arXiv:2601.13689v1 [cs.HC] 20 Jan 2026

Criminator：一款易于使用的扩展现实“犯罪动画制作工具”，用于动态犯罪现场的快速重建与分析

Vahid Pooryousef 以人为中心计算系，莫纳什大学，墨尔本，澳大利亚
vahid.pooryousef@monash.edu

Lonni Besançon 科学技术系，林雪平大学，北雪平，瑞典
lonni.besancon@gmail.com

Maxime Cordeil 电气工程与计算机科学学院，昆士兰大学，布里斯班，澳大利亚
m.cordeil@uq.edu.au

Chris Flight 法证服务部，维多利亚州警察局，墨尔本，澳大利亚
c
hrist
opher.flight@police.vic.gov.au

Alastair M Ross AM 法医学系，莫纳什大学，墨尔本，澳大利亚
aliross.ross@monash.edu

Richard Bassed
法医学系，莫纳什大学；维多利亚法医学研究所，墨尔本，澳大利亚
richard.bassed
@monash.edu

Tim Dwyer 以人为中心计算系，莫纳什大学，墨尔本，澳大利亚
tim.dwyer@monash.edu

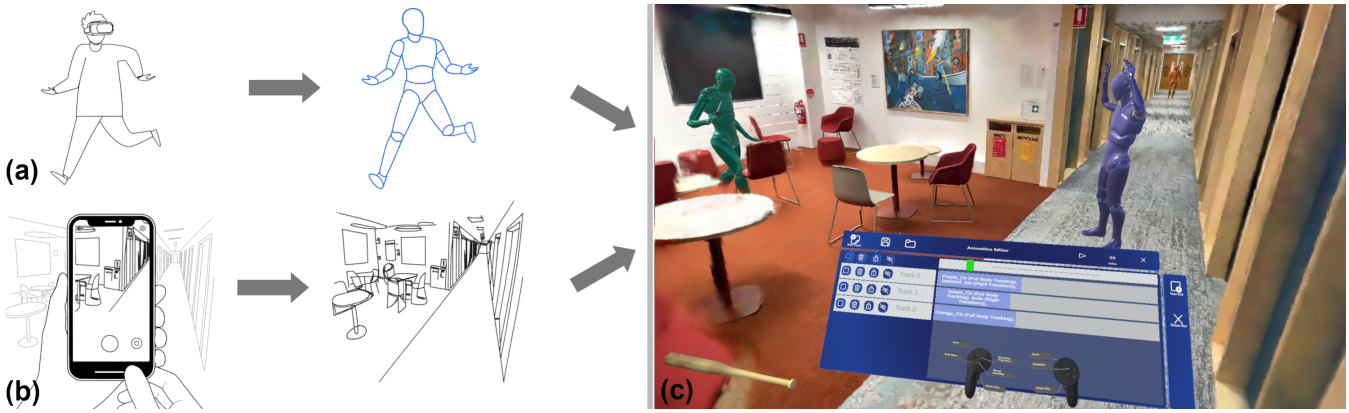


图 1：在虚拟现实中创作动画犯罪现场。(a) 使用 VR 头显创建角色动画。(b) 使用手机对场景进行三维扫描。(c) 在三维扫描环境中组合多个角色，并使用动画编辑器面板。

摘要

执法机构对用于虚拟犯罪现场重建的三维建模越来越感兴趣，这使得无需承担现场调查的成本和污染风险，便可进行离线分析。以往的研究通过静态建模并验证动态场景中的事件顺序对于解决案件至关重要。然而，动画工具并不适合犯罪现场重建，对于非三维建模/动画专家而言也较为复杂。通过与犯罪学专家开展协同设计过程，我们设计了“Criminator”——一种能够简化动画制作的方法框架和扩展现实工具。我们对受过犯罪学培训的参与者（n=6）和未受过培训的个人（n=12）进行了工具评估。两组参与者都成功完成了角色动画任务，并对观察任务给出了较高的可用性评分。Criminator 有望用于假设检验、演示、意义建构以及

本作品采用知识共享署名 4.0 国际许可协议授权。*CHI '26*，西班牙巴塞罗那
© 2026 版权归所有者/作者所有。ACM ISBN 979-8-4007-2278-3/2026/04
https://doi.org/10.1145/3772318.3791210

培训。此类工具如何融入整个司法程序仍面临挑战，其中包括是否将动画纳入证据的问题。

CCS 概念

• **应用计算 → 法律**；• **以人为中心的计算 → 虚拟现实**；交互式系统与工具。

关键词

犯罪 场景重建、虚拟现实、动画创作 作

ACM 引用格式：

Vahid Pooryousef、Lonni Besançon、Maxime Cordeil、Chris Flight、Alastair M Ross AM、Richard Bassed 和 TimDwyer。2026。Criminator：一种易于使用的扩展现实"犯罪动画制作工具"，用于快速重建和分析动态犯罪现场。载于《*2026*年*CHI*计算系统中的人为因素会议论文集》（*CHI '26*），*2026*年*4*月*13*日至*17*日，西班牙巴塞罗那。ACM，美国纽约州纽约市，18页。https://doi.org/10.1145/3772318.3791210

1 引言

在现代犯罪学中，侦破犯罪需要一个多方面的流程，其中可能涉及执法部门内不同部门的专家，也需要法律与司法机构之间的协调。近期的人机交互（HCI）研究发现，扩展现实（XR）可用于尸检，并探索沉浸式解剖 CT 扫描图像的新技术 [5, 68, 69]。尸检侧重于调查受害者的死因，而犯罪调查则从犯罪现场调查（CSI）开始，随后对证据进行法证分析，并可进一步通过犯罪现场重建（CSR）确定犯罪事件的各个方面。本文探讨了利用扩展现实轻松进行犯罪现场重建的新机遇。

根据 OSAC 犯罪现场重建标准准则 [86]，提供的定义，犯罪现场调查是指对场景进行审查，以定位、记录、处理、收集并保存具有潜在证据价值的物品。另一方面，犯罪现场重建是通过演绎和归纳推理、物证、科学流程及其相互关系，明确了解场景周围一系列事件的过程。犯罪现场重建涉及特定时间点，并有具体数据作为依据，但这些已界定的静态事件之间往往存在空白。现场重演是对假定事件的展示，其依据可以部分来自物证或证人证言。现场重演有时用于呈现根据犯罪现场重建结论推断可能发生的情况，也可用于填补有具体数据支持且已记录或引用的特定事件之间的空白。这通常需要假定某些活动，或根据预期和／或个人影响推断行动。

本文通篇将虚拟现实（VR）中的犯罪现场重建（CSR）称为 CSR，但我们的重点更接近于现场重演（SR）的后一种定义。犯罪现场调查（CSI）和犯罪现场重建（CSR）流程的最终目标，是编制报告提交司法机关，以协助犯罪认定。然而，要进行彻底且准确的调查，往往需要多次和/或长时间前往现场，这可能导致现场受到污染，或证据丢失、损毁。此外，犯罪现场可能难以进入，或对调查人员构成安全隐患 [85]。

在这种情况下，犯罪现场重建（CSR）使调查人员能够在远离原始现场的地点进一步分析收集到的证据，从而在不污染现场的情况下，提高调查结果的全面性和准确性。计算机图形工具和三维扫描仪的应用极大地推动了这一流程的发展，如今它们已成为犯罪现场重建中的标准做法。

犯罪现场三维模型的分析通常使用配备二维显示器的标准台式工作站进行。由于专用设备和熟练建模人员的成本高昂，这类技术通常仅用于备受关注的案件。例如，新南威尔士州警方对2014年悉尼林特咖啡馆围困事件进行的三维重建，曾以视频模拟的形式在法庭上呈现 [3]。该模拟从多个角度展示了狙击手的视野，增进了人们对警方应对的理解和评估。

尽管三维建模有助于犯罪现场重建，但屏幕尺寸和视野有限、缺乏深度感知，以及难以通过二维显示设备和输入设备浏览三维场景等问题，降低了这类技术在此类任务中的可用性。相比之下，通过虚拟现实和增强现实（AR）（统称为扩展现实）技术进行沉浸式可视化，能够以实际尺寸呈现大型三维环境并让用户身临其境，从而提升临场感和空间感知。此外，沉浸式技术还提供了更直观、高效的界面，使用户能够与三维模型无缝交互，并促进用户之间的交流。这些优势推动了许多关于犯罪现场重建、分析和呈现的研究 [73, 85, 88]。

此外，该领域现有的工具和研究大多只考虑犯罪现场的静态表征。虽然这些表征有助于调查对象与事件之间的空间关系，却无法支持对时间关系的调查，也无法根据证人陈述或监控录像重建这些关系。针对特殊情况，人们已重建过动态场景，但这需要高级三维建模和动画技术。扩展现实技术在动态场景中以经济高效的方式可视化时间事件，其潜在优势尚未得到充分探索，尤其是在确保动画技能有限者也能轻松使用且具备高可及性方面。

为解决这一问题，我们与取证调查专家合作，探讨沉浸式技术如何让犯罪现场重建（CSR）更加普及，使不具备专业三维建模或动画技能的人也能使用。这种方法有助于调查人员、法律专业人士及其他利益相关者更有效地可视化、分析和呈现犯罪现场。我们的研究还评估了此类重建能否提升调查、呈现和感知效果，还是会带来误解、偏见以及更高的技术复杂性等挑战。总而言之，我们的贡献有四个方面。

- 一份报告，详述我们与取证／犯罪调查专家开展的协同设计过程，重点介绍他们的反馈，以及我们对扩展现实犯罪现场重建（XR CSR）需求的见解（第 3 节）。
- 一个框架及其实现方案，构成了用于快速制作动画犯罪现场原型的工具包，见图 1 和第 4 节。我们将其命名为"Criminator"，意为"犯罪现场动画制作工具"。
- 一项研究（第5节）涉及两个参与者群体：普通人（代表陪审团）以及受过犯罪学培训的人员

（专家），揭示了有关可用性以及假设检验、展示和培训潜力的结果（第6节）。

- 讨论对人机交互社区在法律和可视化语境中的更广泛影响，并提出设计建议（第 8 节）。

2 背景

犯罪现场调查在复杂程度上可能差异很大，这取决于需要收集并纳入分析的证据。法医检验可采用多种方法，例如三维建模与可视化 [11, 61], DNA鉴定 [26], 基于激光的测量 [55], 以及统计分析 [60]。本节重点讨论支持人类视觉认知的方法，涵盖司法程序中的理解、分析和呈现；对于虽在法庭科学和法律语境中有用、但并不直接服务于这些目的的技术，则不予讨论。在此范围内，我们首先概述可视化技术及其各自针对法律标准的优缺点，随后更深入地探讨用于犯罪现场重建的扩展现实和动画能力，这也是本文的主要关注点。

2.1 犯罪现场重建不同视觉保真度的益处与顾虑

尽管视觉分析技术不断进步，但由于需要及时记录，绘图、摄影和摄像等传统方法仍广泛用于犯罪现场调查，以便快速收集数据并记录观察结果 [61]。根据犯罪事件的性质，也可能采用其他基于视觉的方法，以更精确地捕捉犯罪现场细节，从而实现更高保真度的重建。然而，了解不同保真度等级和技术在法律情境中的益处，以及它们可能带来的额外挑战，至关重要。

上述传统方法只能提供犯罪现场的二维视图。草图可用于快速绘制几何布局并标记关键细节，便于沟通，但其准确性不足，容易出现人为错误，也容易被篡改，因此单凭草图不足以作为法庭证据。照片和视频能捕捉更多细节，可用于核实草图，也较不易遭到篡改或出现错误，但在拍摄时仍会将三维场景压缩为二维视图。视图彼此割裂，且缺乏可供导航的视角，因此人们在理解物品之间的空间关系时，认知负荷会增加。

数十年来，简化三维重建的计算机图形学技术一直用于犯罪现场分析 [20, 64]。较新的技术通过激光扫描 [71], 视频漫游 [37], 和摄影测量 [91]创建高保真、逼真的三维场景。这些技术在不同条件下各有优缺点 [32, 35]。对于不存在或已损坏的对象，仍然需要手动建模。与照片和视频证据相比，这些三维模型表示能够提供连贯的视图并支持视角移动，从而增强人类的理解和决策能力 [48]。

尽管三维可视化具有诸多优势，但创建此类模型需要设备和技能，而这些在不同司法管辖区并非普遍可得。此外，无论可视化技术是基于准确证据进行重建，还是依据推断生成，其高保真度和逼真程度都被发现具有说服力，并可能误导其他相关方，尤其是陪审员 [77]。因此，Bailenson 等人 [10]指出，可视化和模拟越逼真，就越需要交互式工具。此类交互式工具必须支持创建不同假设，并对其进行可视化比较。换言之，重建技术越先进，提供易于使用的工具以“打开黑箱”就越重要；这类工具应支持探索重建犯罪现场模型来源的可探索性和可解释性。尽管硬件和软件开发的初始成本较高，扩展现实仍日益受到关注，成为支持三维可视化的平台，可实现更自然、简便的导航和交互界面。第 2.2 节将对此领域进行详细讨论。

在法律环境中使用和开发新技术的另一项重要标准是验证。从基本原理出发验证新技术和方法，可能是一个漫长的过程。不过，这类技术通常并非全新，而是对既有方法的改进。近期发布的 ISO 21043 法庭科学标准允许在法庭科学检验中使用经过验证的方法的变体和偏离，只要这些变体和偏离在技术上有充分依据并予以记录 [63]。该标准还允许在无法通过统计方法确定某项主张成立可能性的情况下，采用解释性方法作出判断，并使用“专业意见”和主观解释。尽管这并不意味着新技术可以直接用于法律场景，但为其应用开辟了途径。

由于司法程序高度依赖人的决策，因此对某种方法作出合理论证时，应考虑诸多人为因素 [33, 52, 83], , 包括但不限于感知难易程度、使用便捷性、人为错误、偏见、说服力、公平性，以及证据/假设的区分度。人为因素涉及多个维度，这凸显了人机交互研究人员与法庭科学专业人员密切合作的重要性，以借助后者的专业判断，设计出在技术上有充分依据、适用于特定用例且明确界定预期用途范围的交互工具。

这一视角构成了我们工作的基础：我们通过专家参与的设计流程，开发一个框架以及现有工具的一种变体——使用扩展现实的犯罪现场重建，并邀请犯罪学家和非专业参与者对其进行评估，以确定我们的工具所提供的保真度水平是否能够提升可及性、支持感知和知情决策、减少误判、促进假设检验，或者也可能对这些方面产生负面效果。

2.2 使用扩展现实的犯罪现场重建

由于犯罪现场具有三维特性，扩展现实技术有望成为分析平台。增强现实头显 [66] 和平板电脑 [85, 88]已用于标注犯罪现场，并通过照片和视频记录现场；在室内用例中，借助虚拟标记加快了采集过程。Gee 等人 [44] 介绍了一种系统，使远程专家能够与现场

操作人员协作，利用手持式增强现实对室内和室外区域进行大规模制图和数据采集。同样，Datcu 等人 [34] 研究了将手持式增强现实与肩载式摄像机结合，为现场操作人员提供来自远程专家的协作式分布式指导。这些方法提高了现场调查的效率和理解能力。

虽然增强现实已被用于在犯罪现场采集和分析数据，但以往研究主要将虚拟现实应用于现场之外的检验。例如，Süncksen 等人 [87] 利用虚拟现实，将包含众多角色和子弹轨迹的三维建模场景可视化，以支持详细检查。随着三维扫描技术的进步，Reichherzer 等人 [73] 根据三维扫描仪数据创建点云，使调查人员能够在虚拟现实中探索和分析犯罪现场的数字孪生。在另一项相关研究中，Rinaldi 等人 [74] 将虚拟现实中的扫描犯罪现场与放置在虚拟场景中真实位置的照片相结合，为现场之外的调查提供照片的空间语境。我们的工作以这些研究为基础，在虚拟现实中呈现空间语境。但值得注意的是，我们采用了最新推出的高斯泼溅技术 [53]，以显著提高保真度来渲染捕捉到的物理环境。

扩展现实为受训人员提供了一个易于使用且经济高效的平台，使他们能够在逼真的环境中反复练习犯罪现场调查规程，亲身体验物理犯罪现场的复杂性和多样性 [6, 7, 29]。游戏化通过模拟犯罪现场、收集线索并在虚拟现实中开展审查，营造了更具互动性的环境 [89, 90, 97]。

除了静态表征之外，法医动画还被用于分析交通事故 [24], 飞机失事 [2],子弹轨迹分析 [41], 以及人体姿态模拟 [92]，服务于犯罪/事件调查和法庭展示。然而，尤其是关于有效且易于使用的工具，科学讨论和研究仍明显不足。

总而言之，研究发现，三维场景重建以及利用扩展现实进行检查、培训和展示具有诸多益处。然而，过去的工作主要聚焦于静态重建、特定情景的动画，或游戏化。扩展现实在逼真环境中重建对象之间时间关系的潜力尚未得到充分探索。

2.3 使用扩展现实创作动画

虽然三维动画广泛应用于扩展现实应用中，但通常需要高级桌面软件、熟练的三维建模师和动画师、专业设备，以及大量的预算和时间投入。然而，近年来，人们开始尝试在扩展现实环境中创作动画，以利用三维交互以及直接操控和具身操控。

以往研究聚焦于非类人 [28]和类人 [30,43, 101] 角色动画，采用关节位置的底层控制和关键帧记录。这种受桌面端同类工具启发的方法也被其他研究采用。Vogel等 [93] 开发了一款功能丰富的虚拟现实工具，可用于创建动画，让用户直接操控和修改模型与动画。类似地，Zhang 等 [99] 探讨了类似 Unreal Engine 的蓝图的可视化编程界面如何支持在虚拟现实中创建交互场景。然而，这两种方法使用起来仍然相对复杂，创建动画需要技能和时间。相比之下，协作式创作 [65] 以及艺术化和卡通风格的动画 [70, 80]都是旨在简化扩展现实中直接创建动画的尝试。

尽管这些工具推动了动画创作的发展，但对于频繁进行的工作流程而言，仍需要更快捷的解决方案。Li 等人 [58] 开发了一种基于增强现实的工具，利用实体代理物实现快速动画原型设计，降低了对技能的要求，但在代理物构建和管理受物理约束的对象交互方面仍面临挑战。同样，Wu 等人 [98] 提供了一种增强现实工具，可在场景中捕捉和查看角色动画，但其与其他虚拟对象或环境的交互方式灵活性有限，例如只能触发按钮，因此主要适用于开发分步培训材料和测验。

在扩展现实动画创作工具中，据我们所知，Flipside XR [1] 最能满足我们对动画犯罪现场重建的需求。它是一款功能丰富的虚拟现实应用，专为快速创作三维虚拟现实社交媒体内容而设计。它能够快速制作细节相对简单的动画，并支持从第一人称视角为角色制作动画。它还允许开发者扩展对象和动态效果。不过，它是一款闭源专有软件应用。尽管它支持第三方插件开发，但当前版本缺乏开发犯罪现场重建定制功能所需的灵活性。

3 方法

如图2所示，我们与法证调查专家开展了协同设计过程 [76]。协同设计是人机交互领域，尤其是扩展现实研究中的一种常见方法 [4, 23, 82], ，旨在为包括法证应用在内的目标群体 [56, 68] 打造易用的工具和原型。总计有六位法证专家在设计过程开始前及进行期间提供了各自的视角（见表1）。专家1和专家2始终参与其中，之后还加入 [13, 16, 68]本文作者的行列，协助验证用户研究结果、撰写论文并提升其可读性；这一做法在高度专业化领域也很常见。

因此，开发团队（即本文作者）由法医学、人机交互和扩展现实领域的专家组成。为促进不同领域专家之间更有效的沟通，我们采用了多个层次的原型设计：

(1) 首先，在纸上绘制构想（低保真原型设计）。(2) 概念逐渐完善后，我们采用绿野仙踪方法 [45]——在此过程中，我们制作了一组演示用用户界面，并使用动作追踪系统录制动画，以便在与法证调查专家沟通时，更好地展示工具包的整体结构和功能。(3) 最后，在就纳入某项功能达成共识后，我们开发了高保真原型。不过，并非一次性实现所有功能；相反，每新增一组功能，都会或多或少地重复这些阶段。

随后，我们通过一项分为两个阶段的用户研究，评估所开发原型的可用性和有效性，分别考察其观察和动画创作能力，详见第5节。该研究将衡量此工具包在观察和

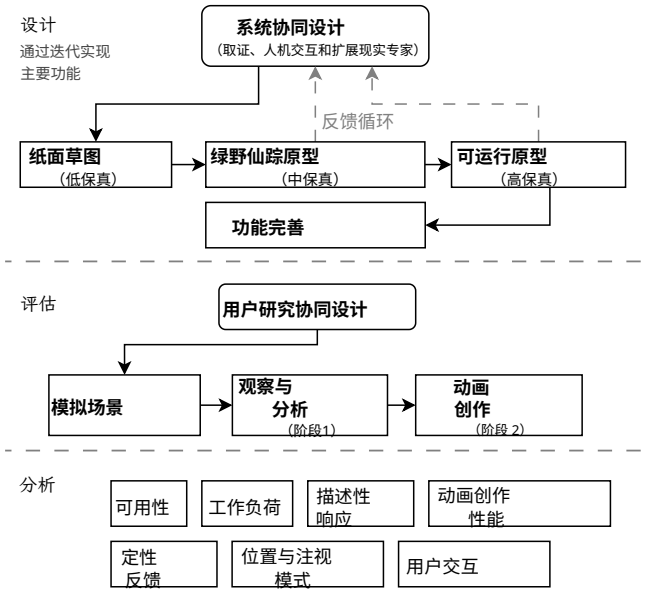


图2：我们的设计、评估与分析方法。

表1：参与协同设计过程的专家详情。

#	共同作者?	职业	工作年限体验
1	是（第4位）	犯罪现场重建专家	10+
2	是（第5位）	法医科学家	50+
3	是（第6位）	法医牙科学家	20+
4	No	犯罪现场勘查员	30+
5	No	法医科学家（任职于执法机构	10+
6	No	国家级警察和法医学研究人员	10+

动画创作方面的可用性、有效性及局限性。问卷和测试的更多详情见第6节。

4 Criminator 系统设计

为了为我们的系统建立连贯的设计理由，我们通过与法证专家讨论，收集了相关需求和标准。

4.1 专家的见解

2023年国际法医学协会（IAFS）会议 [75] 强调了在法医调查中采用科学方法和新技术的必要性。从这一视角来看，科学方法包括观察、批判性思维、问题解决、假设构建和重建。此外，通过与该领域专家的讨论，并参考OSAC指南 [86], ，我们得出结论，犯罪现场重建技术必须支持以下原则：

- 犯罪现场重建方法论要求运用批判性思维和科学方法。
- 犯罪现场重建不应依赖逻辑流程、常识、个人信念或预期行为来确定事件的顺序，而必须以物证、现场情境和／或物理定律为依据。
- 重建需要情境信息来指导分析。然而，重建人员必须采取措施，减轻认知偏差对其工作的影响。

此类系统还必须满足相关标准，以确保其具备实际应用价值：**可用性**完成并通过验证后，该工具应便于所有参与复杂犯罪调查的犯罪现场调查员获取和使用，且所需培训应尽可能少。

及时性该工具应能够在短时间内展示不同且可行的情景。

灵活性该工具需要具备灵活性，以适应犯罪调查相关情况和信息的变化，以及这些变化对犯罪重建产生的影响。

信息传递该工具应易于向参与司法程序的决策者（例如司法机构和陪审团）演示和说明，尤其是在展示可行的替代方案时。法院对在呈示专家证据时辅助使用技术的态度日益积极 [78]。犯罪现场重建专家确定最可能的情景后，可向法庭、法官和陪审团演示犯罪现场原型，以协助其进行决策。

4.2 机制

为实现动态犯罪现场重建原型系统，我们首先借鉴常见的视频编辑工具，开发了一种通用机制或框架。图 3 概述了该系统的底层机制。图中包含一个轨道容器，其中容纳多条轨道。每条轨道可包含多个时间段。每个槽位都有起始帧、结束帧以及一组效果。效果是一种抽象实体，可用于开发各种效果。它包含一个目标属性，用于指定当前效果应用于哪个对象。每种已实现的效果还可根据需要包含其他参数。此外，每种已实现的效果都应存储其动画数据，并在需要时将其取回。可控对象也是一种抽象实体，代表能够接收效果的道具和对象，从而便于扩展效果和道具（即可控对象），且所需工作量极少。本研究实现了多种可控对象和效果，详见第 4.3 节。

该架构中还有一些约束——虽然并未明确显现，却增强了系统灵活性，并避免了动画管理过于复杂。以下是主要约束：

(1) 两条轨道中，编号较小（即位于上方）的轨道优先级较高。这意味着，如果两个效果控制目标对象的同一属性，优先级较高的效果会覆盖该帧中应用的任何更改。

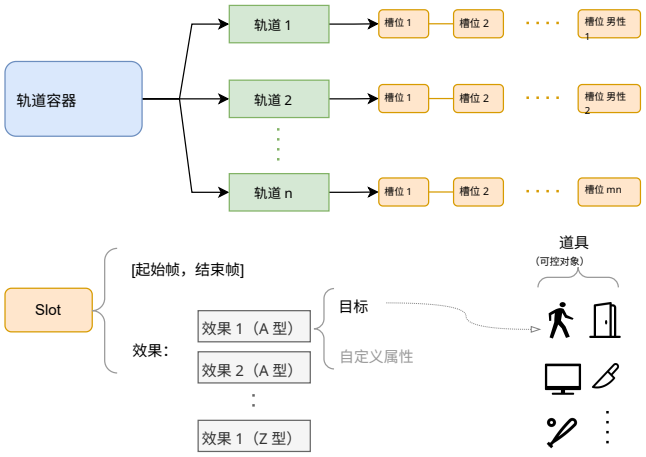


图3：虚拟现实中犯罪现场重建机制概览。

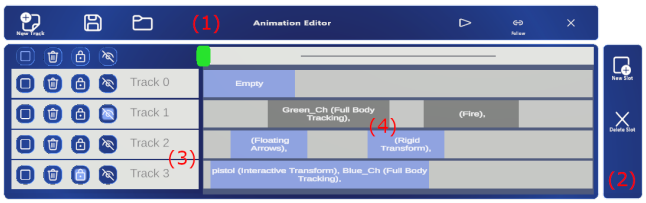


图4：动画编辑器界面。

(2) 只有目标对象不同时，单个槽位中才可以存在多个相同类型效果的实例。(3) 同一轨道内的槽位不会重叠。这简化了优先级管理，而优先级已由轨道优先级约束（约束1）确定。

4.3 Criminator 功能

所述机制需要一个用户界面来应用其结构和约束，需要实现犯罪现场调查所必需的效果和道具，还需要一个动画录制器和播放器来运行所创建的轨道、槽位和效果。[1]

4.3.1 用户界面。 该工具包中的主要用户界面（UI）是动画编辑器面板。该面板提供了管理轨道、插槽、效果和参数所需的必要功能。此面板上可访问的主要功能（按照图4中的编号）包括：

1）顶部栏 用于创建新轨道、保存和加载动画、播放和暂停动画、跟随模式以及隐藏面板。

2）右侧栏创建和删除槽位 .
3）轨道控制区域排序轨道、禁用轨道或隐藏其效果、锁定修改以及删除轨道。
4) 槽位控制区域 时间滑块（绿色按钮），可将槽位拖放到同一轨道或其他轨道上的不同位置，也可拖动槽位两端来调整其时长。

[1]源代码见 https://github.com/vahpy/XR-Crime-Animator

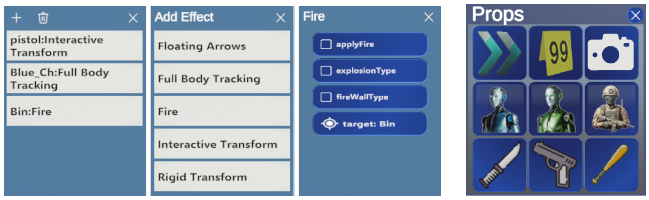


图5：效果（左侧3个面板）和道具（右侧）面板。效果部分包括：（左侧）当前附加到槽位的效果列表，显示为“目标道具：效果”；（中间）可添加到槽位的所有可用效果列表；（右侧）所选效果的参数。

在编辑器中选中槽位后，编辑器旁边会显示一个小矩形面板，用户可以添加和管理效果。如图5所示，效果面板有三种状态：

插槽效果显示附加到该槽位的效果列表，并提供添加或删除效果的按钮。**效果列表**显示可添加到该槽位的可用效果列表。**效果参数控制**用于控制效果的参数。

如图5所示，用户可以通过**道具菜单**将道具添加到场景中。此列表可以扩展，以包含所需数量的道具。

除了使用控制器进行常规选择、操作和导航外，用户还可以直接通过控制器开始和停止录制、切换动画编辑器和道具菜单，以及在地面视角与俯视图之间切换（参见图4中的引导标签）。用户还可以按住握持按钮，通过调整控制器的距离沿深度轴放大或缩小视图；也可以向任意方向移动控制器来平移视图，这在俯视视角下进行“鸟瞰式”导航时尤其有用。

*4.3.2 CSR*的效果与可控对象。如第4.2节所述，效果和可控对象是该架构中的两种抽象实体，可根据应用需求通过附加组件实现。为了更好地处理对象的多样性，我们还实现了两个抽象层级，即可触发和不可触发的可控对象。在此原型中，我们扩展了工具包，使其支持典型的犯罪现场场景，例如第5.1节所述的场景。可控对象包括人物角色、犯罪工具、家具、建筑物、调查标记、笔记、测量数据和照片。这些对象大多很容易实现。不过，值得更详细地说明环境（如建筑物和家具）的实现方式。

虽然可以使用三维模型构建建筑物，但我们还采用了高斯泼溅 [53]——一种新颖且高质量的三维扫描和体渲染技术——来逼真地呈现实际犯罪现场环境。采用这种方法，只需用手机快速扫描，就能简化通过三维模型对环境及背景进行建模的大部分工作，同时还能提供更真实的背景。过去，捕获现实世界环境的三维数据依赖于昂贵的设备，例如

安装在三脚架上的激光雷达；而如今，基于手机的扫描正日益普及，因为它更易于使用、速度更快（数小时对比数分钟）、成本效益更高，也更便于世界各地的辩方和警察部门使用，因此更容易融入工作流程。以往的研究 [84]也表明，手机三维扫描在法医检验中用于血迹形态分析能够取得可接受的结果，符合本研究的质量要求。

效果更为复杂，其实现难度在很大程度上取决于效果的类型。它们可以修改对象的状态和属性，甚至创建新对象。此外，它们还可以调用 Unity游戏引擎的各种功能，例如粒子系统、音频和物理效果。此工具包实现的主要效果包括：

全身追踪 这是角色动画的一项关键效果，它利用 Meta Movement SDK 估算全身关节位置，从而实现自然动作。此效果提供的是估算值，而非精确的位置追踪。**刚体变换** 按帧或关键帧捕获对象变换属性（位置、旋转和缩放）的变化，在这些变化之间进行插值以实现平滑过渡，并应用用户配置的物理效果，例如碰撞和重力。**交互式变换** 记录交互道具（例如武器或其他可触发道具）的状态变化。

虽然研究中没有直接使用，我们还实现了“浮动箭头”（显示连接关系的动画箭头）和“火焰”效果，并提供了火焰类型等参数，如图5所示。除后两种效果外，其他效果均以 Unity标准动画格式存储动画。

4.3.3 动画录制器和播放器。**播放**。开始播放时，若满足以下条件，效果会收到 START信号：

- 用户在时间滑块位于槽位范围内时按下播放键 .
- 时间滑块到达槽位的起始帧。

播放期间，效果每帧都会收到 UPDATE信号；若播放暂停或到达效果的结束位置，则会收到 PAUSE信号。

虽然 UPDATE信号免去了许多类型效果对 START信号的需求，但将两者区分开来可以简化实现，尤其是在连续播放与逐帧更新或单帧播放的处理方式不同时。

与大多数视频播放器不同，在开始播放时，我们提出的动画播放器需要快速播放所有轨道中截至当前帧的所有效果，即使当前帧已经超过了这些效果的结束帧。不过，具体实现可能因效果而异，因为有些效果在结束帧时始终处于最终状态。为了优化存储，效果可能只记录相对于前一帧的变化，因此需要快速播放以确定最终状态。显然，效果必须存储目标对象在第一帧时的初始状态。

录制。 无论是连续录制还是在特定关键帧录制效果，动画录制器都只会通知当前选中的效果，记录其目标对象的变化。所有其他效果则切换到播放模式。因此，用户可以在虚拟现实中观看动画，同时录制对某个效果所做的更改。

为简化操作，录制器还会在需要时自动将常用效果（如对象移动效果）附加到选定的槽位

这样可以减少创建涉及多个对象和效果的动画所需的步骤。例如，为角色制作动画时，让它拿起道具或用枪射击。

5 用户研究

在法证专家的指导下（表 1），我们设计了一项用户研究，任务是分析一个模拟犯罪现场。情境设定为一个动态场景，其中事件顺序模糊不明，有多名人员，还有一些区域，其观察角度可能改善或妨碍观察者的视野。

5.1 场景

如图 6 所示，一起犯罪事件发生在一栋建筑物内，现场有一条长走廊和一处小型休息区。场景中有三个人：一名目击者（橙色人物）、一名攻击者（绿色人物）和一名防卫者（紫色人物），如图 6b 所示。该图展示了场景中的几个关键时刻。开始时，目击者正从走廊尽头走向书房，而防卫者正前往房间，准备把垃圾扔进垃圾桶。与此同时，攻击者注意到了这一情况，并拿起桌上的一把刀。防卫者举起双手，表示自己无意伤害对方，但攻击者仍继续向其走去。随后，防卫者注意到沙发上有一根棒球棒，便拿起它自我防护，并准备进行防卫。此时，目击者察觉到异样，转身朝门口走去。攻击者试图用刀伤害防卫者。防卫者开始自卫，用球棒击打攻击者两次，将其打倒在地。防卫者击打时，目击者回头查看发生了什么。之后，防卫者放下球棒，走开几步，随后又折返回来查看攻击者的情况。

5.2 任务

这项研究分为两个阶段，总时长约一小时。第一阶段旨在确定当前工具是否能够让用户轻松观察犯罪现场，以及观察角度如何影响解读。此前的研究已探讨过这一问题，因此我们可以评估研究发现是否与现有研究一致。第二阶段聚焦于动画创作任务，这是我们所提出工具的主要目标。由于目前没有可供比较的同类创作工具，因此比较两个阶段的可用性和任务负荷评分，可以间接评估参与者对我们的创作工具相较于仅观察工具的看法。

5.2.1 阶段*1*：观察与分析。在这一阶段，参与者只需从不同视角观察场景的预生成动画。

任务1 参与者只能在目击者行走的大致区域内观看动画。**任务2** 参与者从俯视视角（约 20 米高）观看动画，移动不受限制。此外，如有需要，他们可以向地面靠近最多 10 米。**任务3** 参与者可以在建筑物内不受限制地观察动画。



(a) 场景环境的俯视视角。



(b) 用户研究场景中的关键时刻，按时间顺序从左到右、从上到下排列。

图 6：用户研究场景概览。

每项任务结束后，参与者需要回答以下问题：

- 紫色角色采取了哪些行动？其意图是什么？
- 目击者能看到什么？他们在场景中辨认出了多少人？

此外，我们询问参与者在完成任务1后对其回答的信心程度，以及他们在完成任务3后如何修改回答。参与者可以根据需要反复播放动画，直到他们认为自己已经准备好回答问题。

5.2.2 阶段 *2*：动画创作。在此阶段，参与者必须扮演紫色角色，并重复演示该动画，直到认为效果正确。为此，他们需要添加一个紫色角色和一根棒球棒来设置动画。此外，他们还需要配置创建动画所需的设置，包括创建轨道和槽位、添加身体追踪效果到槽位，并将角色指定为其目标。

5.3 测试、问卷与理由

我们根据参与者在定性问题和定量指标方面的回答与性能，对其进行个体和集体评估，具体如下：

可用性与工作负荷。 系统可用性量表（SUS） [21] 和 NASA 任务负荷指数（TLX） [46]是人机交互研究中常用的问卷 [54]，用于测量系统/工具/方法的可用性和感知工作负荷。我们采用了原始 NASA-TLX，因为调查的第二部分可能会让参与者感到困惑 [14]，而且这种做法在该领域也很常见（例如， [14, 79]）。虽然 SUS 和 NASA-TLX 分数能够提供有价值的见解，但通常应将其与基线进行比较。本研究聚焦于动画犯罪现场创作；然而，正如第 2.2 节所述，扩展现实中没有类似工具可作为比较基线。能够制作角色动画的桌面软件过于复杂，需要大量培训，这对于非三维建模专家而言并不可行。

阶段1的描述性问题。阶段1探讨受过培训的法证专家和未受过培训的人员在虚拟现实中进行犯罪现场观察与分析的益处和挑战。通过他们对任务1至3的上述问题所作的定性回答，呈现参与犯罪调查与判决的不同利益相关者的观点。这些问题旨在评估从不同角度观察动画犯罪现场会如何影响观察者对事件和意图的感知。

动画质量评估。我们分两轮进行盲法专家评审（评审者为表1中的第一位和第二位专家）。每位评审者在每轮中看到的动画顺序均为随机排列。每位评审者观看每段动画，并按照1分（质量差）至5分（质量极佳）进行评分，同时记录扣分所依据的标准。鉴于数据集包含17段展示相似动作的动画，且参与者人数和分组信息未公开，我们预计评审者不太可能记得自己先前对某段特定动画的评分。[2]

位置和注视模式。我们分别针对每项任务，收集参与者在阶段1和阶段 2中的位置和注视方向。对于阶段1，综合分析参与者通常选择从不同角度观察虚拟现实动画场景的位置及其各自的视野，是很有帮助的。对于阶段 2，参与者的位置可以显示角色动画中的路径如何因参与者而异，从而补充动画质量评估。

用户交互中的观察上述测试和数据收集中仍有一些行为数据未被揭示，这些数据也可能未包含在参与者对自身表现的反思中。这不仅能为未来研究中的扩展现实和取证研究群体提供见解，也有助于理解某些结果数据背后的原因。

5.4 定性分析方法

完成用户研究后，参与者回答了五个开放式问题，内容涉及与传统工具的比较、

[2]评估设计的更多细节见补充材料。

动画对解读的影响、不同观察角度带来的影响、潜在用例以及改进建议。

鉴于这项定性研究具有探索性质，我们采用反思性主题分析进行归纳分析 [18, 19]，由两位编码者完成。编码者首先熟悉参与者的回答，随后独立对回答进行编码。在一次单独的讨论中，他们共同探讨编码，以找出一致的编码；对于任何分歧，则由作者中的第三位研究者（表1中的#1）进行裁定，该研究者是犯罪现场重建专家。他们还确定了初步主题，并对其进行审阅和完善，最终形成一组主题。[3] 生成的主题、反思性分析以及量化编码的可视化结果详见第7节。

5.5 参与者

表2详细列出了参与者的人口统计信息和经验信息。我们招募了18名参与者，其中6人拥有犯罪学或犯罪现场调查相关学位，或接受过相关正规培训（受训组）。未受训组由大学生组成，涵盖本科至博士阶段，所学领域包括信息技术、工程学和科学。本文其余部分将受训组的参与者编号（PID）记为T1至T6，未受训组的参与者编号记为U1至U12。

表 2：参与者的人口统计特征和经验。受训组包括 T1–T6；未受训组包括 U1–U12。扩展现实经验等级为每日、每周、每月、很少和从不。犯罪现场调查经验等级为专家、高级、中级、基础和不了解。

PID	年龄（岁）	性别	扩展现实经验	犯罪现场调查经验
T1	25	F	很少	高级
T2	52	M	每月	专家
T3	47	M	很少	高级
T4	[36-45]	M	很少	中级
T5	28	M	很少	基础
T6	[36-45]	M	从不	基础
U1	23	M	很少	基础
U2	28	M	每月	基础
U3	35	F	很少	不了解
U4	34	F	很少	基础
U5	39	M	从不	中级
U6	33	F	从不	不了解
U7	30	F	从不	不了解
U8	29	M	每周	基础
U9	[26-35]	F	很少	基础
U10	[36-45]	F	每周	基础
U11	28	F	每月	不了解
U12	[26-35]	F	很少	基础

有趣的是，未受过培训组的一些参与者认为自己具备基础到中级知识，这主要是因为他们看过或玩过相关电影、游戏和纪录片。

[3]关于已识别编码、分组和生成主题的报告见补充材料。

在开始阶段1之前，参与者接受了有关用户界面、VR 导航和工具使用方法的培训。在阶段 2，参与者被要求添加轨道、创建任意属性和效果、录制并回放动画，以及对插槽进行排序、修剪和删除。他们在引导员的指导下按自己的节奏完成这些任务。本研究已获莫纳什大学伦理委员会批准（编号：44402）。

5.6 设置

本研究使用 Meta Quest Pro VR 头显。由于对扫描所得建筑物进行高斯泼溅渲染的处理过程较为复杂，我们在个人电脑上的 Unity 中运行应用程序，并通过 Meta Quest Link（Air Link）经由 5G Wi-Fi 网络将画面串流至头显。应用程序运行于 Unity 版本 2022.3.29f1，使用 Mixed Reality Toolkit 3 和 Meta Movement SDK。个人电脑的配置为：Intel i9-9900K 3.6 GHz 中央处理器、64 GB 内存和 Nvidia RTX 2080 Super 图形处理器。

使用 Niantic 的 Scaniverse 应用程序，通过 Apple iPhone 15 Pro Max 从建筑物内的三个不同位置扫描了环境。点云数据经合并后，由 Unity Gaussian Splatting 软件包进行渲染。[4] 用户研究在一处面积为 6×4 米的室内空间进行，参与者可以在其中自由移动。我们使用 Matplotlib [49] 和 Seaborn [94] 库将结果数据可视化。

6 定量结果

我们报告了可用性、任务负荷、定性反馈以及观察到的行为模式。

6.1 可用性与工作负荷分析

受训专家组规模较小（$n = 6$）。夏皮罗-威尔克检验拒绝了阶段1的系统可用性量表评分 [81] 符合正态分布的假设（$W = 0.8901$，$p = 0.039$）。因此，我们在适当情况下使用威尔科克森符号秩检验 [95] 和曼-惠特尼 U 检验 [62]——这两种经典的非参数检验常用于分析人机交互中的问卷数据 [96]。[5] 本节使用 p 值，但避免以二分法进行解读[6]。我们报告总体评分的置信区间，以便直观地解读效应量 [12, 36]。我们在此讨论那些有证据（即使证据较弱）可用于比较组间差异的结果；完整结果见补充材料。

图 7 展示了系统可用性量表和 NASA-TLX 在不同阶段及组别中的评分。对每组分别使用相同检验比较不同阶段的结果表明，只有未受训组的系统可用性量表评分差异有较强证据（$W = 9.5$，$p = 0.042$），而受训组在阶段1和阶段2之间的 NASA-TLX 评分差异仅有较弱证据（$W = 0.0$，$p = 0.062$）。按组别划分的测量指标中较大的误差线，或可解释为何其证据弱于前文所示的组合结果。

使用曼-惠特尼 U 检验比较两组后，我们发现，在任何阶段或测量指标上，受训组与未受训组之间均无明显差异证据（或仅有较弱证据）。因此，下面列出合并组的详细得分。

[4]github.com/aras-p/UnityGaussianSplatting，访问日期：2025 年 6 月 9 日——SUS 和 NASA-TLX 问卷的结果，以及全面的正态性检验和测试依据，均见补充材料。[6]遵循当前的统计解释指南 [8, 15, 31, 47]

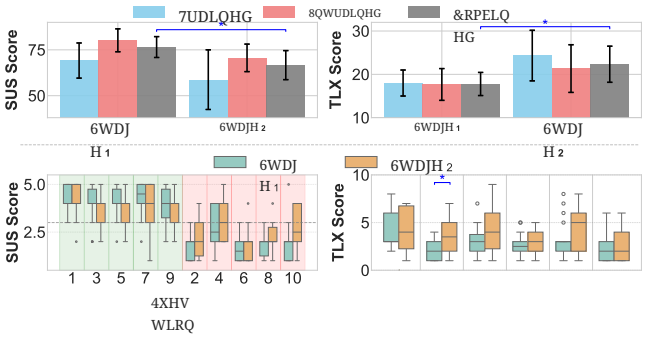


图 7：系统可用性量表和 NASA-TLX 得分。比较各阶段和组别的可用性（左上）与任务负荷（右上）。误差线：95% 自助法置信区间。（左下）比较阶段1与阶段 2 的系统可用性量表各问题得分。正向问题得分越高、负向问题得分越低，表示可用性越好。（右下）比较阶段1与阶段 2 的 NASA-TLX 得分。除性能维度外，所有维度的高分均表示需求更高；性能维度得分越高则表示性能越差。"*"表示配对间存在显著差异（p <0.05）。

详细的 SUS 评分（图 7 左下）表明，参与者对可用性的大多数方面总体持积极态度，但在阶段 方面需要培训（Q7 存在差异的强证据（W = 0.0，p 0 015 10 = 5 0, = 0 002 2 .）；Q 存在差异的强证据（$W.p.$））。

如第 5.3 节所述，对不同领域和群组的原始得分进行比较，信息量较低，但可以反映我们的原型总体上受到的认可程度。根据 Sauro-Lewis 量表 [57]，，阶段1的系统可用性量表得分（M = 76.53，SD = 12.46）评级为 B（高于平均水平，百分位数为 70–79），阶段 2 的系统可用性量表得分（M = 66.67，SD = 17.21）评级为 C（平均水平，百分位数为 41–59）。

6.2 阶段1 描述性回答

从目击者区域观察。 从走廊尽头观察时，大多数观察者（12/18）都能辨认出视野内紫色角色的所有动作，除了扔掉垃圾的动作，以及绿色角色的手部动作。他们注意到发生了打斗，但不清楚其意图。从这个距离看，大多数参与者（15/18）未能辨认出绿色角色手持的武器；其中一些人（6/18）甚至认为绿色角色的手里什么也没有。所有参与者都认为紫色角色很可能负有责任，但许多人（8/18）明确表示不确定，尤其是因为紫色角色在打斗前摆出了投降姿势。尽管如此，所有参与者都表示存在一定程度的不确定性，因为他们无法清楚地看见房间内部，也不确定现场有多少人。然而，只有少数人正确指出了目击者不可能看到的具体部分，因为大多数参与者主要关注紫色角色，或没有仔细追踪目击者究竟在何时转身，也未能准确追踪其视角。受训组的描述显然包含了更多细节，例如估计目击者与紫色角色之间的距离为"约 *10* 米"（T2），或"一种器具，可能有 *60–70* 厘米长"（T3）。然而，他们距离最近时的实际距离约为 17.5 米。

俯视视角。 大量参与者（14/18）认为，紫色角色没有对绿色角色采取任何直接行动。然而，紫色角色进入房间时正在进行什么活动仍不明确，而这可能触发了绿色角色的攻击行为。尽管如此，绿色角色对紫色角色摆出的攻击姿态，加上紫色角色的投降姿态，使大多数参与者认为紫色角色很可能是在自卫。从这一视角来看，其他不确定之处还包括绿色角色手持的确切武器——尽管有些参与者对此进行了猜测——以及绿色角色正在实施的具体行动。尽管我们将这一视角设置在20米高处，以覆盖整条走廊，但仍有部分参与者要求放大画面；放大后，他们能够辨认出绿色角色所持武器的类型，却没能发现紫色角色正在丢弃垃圾。很少有参与者（3/18）继续从这一视角关注目击者。不过，这些参与者并未获得任何额外信息。

室内视角。 从这个角度来看，所有参与者都能清晰、准确地理解事件，并正确识别谁是攻击者、谁在进行防御。然而，一些参与者仍不确定绿色角色的意图，并质疑其为何卷入冲突；这可能是因为有些细节没有呈现出来。此外，少数参与者补充了其他观点。例如，有人评论道："如果是我，我会快得多，因为那把刀还在场。我不会放下球棒。"(T3)、"这看起来不像是预谋的什么的，因为你为什么要把球棒丢下？"(T6)，以及"刀的角度有点不太像真的刺击尝试。"(T3)。这些观察引发了对自卫是否确实由威胁引起的怀疑。另有一条评论提到："我没看到紫色角色手里有任何垃圾。"(U9)。动画细节让这位参与者感到不确定：紫色角色究竟是在捡起还是放下某样东西，从而导致绿色角色发起冲突。尽管如此，这位参与者认为这些可能性极低。

6.3 第二阶段动画制作表现

参与者制作的动画评分见图8。[7] 53%的评分在两轮之间完全一致（18个重合点），44%（15个）相差1分，3%（1组，即U10：评审员1）相差2分。虽然评分存在一定差异在所难免，但我们进一步考察了U10评分不一致的原因。评审员1在两轮中都指出，紫色角色移动稍快，且第一次尝试时没有成功握住球棒。不过，评审员1在第一轮中提到紫色角色"击打了三次"而非两次，但在第二轮中没有提及。这可能是由于理解不同，也可能只是人为错误。除此之外，其余评分基本保持一致。

[7]U5 的动画未能正确保存，因此未进行评分 d.

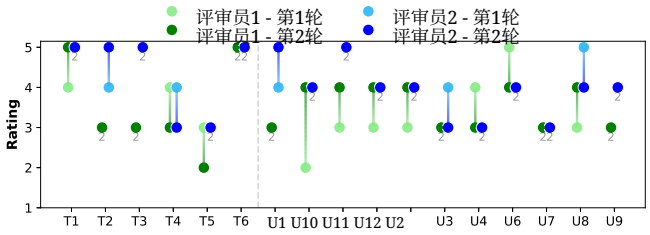


图8：每位参与者对动画的评分及各轮次之间的变化。点旁的数字表示重叠点的数量。

图8显示，受训组（虚线左侧）在复现动画方面的表现略好于未受训组（虚线右侧）。受训组的错误主要与握持球棒有关，部分情况还导致打斗环节出现时机问题。相比之下，未受训组的主要问题包括握持球棒、时机、位置安排，以及击打的次数和方法。

6.4 位置和注视模式

图9展示了任务1至3期间的主要位置和注视方向。

任务1。 走廊尽头较远处的一片较深区域（聚类1）显示了参与者选择在此观察目击者行动，尽管该处距离犯罪现场更远。位置数据上叠加的弧线也显示出较窄的注视方向范围，即参与者并未四处张望。有些参与者在该区域内移动，并近距离接近目击者。

任务2。 由于从俯视视角可以看到整个空间，因此不显示位置模式。相反，我们分析了场景中的注视命中分布（见图 10）。结果显示，参与者的注意力主要集中在紫色和绿色角色上，而对目击者的关注明显较少。

任务3图9中的位置分布表明，参与者在整个房间内移动，但更频繁地停留在三个区域（聚类1至3）。圆弧显示，位于聚类1附近的参与者注视方向范围更广，注视角度也更分散。他们必须反复转头，才能更好地追踪两个角色的动作和时机。相比之下，站在走廊中的参与者（聚类2和3），尤其是靠近聚类3的参与者，无须如此费力，因为他们的注视覆盖的角度范围更窄、更连续，因此可能受到的干扰更少。

阶段 2。图 11展示了所有参与者在创建动画时的移动路径，并与原始动画中紫色角色的路径（以黑色标示）进行了比较。参与者所选路径存在显著差异，这可能会影响

从目击者的视角看，该事件的可见性。

6.5 用户交互观察

参与者通常从目击者的视角播放动画三到四次，从俯视视角播放两次，并在房间内播放两次。一些调整位置的参与者

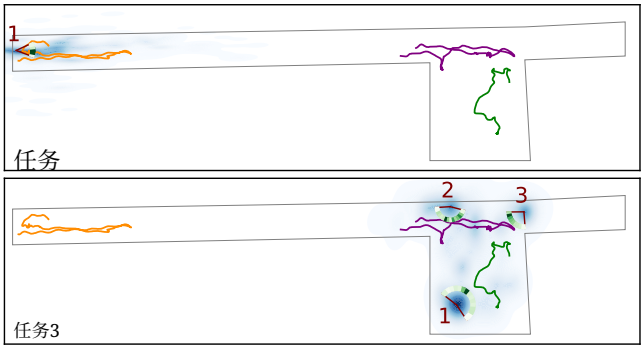


图9：参与者在每个任务1和任务3期间的位置分布（所有参与者的归一化任务时长）。橙色、紫色和绿色线条分别表示动画过程中目击者、防卫者和攻击者的位置。圆弧表示参与者在编号簇中心0.5 米半径范围内的注视方向分布（去除离群值后）。任务1中的聚类1显示，参与者大多停留在目击者身后的门附近，以便同时看到所有角色，因此观看方向的范围较窄。他们还跟随目击者（橙色）行走，以从目击者的位置进行观看。类似地，任务3中的聚类1-3揭示了三个主要观看位置。聚类3提供了最佳的（较窄的）目击者观察范围和可见性，并且观察角度的分布更加平滑（由圆弧上绿色的密度表示），而聚类1则需要大幅度的头部和眼部运动，并会遮挡目击者。尽管如此，参与者在聚类1中花费了更多时间，这表明找到最佳位置并不总是显而易见的。

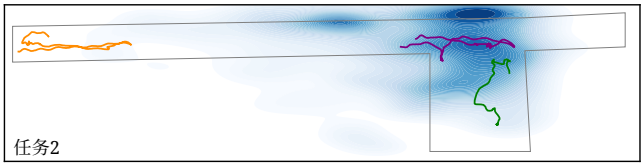


图 10：任务2期间所有参与者从俯视视角观察场景时注视命中的分布（所有参与者均采用归一化任务时长）。密度图显示，参与者高度关注受害者（紫色）路径，主要集中在打斗区域附近；对攻击者（绿色）的关注较少，对目击者（橙色）的关注则更少。由于这里呈现的是头部注视位置而非眼睛注视，因此关注区域与注视命中密度最高的区域之间存在轻微偏移。

他们在房间中恰当地定位自己，甚至只播放一次后就准备好作答。在回答任务 1 至 3 后的问题时，参与者经常用手势指出虚拟现实中的方向、对象和位置，而不是口头描述每个细节，仿佛他们和研究人员都身处虚拟现实之中。

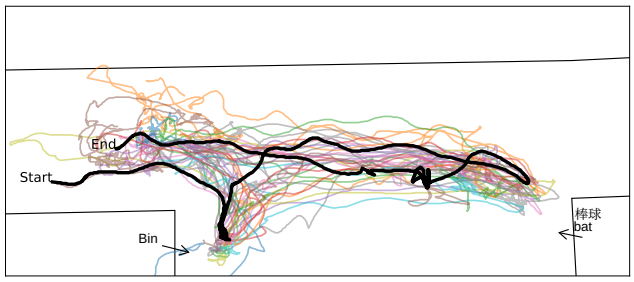


图 11：阶段 2 中参与者的移动路径以不同颜色表示。黑线表示原始角色动画的移动情况。该图显示，尽管每位参与者的移动模式相似——尤其是在起点和终点、垃圾桶以及棒球棒附近等关键区域——但在其他缺乏明确参照点的区域，准确性会下降。

7 定性结果

本节将从两个详细程度层面报告对参与者反馈的分析——包括与传统方法的比较、动画、视角、用例和所需改进：量化可视化和反思性主题分析。

7.1 概述

表3按类别（列）和各位参与者（彩色单元格）汇总了从参与者问卷回复中提取的编码，并对其进行了量化。量化依据两名编码者（意见不一致时由第三名编码者参与）对每个编码是否反映积极、消极或混合情感倾向所达成的一致意见；若多个编码体现了不同的情感倾向，也归为混合情感倾向。此表显示，参与者对视角和动画的益处持积极看法，并认为它们优于当前做法。尽管参与者成功制作了动画，但表中显示，关于用户界面（UI）的负面评价很多。参与者认为该工具有助于分析、审查和培训。对于该工具在法庭中的应用，意见不一，详见 7.2(2)。

7.2 反思性主题分析

参与者反馈的分析可归纳为六个主题：

1. 空间和时间表征有助于视觉认知和感知，但也可能产生误导性的说服力。

犯罪现场的扩展现实三维动画重建提供了自然的漫游体验，这是草图、照片和视频录像等传统方法，甚至屏幕上的三维可视化都无法实现的。解读数十张或数百张图像，或分析从不同角度拍摄的多个视频，可能是一项要求极高的认知任务。相比之下，三维动画提供了一个连贯统一的环境，不会产生割裂感。参与者反馈也体现了这一点：他们明显更偏好动画重建，而不是照片和视频，并指出

动画和不同视角增强了他们的空间感知能力，以及对场景形成整体理解的能力。研究还发现，虚拟现实呈现有助于“弄清人员的动机/意图，因为采用这种虚拟现实方案时，共情程度高得多”（U2）。动画还展示了动作的时序，有助于确定原因并评估互动的适当性。然而，虚拟调查无法完全取代亲自到访场景，因为必须亲身评估各个方面。

然而，犯罪学领域的非专家有时可能会将表述的可理解性误认为实际事件的准确性，从而使描绘显得比实际依据所允许的更具说服力。一些参与者的评论便体现了这一点，他们认为自己获得了“对某一事件更准确、更全面的理解”（U12），或认为“对该事件的解读更接近真相”（U11）。

2. 该方法的法律可接受性需要明确的使用边界。

参与者对动画重建的来源持有不同看法。一些人认为，该工具对于法庭展示非常有用，尤其有助于陪审团理解复杂情景。另一些人则质疑这一用例，认为它“很少属于可向陪审团提交的证据展示”（T5），因为对于许多描绘的细节，例如身体动作、位置和行为，很少有可验证的证据。

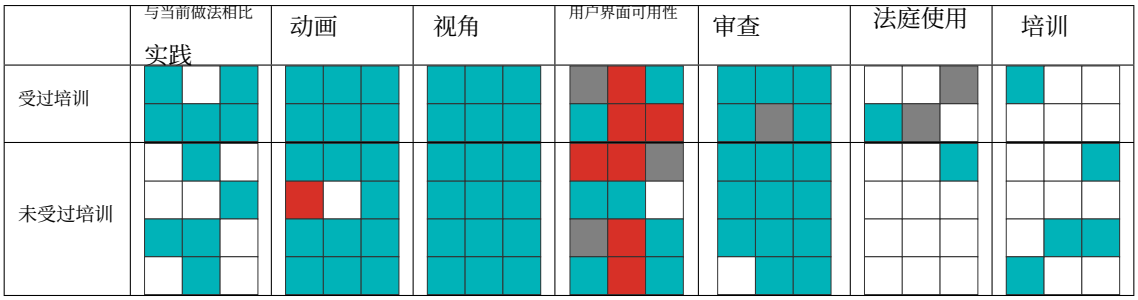
重建的来源高度取决于生成它所依据的源数据。然而，我们目前的方法无法区分重建中的不确定与确定部分，这可能导致某些方面出现误导性解读。这一局限引发了人们对其在法庭情境中可采性的担忧。因此，对于法庭使用场景，需要明确定义适当且负责任的使用范围，并且还需要进一步研究和改进，才能达到法律标准所要求的可接受程度。

3. 提高犯罪现场重现的可及性，推动司法程序民主化。

参与者普遍认为自己有能力重现场景，并且发现制作动画相对容易。第 6.3 节中的动画评估结果也支持这一点。尽管受训组的重现效果相对更好，但未受训组的得分并未显著降低。参与者的反馈也反映出动画创作的易用性。例如，T1 表示：“到最后，我相当有信心能够再次独立使用该工具”。受训组和未受训组都能够使用该工具制作动画，不过，额外的培训和经验可能会提高他们的熟练程度。在扩展现实中使用具身动作，使角色动画的生成变得直观。不过，一些可用性问题限制了参与者的有效性，尽管原型存在此类挑战在预期之中。此外，受训组需要更多扩展现实经验才能与虚拟对象互动，而未受训组则会受益于基础犯罪学培训，从而更为审慎地考虑动作和情景。总体而言，与当前实践相比，这种方法在帮助非专家创作动画方面展现出良好前景，从而支持更民主化的构思，并成为一种交流工具。

4. 该工具更好地支持高层次/抽象分析。

表3：参与者对不同类别反馈的编码分布。每个单元格代表一位参与者对我们方法的看法，参与者编号从左到右、从上到下递增。蓝色单元格表示支持该类别，红色单元格表示反对，灰色单元格表示意见不一或反馈不明确，空白单元格表示没有反馈。



参与者认为，该工具有助于从整体上了解场景，整合多个角度、行动和当事方，并澄清因特定视角而产生的误解。他们还指出，如中所示，该工具不支持对细节进行近距离检视，也无法实现高保真重建。正如我们所预期的那样，因此该工具更适合进行宏观、概括性的探索，而非精确、细致的分析；这种精确性将与前文讨论的便利性和可及性目标相冲突，也不属于该工具的预期范围。

尽管这一局限似乎与对法律可接受性的担忧（主题 2）相似，但二者在根本上有所不同。一种呈现可以依据来源明确且可验证的数据，例如视频录像；而任何重建必然都会涉及一定程度的数据丢失。这种损失不仅源于当前的技术局限，也源于有关所需保真度水平的设计决策。因此，正如参与者所反思的那样，与其将该工具理解为支持精确测量数据或详细分析任务的工具，不如将其视为帮助用户整体把握场景并澄清其动态的工具。不过，未来的工作也可以在设计选择中进一步处理这一方面，而无需显著增加复杂性或技能要求方面的负担。

5. 灵活的平台，适用于广泛的应用场景，但最适合用于展示、知识共享和教育。

直观地在短时间内创建动画，能为许多应用场景带来益处。正如参与者所设想的，该工具既可支持一些显而易见的用例，例如通过补全视频录像中被遮挡的场景部分来分析犯罪现场、用于法庭展示（使用较少令人不安的图片）以及警务培训；也可应用于娱乐、应急规划与培训、博物馆体验等不那么显而易见的领域。例如，在警务培训中，该工具可让人们随时随地了解世界各地的各类情景，尤其适用于高压环境下的决策练习。这也凸显了虚拟现实作为创作动画三维故事平台的潜力，并且该平台可以灵活适配其他情境。因此，这是一个很有价值的领域，未来的进展有望产生广泛而深远的影响。

6. 该虚拟现实工具适用于此应用，但可用性可能会成为使用障碍。

参与者普遍认为该工具易于使用、具有吸引力，甚至有趣，并且适用于犯罪现场调查（第 6.1 节中的 SUS 评分也反映了这一点）。他们还指出了进一步增强其分析能力和可用性的若干机会。通过音频增强场景重建，以及提升动画创作中动作表现的便捷性和准确性，被认为是深化分析潜力的途径。尤其是，为高度肢体化或危险的动作创作具身动画可能难以实现，需要专门设计的技术。

关于可用性，参与者指出，新技术带来了一系列改进：交互界面和控制方式更加直观，分辨率和视觉保真度更高，并且可以使用手势或语音命令取代基于按钮的交互。Apple Vision Pro 和 Samsung Galaxy XR 等新兴头显已经显著提升了其中许多方面，这表明未来的研究可以轻松利用这些进步。

8 讨论

尽管对定量和定性结果的分析提供了一些见解，但仍需提及伦理和法律考量以及本研究更广泛的影响，以便将我们的发现置于恰当的背景中，并为未来的研究与实践提供更充分的参考。

8.1 伦理与法律考量

在法律情境中实际采用现有方法的变体，需要依据 ISO 21043 法庭科学 [63] 提供技术层面的论证。鉴于这可能对司法结果造成严重影响，这种验证至关重要。因此，我们将讨论与所提方法相关的伦理和法律考量，并建议明确其最适用的情形及使用方式。

区分基于证据的动画/动作与假设性的动画/动作。

基于证据的解释和表征是法庭科学工作的基准，但可靠证据并非总是唾手可得。

因此，基于证据的、假设性的和混合的重建在犯罪现场调查中都发挥着重要作用。调查团队通常能轻松区分这些形式，这一点体现在他们对审查用例（表3）、知识共享和抽象分析（第7.2节中的主题4和主题5）的积极看法上。尽管人们对证据可采性存在担忧，但最终仍由法庭根据具体案件作出决定，而且控方和辩方往往会达成一致。

对于在法庭上将此类重建用作向陪审团展示的工具，人们的看法则较为多元。人们担心，这些重建可能因其逼真程度和虚假的说服力而引入偏见。这是因为人们持有“眼见为实”态度 [42, 77]——倾向于相信逼真的表征——尽管这些表征只是具有不确定性的假设；尤其是陪审员并未受过区分假设与证据的训练。尽管如此，受过培训的参与者认为，这些重建在法庭上具有中等程度的实用性，因为动画形式有助于理解，并能支持司法决策。我们有意采用人形机器人化身，而非超写实人类化身，以在减少偏见与提升感知效果之间取得平衡，这对于决策过程至关重要 [48]。

我们认为，与其他展示形式一样——其中可能既包含基于证据的表征，也包含假设性表征——应以口头方式向陪审员说明不确定性，或通过视觉方式突出显示。我们也认同先前研究的建议 [10]：表征越逼真、越高级，就越应具备可及性。为促进可及性与公平性，我们不仅通过观察，还通过动画重建，让非专业参与者评估了我们的方法。因此，在司法程序中，其他各方可以通过提出反例，对假设性表征提出质疑。我们的方法尤其适用于检验可能与不可能的情景。可能发生的情景未必就是真实发生过的，但有助于缩小不可能情景的范围，并遏制不切实际的主张。这在需要验证目击者描述的案件中尤具价值，且先前研究表明，扩展现实在此类情境中表现良好 [73]。这种方法在伦理上也可能更可取：它能提供有用的细节，同时避免过度逼真，并减少重访犯罪现场或接触令人痛苦的图像的需要，从而限制对受害者和证人造成的进一步心理伤害。

用于演示推定事件，而非确定意图或动机。

即使存在佐证，建模也可以达到不同的细节和精度水平。我们的工具包旨在实现“快速重建”，并让不具备专业三维建模技能的用户也能“轻松使用”；因此，本工具并不旨在对动作进行细致且完全精确的重建。这与可视化位置模式（图 11）以及动画创作性能（第 6.3 节）相一致。相反，我们的方法支持通过情景再现展示合理的事件序列，尤其是对已通过数据支持的犯罪现场重建确定的事件间隔进行展示。还应认识到，犯罪现场很少能提供得出确定性结论所需的全部信息——这并非我们方法独有的局限。因此，仅凭这些重建来判定意图或动机并非总是可行，也不是本方法的目的；不过，这些重建有助于验证与以下内容相符的假设

既有研究 [25, 73]。因此，除了基于证据的重建或假设性重建之外，我们还明确说明了拟议工具的预期精度和细节水平，以便透明地评估其应在何时以及如何使用。

数据获取与共享的法律层面。

另一个既可能限制又可能支持我们的方法以及类似三维捕获表示的因素，是与数据收集和共享相关的安全与隐私问题 [72], ，以及各司法管辖区之间存在差异的法规。例如，在某些地区，即使是执法部门为刑事案件开展工作，也可能禁止在私人住宅和建筑物内进行三维捕获。此外，与第三方共享此类数据通常受到更严格的限制。这限制了我们的工具作为面向所有人的易用平台的潜力，原因在于隐私、数据安全以及篡改风险。即使在规定较为灵活的司法管辖区，关于共享可识别数据以及证据披露免责声明的严格规定仍然存在——尤其是在涉及儿童的情况下——因为这些行为可能使个人陷入危险或造成其他风险。尽管如此，在此类情况下，三维建模表示和动画可能比摄影和摄像等传统方法更受青睐，从而在伦理和法律层面更易被接受。

8.2 设计启示与建议

尽管我们的研究立足于法律领域，但其中的挑战并非都为该领域所独有。以下方面也体现了我们对这项工作中更广泛的可视化与人机交互研究所面临重要挑战的见解。

数据来源。

正如参与者在主题 2（第7.2节）中的反馈所强调的，在敏感应用中提供数据来源对于提高可视化的透明度和可靠性至关重要。在我们的研究中，场景是虚构的，但我们的系统也支持在场景中以缩略图形式呈现照片。对于关键应用，必须明确指出数据源；如果数据是合成的，还应说明其生成过程。标准可视化通常会包含来源引文，有时也会通过工具提示提供更详细的信息。我们认为，XR 中的交互式三维环境可以让用户按需获取详细数据及其来源，并以受工具提示启发的直观方式呈现，从而增强这一能力。传统方法（如三维渲染视频或其他非交互式表示）不具备这种能力，而试图展示所有来源则可能造成视觉杂乱。在交互式三维环境中，尤其是在 XR 中，来自采集点的照片缩略图，以及附带采集路径的视频（例如，通过对三维环境中的身体佩戴式摄像机进行姿态估计 [39]），可以有效传达来源信息，同时避免让用户不堪重负。尽管如此，如何有效地（并可能以自动化方式）将三维环境中的元素与其底层数据关联起来，仍为未来研究提供了机会。

不确定性可视化。

基于主题2和主题4（第7.2节），我们认识到，法律方面的考量要求清楚说明可视化中所示信息的来源，即这些信息是直接证据还是推断得出的。不确定性可以通过口头说明或可视化方式呈现。有效的不确定性可视化是

人机交互领域，尤其是可视化领域的活跃研究方向 [51]。标准图表通常使用误差线或置信水平（如图7所示），但这类提示虽然有助于理解，也可能增加认知负荷。

在三维或动画等非标准可视化媒介中，传达不确定性更具挑战性。与照片级真实感人物化身相比，我们应用中的类人机器人化身有助于减少偏见，例如避免使用可能引发偏见的身份识别特征或面部表情。在犯罪现场重建中，表示位置、移动或外观不精确或未知状态的其他方法还包括使用抽象形体（例如用圆锥体或球体代替带有四肢的身体） [77], 、有选择地模糊场景元素，或使用动画振动 [22]。尽管这些技术具有优势，但也可能使受众感到信息过载和困惑 [38], ，尤其是陪审团等非专家群体。然而，这些技术及其组合的相对有效性仍有待进一步研究。

以专家为中心的协同设计。

我们与法证调查专家持续开展的合作，为未来希望开展需要与领域专家进行多次、长期会议的协同设计研究者提供了经验。简而言之：

（1）在专家共同设计中，重点应放在洞察的深度，而非参与者数量上。在人机交互社区中，能够产生更丰富洞察的较小样本量正逐渐得到认可；例如，近期在 IEEE VIS 2025 举办的研讨会“参与关键劳动力的共同设计与评估”对此进行了深入讨论，其他人机交互出版物中也采用了这种做法 [17, 27, 68]。（2）在敏感领域，一家机构获得的伦理审批可能不会被其他机构认可，而非以研究为重点的机构处理申请的速度可能较慢。因此，建议在伦理申请中采用灵活的研究设计，而不是推迟到研究设计的最终版本；不过，由于存在潜在的误用风险，这不适用于临床试验或高风险研究 [40]。（3）让经验丰富的专家担任共同作者，而不仅仅是参与者，具有很高的价值。这有助于促进更深入的参与、丰富设计成果，并能够解决伦理申请中的问题。在透明报告的情况下，正如既有研究所示 [17, 68], ，除非会引入显著的偏见风险，否则这种做法通常是可以接受的。本文采用了这一方法。（4）使用高保真度原型，例如通过绿野仙踪法构建的原型，而不是常见的基于纸张的共同设计会议或研讨会，能够加强领域专家与人机交互研究人员之间的沟通，尤其适用于扩展现实等新兴技术。缺少此类原型时，由于专家不熟悉新兴技术，讨论往往停留在基础层面。尽管这需要研究人员投入更多精力，但能够节省专家的时间，并改善总体成果。

[8]https://sites.google.com/view/ecwidna，访问于 2025 年 11 月 18 日

8.3 局限性

由于这些敏感机构存在安全限制，专家很难招募，我们的评估只能获得少量专家，从而限制了统计上稳健的分析。然而，方法学家和人机交互研究人员指出，对于类似人机交互研究的定量分析，并不存在一个能够显著提升其可信度的明确人数门槛 [9], ，而且大多数人机交互和可视化研究都依赖少量参与者 [27]。在专家招募方面，这一点尤其如此，因为专家招募既困难又昂贵，也是我们开展专家研究时必须面对的内在局限；对此我们已经习惯，并会据此进行处理和解读 [17, 67]。我们也承认，目前的工作仅涉及两个主要利益相关者群体，并未包括法官、律师和政策制定者等其他关键参与方。尽管专家参与者可以根据自身对该领域的熟悉程度，预见这些群体的一些视角，但他们无法全面评估只有领域专家才能识别的相关考量。

我们还面临若干技术挑战。Meta Move-ment SDK 无法提供精确的下肢关节定位，这限制了角色动画在下肢动作方面的准确性。从长远来看，利用高级计算机视觉算法的无标记追踪和视频转动画方法 [50, 59, 100]将提升全身动作捕捉能力，并有望实现将闭路电视和身体佩戴式摄像机影像 [39] 直接转换为角色动画。然而，在无法获取影像资料时，假设检验始终需要手动制作动画。此外，我们无法使用专业扫描仪——而这在资源匮乏的国家也可能并非负担得起的选择——这项限制可能影响了参与者的感知。

9 结论与未来工作

通过与法证专家开展协同设计过程，我们开发了一个框架和工具包，并实现了一个名为“Criminator”的原型。Cri minator 使用户无需掌握传统建模或动画技能，就能在虚拟现实中重建并重演动画犯罪现场。我们邀请犯罪现场调查员和非专业人士共同评估 Criminator，结果表明，该工具在场景观察和动画创作任务方面取得了相对成功。尽管动画创作被认为比观察略具挑战性，但性能方面的显著差异很少，证明该工具易于使用。专家参与者还指出，该工具可用于假设检验（例如事件排序和证人视角）、法庭展示以及警务培训。随着计算机视觉和三维扫描技术的迅速发展，这类工具很快就能变得更加实用。

未来的研究亟需扩大参与者群体，并让法官、律师等其他关键利益相关者参与设计和评估过程，以更好地识别此类工具带来的局限、顾虑和额外益处。此外，还需要开展更有力的比较研究和实证研究，考察能够实现无缝桌面端—扩展现实方案的新型设备，并纳入视频转动画算法。

致谢

作者谨向 Janis Dalins 和 Campbell Wilson（均来自莫纳什大学）致谢，感谢他们对共同设计过程的贡献，也感谢所有参与本研究的参与者提供了富有洞见的反馈和意见。本研究由维多利亚州法医医学研究所（VIFM）资助，并得到克努特和爱丽丝·瓦伦堡基金会（KAW 2019.0024）和马库斯和阿玛莉亚·瓦伦堡基金会（MAW 2023.0130）的部分支持。

参考文献

[1] [无日期]。基于想象构建的元宇宙社交媒体平台 — *flipsidexr.com*。[访问日期: 22-07-2024]。[2] 1989。审判中通过计算机模拟重现的动画证据——Delta 191 坠机事件。*ABA journal*。75（1989）。[3] 9NEWS。2016。三维重建视频揭示围困对峙期间狙击手的位置。https://www.9news.com.au/national/six-more-videos-of-lindt-siege-released 访问日期：2025年4月2日。[4] Daniel James Acton、Rosalyn Arnold、Gavin Williams、Nicky NG、Kirstyn Mackay 和 Sujeet Jaydeokar。2024。共同设计并试点一项虚拟现实干预措施，以提升智力障碍人士获得身心医疗保健服务的可及性。《心理健康与智力障碍进展》18卷2期（2024年1月），63–75。doi:10.1108/AMHID-10-2023-0039 出版商：Emerald Publishing Limited。[5] Raffael Affolter、Sebastian Eggert、Till Sieberth、Michael Thali 和 Lars Christian Ebert。2019。在法医尸检中应用增强现实——将 Microsoft HoloLens 用作 DICOM 查看器。《法医放射学与影像学杂志》16卷（ 2019 5 8 10 1016 2018 11 003 年3月），–。doi: 。/j.jofri. . .

[6] Meshal Albeedan、Hoshang Kolivand 和 Ramy Hammady。2023。通过整合任务—技术匹配模型与技术接受模型，评估混合现实在犯罪现场调查培训中的应用。*IEEE Access*（2023）。ISBN：2169-3536 出版商：IEEE。[7] Meshal Albeedan、Hoshang Kolivanda 和 Ramy Hammady。2024。犯罪现场调查培训混合现实系统的设计与评估：一种混合方法。虚拟现实28卷3期（2024年6月），127。doi:10.1007/s10055-024-01018-8[8] Valentin Amrhein、Sander Greenland 和 Blake McShane。2019。科学家起来反对统计显著性。《自然》567卷7748期（ 2019），305–307。[9] Peter Bacchetti。2010。当前的样本量惯例：缺陷、危害与替代方案。《*BMC* 医学》 8, 1 2010 10 1186 1741 7015 8 17 （3月）。

[10] doi: 。/ - - - JEREMY N. BAILENSON、JIM BLASCOVICH、ANDREW C. BEALL 和 BETH NOVECK。2006。虚拟环境、沉浸式虚拟环境与协作式虚拟环境在法庭中的应用。《法律与政策》28卷2期 2006 249 270 10 1111 1467（），–。arXiv:https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/ 。/j. - 9930.2006.00226.x doi:10.1111/j.1467-9930.2006.00226.x[11] Mayur Sudhir Balbudhe、B Suresh Kumar Shetty、Nayanatara Arun Kumar、Divyani Singh 和 Ayush Ishwar Sherekar。2025。犯罪现场重建：一项范围综述。《埃及法医科学杂志》15卷1期（2025年10月）。doi:10. 1186/s41935-025-00495-5[12] Lonni Besançon 和 Pierre Dragicevic。2019。CHI 中二分推断持续普遍存在。载于*2019*年 *CHI* 人机交互大会扩展摘要（苏格兰格拉斯哥）*(CHI EA '19)*。计算机协会，美国纽约州纽约市，1–11。doi:10.1145/ 3290607.3310432[13] Lonni Besançon、Amir Semmo、David Biau、Bruno Frachet、Virginie Pineau、El Hadi Sariali、Marc Soubeyrand、Rabah Taouachi、Tobias Isenberg 和 Pierre Dragicevic。2020。通过风格化降低人们对手术图像和视频的情感反应。《计算机图形论坛》39卷1期（2020），462–483。arXiv:https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/cgf.13886 doi:10.1111/cgf. 13886[14] Lonni Besançon、Paul Issartel、Mehdi Ammi 和 Tobias Isenberg。2017。用于三维操控的鼠标、触觉与实体输入。载于*ACM* 人机交互大会（*CHI*）论文集。美国丹佛，4727–4740。doi:10.1145/3025453.3025863[15] Lonni Besançon、Yvonne Jansen、Andy Cockburn 和 Pierre Dragicevic。2021。绝对或许：人机交互文献中的保留语和强化语。（2021年11月）。doi:10.31219/osf.io/mjg7h 工作论文或预印本。[16] Lonni Besançon、Amir Semmo、David J. Biau、Bruno Frachet、Virginie Pineau、El Hadi Sariali、Rabah Taouachi、Tobias Isenberg 和 Pierre Dragicevic。2018。通过颜色操控和风格化降低人们对手术图像的情感反应。载于计算美学、基于草图的界面与建模、非真实感动画和渲染联合研讨会论文集。ACM Press，加拿大维多利亚，4:1–4:13。doi:10.1145/3229147.3229158[17] Lonni Besançon、Anders Ynnerman、Daniel F Keefe、Lingyun Yu 和 Tobias Isenberg。2021。三维可视化空间界面的最新进展。《计算机图形论坛》 40, 1 2021 293 326 10 1111 14189（2月），–。

[18] doi: 。/cgf。Virginia Braun 和 Victoria Clarke。。《国际健康促进》中反思性主题分析报告方式的批判性评述。《国际健康促进》39，3（2024），daae049。[19] Virginia Braun、Victoria Clarke、Nikki Hayfield、Louise Davey 和 Elizabeth Jenkinson。2022。《反思性主题分析实践》。Springer International Publishing, Cham, 19 38 10 1007 978 3 031 13942 0_2 –。doi: 。/ - - - -

[20] PAUL G Breuninger。。使用三维计算机辅助绘图进行犯罪现场重建。《警察局长》62（1995），61–61。[21] John Brooke 等。1996。SUS——一种快速简便的可用性量表。《工业中的可用性评估》189，194（1996），4–7。[22] Ross Brown。2004。将动画视觉振动作为一种不确定性可视化技术。载于《第2届澳大拉西亚及东南亚计算机图形学与交互技术国际会议论文集》（新加坡）（GRAPHITE '04）。计算机协会，美国纽约州纽约市，84–89。doi:10.1145/988834.988849[23] Lucy Bryant、Neira Sedlarevic、Peter Stubbs、Benjamin Bailey、Vincent Nguyen、Andrew Bluff、Diana Barnett、Matt Estela、Carolyn Hayes、Chris Jacobs、Ian Kneebone、Cherie Lucas、Poonam Mehta、Emma Power、Bronwyn Hemsley 和。2024。面向沟通康复的沉浸式虚拟现实应用原型的协作式共同设计与评估（DISCOVR 原型）。《残疾与康复：辅助技术》19，1（2024），90–99。arXiv:https://doi.org/10.1080/17483107.2022.2063423 doi:10.1080/17483107.2022. 2063423 PMID: 35442823。[24] Ursula Buck、Silvio Naether、Marcel Braun、Stephan Bolliger、Hans Friederich、Christian Jackowski、Emin Aghayev、Andreas Christe、Peter Vock、Richard Dirnhofer 和 Michael J. Thali。2007。在交通事故分析中应用三维文档记录和几何重建方法：结合高分辨率表面扫描、放射学 MSCT/MRI 扫描和基于真实数据的动画。《Forensic Science International》170，1（2007），20–28。doi:10.1016/j. forsciint.2006.08.024[25] Ursula Buck、Silvio Naether、Beat Räss、Christian Jackowski 和 Michael J. Thali。2013。事故还是谋杀——采用三维方法进行虚拟犯罪现场重建。《Forensic Science International》225，1（2013），75–84。doi:10.1016/j. forsciint.2012.05.015[26] John M Butler。2015。法医 DNA 分析的未来。Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci. 370，1674（2015年8月），20140252。[27] Kelly Caine。2016。CHI 的样本量本地标准。载于《2016年 CHI 人机交互大会论文集》（美国加利福尼亚州圣何塞）（CHI '16）。计算机协会，美国纽约州纽约市， 981 992 10 1145 2858036 2858498 –。doi: 。/。Alberto Cannavò、

[28] Claudio Demartini、Lia Morra 和 Fabrizio Lamberti。2019。基于沉浸式虚拟现实的角色动画交互界面。IEEE Access 7 2019 125463 125480 10 1109 2019 2939427 （），–。doi: 。/

[29] ACCESS.。Rong-Chi Chang。。利用虚拟现实提升法医学教育：对 CSI 学习成效、情境兴趣和认知负荷的影响。《刑事司法教育杂志》0，0（2024），1–20。doi:10. 1080/10511253.2024.2372860[30] Ruizhao Chen、Ye Pan、Zhigang Deng、Lili Wang 和 Lizhuang Ma。2023。双重涂鸦：在沉浸式环境中使用 3+6 自由度运动手势绘制动画。载于第31届 ACM 多媒体国际会议论文集（加拿大安大略省渥太华）（ MM '23）。计算机协会，美国纽约州纽约市， 6998 7006 10 1145 3581783 3613783 –。doi: 。/。Andy

[31] Cockburn、Pierre Dragicevic、Lonni Besançon 和 Carl Gutwin。2020。实证计算机科学面临的重复性危机威胁。Commun. ACM 63，8 2020 70 79 10 1145 3360311（7月），–。doi: 。/[32] Rafael Rodrigues Cunha、Claude Thiago Arrabal、Marcelo Mour ao Dantas 和 Hélio Rodrigues Bassanelli。2022。激光扫描仪与无人机摄影测量：三维模型的统计比较及其对室外犯罪现场记录的影响。《Forensic Science International》330（2022）， 111100 10 1016 2021 111100 。

[33] doi: 。/j.forsciint.。Lee J. Curley、James Munro 和 Itiel E. Dror。2022。法律外行决策中的认知与人为因素：陪审员决策中的偏差来源。《医学、科学与法律》62，3（2022），206–215。arXiv:https://doi.org/10.1177/00258024221080655 doi:10.1177/ 00258024221080655 PMID: 35175157。[34] Dragoş Datcu、Stephan G. Lukosch 和 Heide K. Lukosch。2016。用于分布式协作犯罪现场调查的手持式增强现实。载于《2016年 ACM 群组工作支持国际会议论文集》。267–276。[35] Ishan Dixit、Samantha Kennedy、Joshua Piemontesi、Bruce Kennedy 和 Claudia Krebs。2019。哪种工具更合适：三维扫描还是摄影测量——取决于任务。Springer International Publishing，Cham，107–119。doi:10.1007/978-3- 030-06070-1 9

[36] ¯Pierre Dragicevic。2016。人机交互中的公平统计沟通。载于《人机交互的现代统计方法》。Springer, 291 330 10 1007 978 3 319 26633 6_13 –。doi: 。/

[37] - - - - Ben Fei 、 Jingyi Xu 、 Rui Zhang 、 Qingyuan Zhou 、 Weidong Yang 和 Ying He。。三维高斯泼溅新时代：综述。《IEEE可视化汇刊》

与计算机图形学汇刊》（ 2024 1 20 10 1109 2024 3397828），–。doi：。/ [38] TVCG.。Betsy S Fiedler。2003。。你的眼睛是否欺骗了你：有关计算机生成证据可采性的证据危机。NYL Sch. L. Rev. 48（2003），295。[39] Chris Flight 和 Kaye N Ballantyne。2022。确定 FARO Scene 中“放置于三维”功能的准确性。J Assoc Crime Scene Reconstr 26（2022）。[40] Florian Frank、Nicolas Florens、Gideon Meyerowitz-Katz 等。2023。对存疑伦理审批提出质疑——地中海感染大学医院研究所456项试验的案例研究。Research Integrity and Peer Review 8, 1 2023 9 10 1186 41073 023 00134 4（），。doi：。/s - - - [41] Aisling A. Galligan、Craig Fries 和 Judy Melinek。2017。。利用法医动画进行枪伤轨迹分析，以确定枪手与受害者的相对位置。《Forensic Science International》271（ 2017），e8–e13。doi:10. 1016 2016 12 039 /j.forsciint.。。Fred Galves。 [42] 1999。。那些并不那么狂野的东西在哪里：法庭中的计算机、联邦证据规则，以及制度改革和更多司法认可的必要性。Harv. JL & Tech. 13（1999），161。[43] Maxime Garcia、Remi Ronfard 和 Marie-Paule Cani。2019。空间运动涂鸦：在虚拟现实中利用手势和拉班动作分析绘制动画。载于第12届 ACM SIGGRAPH 动作、交互与游戏大会论文集（英国泰恩河畔纽卡斯尔）（MIG '19）。计算机协会，美国纽约州纽约市，文章10，共10页。doi:10.1145/3359566.3360061[44] Andrew P. Gee、P. J. Escamilla-Ambrosio、Matthew Webb、Walterio Mayol-Cuevas 和 Andrew Calway。2010。增强型犯罪现场：为法医调查对物理环境进行虚拟标注。载于第2届 ACM 多媒体法医、安全与情报研讨会论文集。105–110。[45] Paul Green 和 Lisa Wei-Haas。1985。用户界面的快速开发：绿野仙踪方法的实践经验。《人因学会年会论文集》29，5（1985），470–474。 arXiv:https://doi.org/10.1177/154193128502900515 doi:10.1177/ 154193128502900515[46] Sandra G. Hart 和 Lowell E. Staveland。1988。 NASA-TLX（任务负荷指数）的开发：实证与理论研究结果。载于《人类心理工作负荷》，Peter A. Hancock 和 Najmedin Meshkati（编）。《心理学进展》第52卷。 North-Holland，139–183。doi:10.1016/S0166-4115(08)62386- 9[47] Jouni Helske、Satu Helske、Matthew Cooper、Anders Ynnerman 和 Lonni Besançon。2021。 可视化能否缓解二分法思维？视觉表征对悬崖效应的影响。《IEEE可视化与计算机图形学汇刊》 27, 8 2021 3397 3409 10 1109 2021 3073466 （），–。doi：。/TVCG.。Orsolya Melinda Horváth。2024。。三维重建与演示。《东欧刑法杂志》02（2024），81–94。[49] J. D. Hunter。2007。Matplotlib：二维图形环境。 《计算科学与工程》9，3（2007），90–95。doi:10.1109/MCSE.2007.55[50] Keiichi Ihara、Kyzyl Monteiro、Mehrad Faridan、Rubaiat Habib Kazi 和 Ryo Suzuki。 2025。Video2MR：通过增强从二维视频中提取的动作，自动生成混合现实三维说明。 载于第30届智能用户界面国际会议论文集（IUI '25）。计算机协会，美国纽约州纽约市， 1548–1563。doi:10.1145/3708359.3712159[51] Amit Jena、Ulrich Engelke、Tim Dwyer、Venkatesh Raiamanickam 和 Cecile Paris。2020。不确定性可视化：交互式视觉综述。载于《2020年 IEEE 太平洋可视化研讨会》（PacificVis）。201–205。 doi:10.1109/ PacificVis48177.2020.1014[52] David H. Kaye。2009-2010。“错误却极具说服力”：McDaniel 诉 Brown 案中的概率估计究竟错得有多离谱？评论。《密歇根法律评论·初刊》108（2009-2010），1。[53] Bernhard Kerbl、Georgios Kopanas、Thomas Leimkuehler 和 George Drettakis。2023。用于实时辐射场渲染的三维高斯泼溅。《ACM图形学汇刊》42，4，文章139（2023年7月），14页。 doi:10.1145/3592433[54] Thomas Kosch、Jakob Karolus、Johannes Zagermann、Harald Reiterer、Albrecht Schmidt 和 Paweł W. Woźniak。2023。人机交互中认知工作负荷测量综述。55，13s，文章283（2023年7月），39页。doi:10.1145/3582272 [55] Moza Kudonu、Mohamad Ali Koteich、Sharon Ann Philip、Gursirat Khokhar、Aby Joseph 和 Nrashant Singh。2023。激光测量设备在犯罪现场测量中的应用。载于《2023年计算智能与知识经济国际会议》（ICCIKE）。381–385。 doi:10. 1109/ICCIKE58312.2023.10131819[56] T. Lantta、T. Rautiainen、M. Anttila、J. Anttila 和 M. Ameel。2024。面向精神科住院护理的数字暴力预防与管理工具的协作式共同设计：重点支持其与电子健康记录系统的整合。《欧洲精神病学》 67，1 2024 59 59 10 1192 2024 170 S（），S–S。doi：。/ [57] j.eurpsy.。James R. Lewis 和 Jeff Sauro。2018。。系统可用性量表的条目基准。《可用性研究杂志》13，3（2018年5月），158–167。[58] Boyu Li、Linping Yuan、Zhe Yan、Qianxi Liu、Yulin Shen 和 Zeyu Wang。2024。AniCraft：将日常对象制作成用于原型设计的实体代理物，以实现三维 24合现实草图的角色关键帧动画。载于 ACM 人机交互会议论文集——CHI '24，美国纽约州纽约市，文章 99，14 页。 doi:10.1145/3654777. 3676325[59] Wu Liu、Qian Bao、Yu Sun 和 Tao Mei。2022。 单目二维和三维人体姿态估计的最新进展：深度学习视角。ACM Comput. Surv. 55, 4, 80 2022 41 10 1145 3524497 文章（11 月），页。 [60] doi：。/ David Lucy。2013。统计学导论：面向法医科学家。John Wiley & Sons。[61] Mfundo A. Maneli 和 Omowunmi E. Isafiade。2022。涉及沉浸式技术的三维法证犯罪现场重建：系统性文献综述。IEEE Access 10 2022 88821 88857 10 1109 2022 3199437（），–。 [62] doi：。/ACCESS.。H. B. Mann 和 D. R. Whitney。1947。关于检验两个随机变量中一个在随机意义上是否大于另一个。The Annals of Mathematical Statistics 18, 1（1947），50–60。doi:10.1214/aoms/1177730491[63] Geoffrey Stewart Morrison、Simon Elliott、June Guiness、Lisa Sonden 和 Denise Syndercombe Court。2025。从法证数据科学范式视角解读 ISO 21043 法庭科学指南。Science & Justice 65, 5（2025）， 101304 10 1016 2025 101304。doi：。/j.scijus.。Alan Murta、Simon [64] Gibson、TLJ Howard、RJ Hubbold 和 AJ West。1998。用于犯罪现场重建的建模与渲染：案例研究。载于 Eurographics UK 会议论文集。Citeseer，169–173。[65] Ye Pan 和 Kenny Mitchell。2020。PoseMMR：用于角色动画的协作式混合现实创作工具。载于《2020 IEEE 虚拟现实与三维用户界面会议摘要与研讨会》（VRW）。758–759。doi:10.1109/VRW50115.2020.00230[66] Ronald Poelman、Oytun Akman、Stephan Lukosch 和 Pieter Jonker。2012。仿佛身临其境：用于犯罪现场调查的媒介现实。载于 ACM 2012 年计算机支持协同工作会议论文集——CSCW '12。ACM Press，美国华盛顿州西雅图， 1267 10 1145 2145204 2145394。doi：。/。 [67] Vahid Pooryousef。2025。沉浸式法证调查。博士论文。莫纳什大学。 doi:10.26180/30052255.v1[68] Vahid Pooryousef、Maxime Cordeil、Lonni Besançon、Christophe Hurter、Tim Dwyer 和 Richard Bassed。2023。与法证从业者合作，了解混合现实数字尸检的机遇与挑战。载于《2023 CHI 人机交互大会论文集》。1–15。[69] Vahid Pooryousef、Maxime Cordeil、Lonni Besançon、Richard Bassed 和 Tim Dwyer。2024。利用混合式混合现实环境和生成式人工智能进行协作式法证尸检记录与监督式报告生成。IEEE《可视化与计算机图形学汇刊》 30, 11（2024），7452–7462。doi:10.1109/TVCG.2024.3456212[70] Inigo Quilez。 2016。Quill：在 Oculus Story Studio 新片制作中进行虚拟现实绘画。载于 ACM SIGGRAPH 2016 Real-Time Live!（加利福尼亚州阿纳海姆）（SIGGRAPH '16）。计算机协会，美国纽约州纽约市，文章 41, 1 10 1145 2933540 2933549 页。doi：。/。Domenic Raneri。 [71] 通过使用现代三维（3D）成像技术增强法医调查，以进行犯罪现场重建。《澳大利亚法证科学杂志》50, 6（2018），697–707。 arXiv:https://doi.org/10.1080/00450618.2018.1424245 doi:10.1080/00450618.2018.1424245[72] Dimitar Rangelov、Jaap Knotter 和 Radoslav Miltchev。2024。犯罪现场调查中的三维重建：影响、益处与局限。载于《智能系统与应用》，Kohei Arai（编）。Springer Nature Switzerland，Cham， 46–64。[73] Carolin Reichherzer、Andrew Cunningham、Tracey Coleman、Ruochen Cao、Kurt McManus、Dion Sheppard、Mark Kohler、Mark Billinghurst 和 Bruce H. Thomas。2021。让陪审团置身犯罪现场：模拟犯罪现场中的记忆与决策。载于《2021 CHI 人机交互大会论文集》。1–12。[74] Vincenzo Rinaldi、Lucina Hackman 和 Niamh Nic Daeid。2022。Crime Scene VieweR (CSVR)：在虚拟现实中进行犯罪现场调查。载于第一届扩展现实国际会议。[75] Alastair Ross、Chris Lennard 和 Claude Roux。2025。法医学：未来何去何从？ Forensic Science International 366（2025），112285。 doi:10.1016/j.forsciint.2024.112285[76] Elizabeth B.-N. Sanders 和 Pieter Jan Stappers。2008。共同创造与设计领域的新图景。《协同设计》 4, 1 2008 5 18 10 1080 15710880701875068（），–。 [77] doi：。/ Damian Schofield。2009。证据动画化：法庭中的电脑游戏技术。《信息、法律与技术杂志》1（2009），1–21。[78] Damian Schofield。2016。计算机生成图像在法律诉讼程序中的应用。Digital Evidence & Elec. Signature L. Rev. 13（2016），3。 doi:10.14296/deeslr.v13i0.2293[79] Mickael Sereno、Stéphane Gosset、Lonni Besançon 和 Tobias Isenberg。2022。增强现实中的混合式触控／实体空间选择。 《计算机图形论坛》 41, 3 2022 403 415 10 1111 14550 （6 月），–。doi：。/cgf. [80] Dario Seyb、Milan Grajetzki、Grace Chin 和 Sasha Wilkinson。2018。Anim VR。载于 ACM SIGGRAPH 2018 虚拟、增强与混合现实（加拿大不列颠哥伦比亚省温哥华）（SIGGRAPH '18）。计算机协会

Machinery，美国纽约州纽约市，文章 5, 1 10 1145 3226552 3226553 页。doi: 。/ 。
[81] S. S. SHAPIRO 和 M. B. WILK。1965。正态性方差分析检验（完整样本）。Biometrika 52, 3-4（1965 年 12 月），591–611。doi:10.1093/biomet/52.3-4.591[82] Ximing Shen、Yun Suen Pai、Dai Kiuchi、Kehan Bao、Tomomi Aoki、Hikari Meguro、Kanoko Oishi、Ziyue Wang、Sohei Wakisaka 和 Kouta Minamizawa。2023。Dementia Eyes：面向医务人员的痴呆症教育增强现实体验的协同设计与评估（CHI '23）。计算机协会，美国纽约州纽约市，文章 778，18 页。doi:10.1145/3544548.3581009[83] Nadine M. Smit、Ruth M. Morgan 和 David A. Lagnado。2018。对英格兰和威尔士不安全裁决中误导性证据的系统分析。Science & Justice 58, 2 2018 128 137 10 1016 2017 09 005 （），–。
[84] doi: 。/j.scijus. 。Stephanie Stevenson 和 Eugene Liscio。2024。评估 iPhone LiDAR 与 Recon-3D 在血迹模式分析中确定起源区域的能力。Journal of Forensic Sciences 69, 3（2024），1045–1060。arXiv:https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1556-4029.15476 doi:10.1111/1556-4029.15476[85] Jan Willem Streefkerk、Mark Houben、Pjotr van Amerongen、Frank ter Haar 和 Judith Dijk。2013。CSI 的艺术：用于在法医调查中标注犯罪现场的增强现实工具（ART）。载于《虚拟、增强与混合现实：系统与应用：第五届国际会议 VAMR 2013，作为 2013 年国际人机交互大会的一部分于 2013 年 7 月 21—26 日在美国内华达州拉斯维加斯举行，论文集，第二部分》 5 330 339 10 1007 978 3 642 39420 1_35 。Springer，–。doi: 。/ - - - - 犯
[86] 罪现场调查与重建小组委员会。2025。犯罪现场重建标准准则。OSAC 提议标准草案 OSAC 2025-N-0004。法证科学领域委员会组织（OSAC）。https://www.nist.gov/system/files/documents/2025/03/03/OSAC%202025-N-0004-Standard%20Criteria%20for%20Crime%20Scene%20Reconstruction_OPEN%20COMMENT%20VERSION%201.0.pdf [87] Matthias Süncksen、Michael Teistler、Frederik Hamester 和 Lars C. Ebert。2019。在虚拟现实中准备和引导法医犯罪现场勘查。载于《Mensch und Computer 2019 会议论文集》。ACM，德国汉堡，755–758。doi:10.1145/3340764.3344903[88] Vladimir Tolstolutsky、Galina Kuzenkova 和 Victor Malichenko。2021。在交通运输领域犯罪现场重建中使用增强现实的经验。载于《国际西伯利亚交通科学论坛》。Springer，1095–1102。[89] Vizitech USA。 [n. d.]。VR Forensics。https://www.vizitechusa.com/walking-with-the-diciples。访问日期：2025 年 3 月 17 日。[90] VictoryXR。2023。CSI Forensics。https://www.victoryxr.com/csi-forensics/。访问日期：2025 年 3 月 17 日。[91] Chiara Villa 和 Christina Jacobsen。2019。摄影测量在犯罪现场、证据和人员法医三维记录中的应用。Springer International Publishing，Cham，1 18 10 1007 978 3 030 24330 2_1 –。doi: 。/ - - - - C. Villa、K.B.
[92] Olsen 和 S.H. Hansen。2017。利用 CT 扫描获得的受害者专属三维模型进行虚拟动画，以用于法医重建：生者与死者。Forensic Science International 278（2017），e27–e33。doi:10.1016/j.forsciint.2017.06.033[93] Daniel Vogel、Paul Lubos 和 Frank Steinicke。2018。AnimationVR——在虚拟现实中进行交互式基于控制器的动画制作。载于《2018 IEEE 第一届虚拟与增强环境动画研讨会》（ANIVAE）（德国罗伊特林根）。IEEE，1 6 10 1109 2018 8587268 –。doi: 。/ANIVAE. 。Michael
[94] L. Waskom。2021。seaborn：统计数据可视化。Journal of Open Source Software 6, 60 2021 3021 10 21105 03021 （），。doi: 。/joss.
[95] Frank Wilcoxon。1992。基于排序方法的个体比较。Springer New York，美国纽约州纽约市，196 202 10 1007 978 1 4612 4380 9_16 –。doi: 。/ - - - -
[96] Jacob O. Wobbrock 和 Matthew Kay。2016。人机交互中的非参数统计。Springer International Publishing，Cham，135–170。doi:10. 1007 978 3 319 26633 6_7 / - - - -
[97] Bradley Friend Woodward。2021。利用逼真的交互式房间规模虚拟现实开展经济环保的火灾调查培训。Springer International Publishing，Cham，147 156 10 1007 978 3 030 72781 9_18 –。doi: 。/ - - - -
[98] Meng-Han Wu 、 Ananya Ipsita 、 Gaoping Huang 、 Karthik Ramani 和 Alex Quinn。2023。ImpersonatAR：运用具身创作与评估，为增强现实应用创建多场景用例原型。Journal of Computing and Information Science in Engineering 24, 3（2023 年 10 月），031007。doi:10.1115/1.4063558[99] Lei Zhang 和 Steve Oney。2020。FlowMatic：用于在虚拟现实中创建交互场景的沉浸式创作工具。载于第 33 届 ACM 用户界面软件与技术研讨会论文集（虚拟活动，美国）（UIST '20）。计算机协会，美国纽约州纽约市，342–353。doi:10.1145/3379337.3415824[100] Xiaozheng Zheng、Zhuo Su、Chao Wen、Zhou Xue 和 Xiaojie Jin。2023。通过关节级建模，从稀疏观测实现逼真的全身追踪。载于《2023 IEEE/CVF 国际计算机视觉大会》（ICCV）。14632–14642。doi:10.1109/ICCV51070.2023.01349
[101] Qian Zhou、David Ledo、George Fitzmaurice 和 Fraser Anderson。2024。《时间隧道：在虚拟现实中整合空间与时间动作编辑以实现角色动画》。载于《*2024*年 *CHI* 人因计算系统大会论文集》（美国夏威夷州檀香山）（*CHI '24*）。计算机协会，美国纽约州纽约市，文章编号 101，共 17 页。doi:10.1145/3613904.3641927