现实游戏关卡布局设计。《图形与可视化计算》，4:200020，2021年。[25] J. Llobera、B. Spanlang、G. Ruffini 和 M. Slater。沉浸式虚拟环境中多个动态角色的人际距离学。《ACM 应用感知汇刊》，8(1)，2010年11月。[26] M. McGill、D. Boland、R. Murray-Smith 和 S. Brewster。一剂现实感：克服虚拟现实头戴式显示器的可用性挑战。载于《第33届 ACM 人机交互系统年会论文集》：2143–2152页，2015年。[27] B. Mohler、J. Campos、M. Weyel 和 H. H. Bülthoff。在头戴式显示器虚拟环境与现实世界中行走时的步态参数。载于《第13届 Eurographics 虚拟环境研讨会和第10届沉浸式投影技术研讨会（IPT-EGVE 2007）》：85–88页。Eurographics 协会，2007年。[28] A. A. Nargund、A. Huard 和 M. Sra。WaveWalker：利用毫米波雷达实现户外虚拟现实体验。载于《2024年 IEEE 混合现实与增强现实国际研讨会附属会议（ISMAR-Adjunct）》：509–512页，美国华盛顿州贝尔维尤，2024年。IEEE。[29] J. O'Hagan 和 J. R. Williamson。具备现实感知能力的 VR 头显。载于《第9届 ACM 普适显示国际研讨会论文集》，PerDis '20：9–17页，美国纽约州纽约市，2020年。计算机协会。[30] T. C. Peck、H. Fuchs 和 M. C. Whitton。利用干扰项改进重定向：大空间真实行走移动界面及其对虚拟环境导航的影响。载于《2010年 IEEE 虚拟现实会议（VR）》：35–38页。IEEE，2010年。[31] C. Pfeiffer、C. Lopez、V. Schmutz、J. A. Duenas、R. Martuzzi 和 O. Blanke。主观第一人称视角的多感官起源：视觉、触觉与前庭机制。《公共科学图书馆·综合》，8(4):e61751，2013年4月。[32] M. Quigley、K. Conley、B. Gerkey、J. Faust、T. Foote、J. Leibs、R. Wheeler 和 A. Y. Ng。ROS：一种开源机器人操作系统。载于《ICRA 开源软件研讨会》，第3卷，第5页，日本神户，2009年1月。IEEE。[33] S. Razzaque。重定向行走。北卡罗来纳大学教堂山分校，2005年。[34] H. Regenbrecht 和 T. Schubert。真实交互与虚幻交互增强虚拟环境中的临场感。《临场感：远程操作与虚拟环境》，11(4):425–434，2002年。[35] P. Ring、J. Tietenberg、K. Emmerich 和 M. Masuch。面向 VR 应用的碰撞焦虑问卷的开发与验证。载于《CHI 人机交互系统会议论文集》：1–13页，美国夏威夷州檀香山，2024年5月。ACM。[36] G. D. Ritterbusch 和 M. R. Teichmann。元宇宙的定义：系统性文献综述。《IEEE 开放获取》，11:12368–12377，2023年。[37] S. Rothe、D. Buschek 和 H. Hußmann。电影式虚拟现实中的引导——分类体系、研究现状与挑战。《多模态技术与交互》，3(1):19，2019年。[38] P. Salomoni、C. Prandi、M. Roccetti、L. Casanova 和 L. Marchetti。评估叙事内游戏界面与 Oculus Rift 的功效。载于《2016年第13届 IEEE 消费者通信与网络年会（CCNC）》：387–392页，美国内华达州拉斯维加斯，2016年。IEEE。[39] T. Schubert、F. Friedmann 和 H. Regenbrecht。临场感体验：因子分析见解。《临场感：远程操作与虚拟环境》，10(3):266–281，2001年。[40] T. W. Schubert。虚拟环境中的临场感：测量空间临场感、投入感与真实感的三成分量表。《媒介心理学杂志》，15(2):69–71，2003年。[41] J. Shelton 和 G. P. Kumar。听觉与视觉简单反应时的比较。《神经科学与医学》，1(1):30–32，2010年。[42] A. L. Simeone、E. Velloso 和 H. Gellersen。替代现实：利用物理环境设计虚拟现实体验。载于《第33届 ACM 人机交互系统年会论文集》：3307–3316页，2015年。[43] R. T. Skarbez。虚拟环境中的可信度幻觉。哲学博士论文，北卡罗来纳大学教堂山分校，美国北卡罗来纳州，2016年。国际标准书号：9781369013900。[44] M. Slater、M. Usoh 和 A. Steed。迈出步伐：行走技术对虚拟现实临场感的影响。《ACM 人机交互汇刊》（TOCHI），2(3):201–219，1995年。[45] J. Solà。误差状态卡尔曼滤波器的四元数运动学，2017年。[46] M. Sra、S. Garrido-Jurado 和 P. Maes。Oasis：由三维扫描真实空间程序化生成的社交虚拟空间。《IEEE 可视化与计算机图形学汇刊》，24(12):3174–3187，2017年。[47] M. Sra、S. Garrido-Jurado、C. Schmandt 和 P. Maes。由三维重建物理空间程序化生成的虚拟现实。载于《第22届 ACM 虚拟现实软件与技术会议论文集》：191–200页，2016年。[48] M. Sra、X. Xu、A. Mottelson 和 P. Maes。Vmotion：设计无缝行走体验。载于《2018年交互系统设计会议论文集》：59–70页，2018年。[49] Y. Toczek。视觉真实感对虚拟环境临场感的影响。硕士论文，埃因霍温理工大学，2016年。[50] I. Valentini、G. Ballestin、C. Bassano、F. Solari 和 M. Chessa。通过增强障碍物感知提升虚拟现实中的交互。载于《2020年 IEEE 虚拟现实与三维用户界面会议（VR）》：44–52页。IEEE，2020年。[51] J. Von Willich、M. Funk、F. Müller、K. Marky、J. Riemann 和 M. Mühlhäuser。你闯入了我的追踪空间！利用增强虚拟性在房间尺度虚拟现实中发现路人。载于《2019年交互系统设计会议论文集》：487–496页，美国加利福尼亚州圣迭戈，2019年6月。ACM。[52] J. J. Yang、C. Holz、E. Ofek 和 A. Wilson。DreamWalker：用虚拟现实替代现实世界行走体验。载于《第32届 ACM 用户界面软件与技术年会论文集（UIST '19）》：1093–1107页，美国路易斯安那州新奥尔良，2019年10月。提交至 ACM 的稿件

ACM.

收到日期：2007年2月20日；修订日期：2009年3月12日；接受日期：2009年6月5日