

基于 Web3D 技术的轻量化虚拟现实消防培训系统设计与实现

艾子豪 马鑫彤

吉林动画学院, 吉林 长春 130012

摘要: 针对传统消防培训系统部署复杂、硬件要求高的问题, 本文提出一种基于 Web3D 技术的轻量化虚拟现实 (VR) 消防培训系统。该系统将 HTC VIVE 设备与 Steam VR 平台相结合, 实现基于浏览器的即插即用式消防演练功能, 无需安装任何插件。系统创新性地采用分层式烟火模拟方案: 基于 Three.js 精灵技术实现环境雾的动态透明度变化, 通过几何动画模拟火焰与上升烟雾, 在保证视觉真实感的同时降低计算开销。该系统为低成本、大规模消防安全培训提供了可行方案。

关键词: Web3D; 虚拟现实消防培训; Three.js; 烟火模拟; 轻量化系统

1 引言

1.1 研究背景

消防安全培训是减少火灾事故人员伤亡的关键手段。然而, 传统实体演练存在成本高昂、场景重复率低、安全风险难以控制等问题。虚拟现实 (VR) 技术的发展为消防培训提供了沉浸式解决方案, 但现有系统多基于 Unity 或 Unreal Engine 开发, 需安装专用客户端且硬件配置要求苛刻, 难以在基层单位普及。

1.2 研究现状

现有虚拟现实消防系统可分为两类:

(一) 基于专业引擎的重型系统, 真实感强但部署困难;

(二) 基于 WebGL^[1] 的轻量化系统, 访问便捷但缺乏虚拟现实交互能力。为弥补上述不足, 本文结合 Web3D (如 Three.js 引擎) 与 WebXR^[2] 技术设计轻量化虚拟现实消防培训系统, 通过 Steam VR 平台实现设备适配, 填补了 "高真实感" 与 "易部署" 之间的技术空白。

1.3 本文贡献

本文聚焦轻量化虚拟现实消防培训系统的设计与实现, 通过技术创新与架构优化形成多项具有实用价值的成果。具体而言, 主要贡献包括以下三个方面:

(一) 提出基于 Web 技术栈的虚拟现实消防培训架构, 通过 Steam VR 平台实现即插即用的设备适配;

(二) 设计基于 Three.js 引擎的分层式烟火模拟算法, 平衡视觉效果与计算效率;

(三) 开发完整的原型系统, 验证轻量化方案的可行性。

2 系统设计

2.1 总体架构

系统采用 "浏览器 - 服务器" 架构, 通过

分层设计实现功能解耦与高效协作。该架构可有效整合设备交互、场景渲染与培训逻辑, 为用户提供流畅的虚拟现实消防培训体验。具体分为以下四层 (图 1):

(一) 设备层: HTC VIVE 头戴式显示器及控制器通过 Steam VR 驱动实现姿态追踪;

(二) 交互层: 基于 WebXR API 解析设备输入, 映射为虚拟消防操作;

(三) 渲染层: 由 Three.js 引擎负责 3D 场景渲染, 保障流畅的视觉体验;

(四) 应用层: 实现培训任务逻辑 (如起火点生成、灭火判断、成绩统计等)。

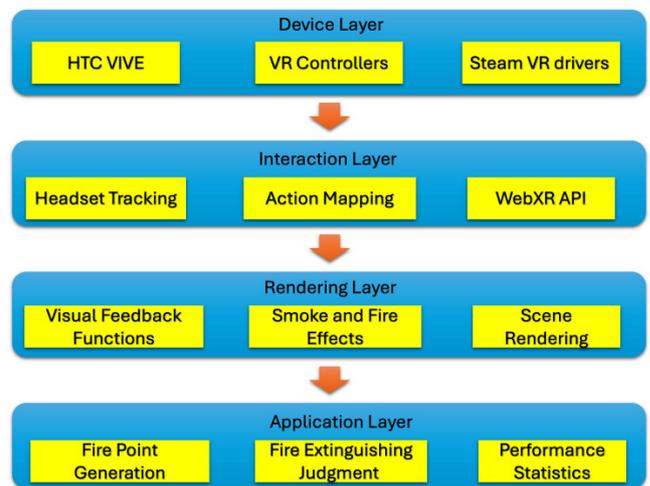


图 1 系统架构

2.2 软硬件环境介绍

为保障系统稳定性与流畅的虚拟现实体验, 系统对软硬件环境提出明确要求, 同时兼顾兼容性与性能需求:

(一) 客户端硬件: 需配备支持 Steam VR 的显卡 (推荐 NVIDIA GTX 1070 及以上或同级别 AMD 显卡)、Intel Core i5 及以上处理器, 内存至少 8GB;

(二) 虚拟现实设备: HTC VIVE 系列

(VIVE Pro、VIVE Focus 3 等)，兼容 Steam VR 平台；

(三)软件环境: Windows 10/11 操作系统、Chrome 90 + 或 Firefox 91 + 浏览器、Steam VR 1.24 及以上版本；

(四)开发环境: Three.js^[4] r148 引擎、WebXR API、JavaScript 编程语言。

3 核心功能实现

3.1 虚拟现实交互功能

系统通过 WebXR API 与 Steam VR 平台实现设备无缝连接，为用户提供自然直观的虚拟现实交互体验。主要交互功能的实现方式如下(图2)：

(一)设备连接: 无需额外插件，通过浏览器直接检测并连接 HTC VIVE 设备，实现头戴式显示器姿态与控制器位置的实时追踪；

(二)灭火操作: 用户通过 VR 控制器模拟灭火器使用，扣动扳机触发喷射动作。系统采用射线检测技术判断喷射是否命中火焰目标，实现精准的灭火交互。



图 2 虚拟现实交互示意图

3.2 烟火效果模拟

基于 Three.js 引擎设计分层式烟火模拟方案，在保证系统轻量化与高效性的同时兼顾视觉效果。该方案通过创新渲染技术提升场景真实感，同时降低计算资源消耗：

3.2.1 环境烟雾模拟

采用 Three.js 精灵(Sprite)技术实现环绕玩家的雾效(图3)：

(一)加载高质量烟雾纹理贴图，创建多个随机分布的精灵对象；

(二)随火势动态调整精灵透明度: 初始状态完全透明，火势加剧时逐渐变为半透明(不透明度 0.6)，灭火后逐步恢复透明，模拟烟雾从产生到消散的过程。



图 3 环境烟雾模拟效果示意图

3.2.2 火焰与升腾烟雾的模拟

采用几何动画技术实现动态效果，避免传统粒子系统的高计算开销：

(一)上升烟雾: 采用二十面体几何体，从火焰底部(Y=0 处)开始上升，同时体积逐渐增大，达到 3 米高度后重置位置，循环形成连续的烟雾上升效果(图 4a)；

(二)火焰效果: 几何体尺寸随时间呈正弦规律变化(由小变大再变小)，结合动态橙色光源(亮度随机波动)，模拟火焰自然摇曳的视觉效果(图 4b)。

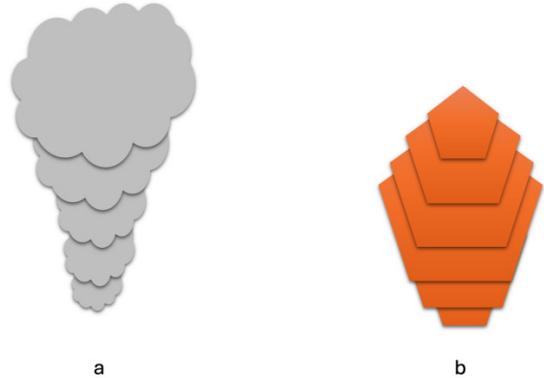


图 4 烟火模拟效果示意图

3.3 培训场景与操作流程

系统构建真实的培训场景与标准化培训流程，确保培训效果的实用性。具体设计如下：

(一)场景构建: 包含典型室内环境(如办公室、教室等)，配备标准消防设施(灭火器、消防栓等)(图 5a)；

(二)培训流程: 用户进入场景后，系统随机生成起火点，提示用户使用合适的消防器材进行处置，完成后提供操作评估(图 5b)；

(三)交互反馈: 所有操作均有实时视觉反馈(如灭火器喷射效果、火焰熄灭动画等)，提升培训沉浸感(图 5c)。



图 5a



图 5c
图 5 消防培训场景系统操作截图

4 系统特点

4.1 轻量化与易用性

系统在设计过程中始终注重轻量化与易用性，借助 Web 技术的天然优势简化部署与使用流程：

- (一) 无需安装客户端软件及插件，可通过浏览器直接运行；
- (二) 硬件要求兼容主流 VR 设备，无需专用工作站；

参考文献：

- [1]Khronos Group. WebGL 2.0 Specification. Retrieved from <https://www.khronos.org/registry/webgl/specs/latest/2.0/>, 2023.
- [2]World Wide Web Consortium (W3C). WebXR Device API Specification. Retrieved from <https://www.w3.org/TR/webxr/>, 2023.
- [3]HTC Corporation. HTC Vive Developer Documentation. Retrieved from <https://developer.htc.com/vive/>, 2023.
- [4]Three.js Team. Three.js Documentation. Retrieved from <https://threejs.org/docs/>, 2023.

作者简介：艾子豪（1989.05—），男，汉族，辽宁省辽阳市，硕士研究生，讲师，研究方向：Web3D、虚拟现实。

马鑫彤（1994.05—），女，汉族，吉林省长春市，硕士，助教，研究方向：虚拟现实技术。

项目信息：吉林动画学院 2025 年度校级科学研究项目 Web3D 小游戏开发技术优化与创新研究及应用（课题编号：KY25XY13）

(三) 启动速度快，从设备连接到进入培训场景耗时不超过 10 秒。

4.2 良好的真实感

在保证轻量化的同时，系统通过精细化设计提升场景与交互的真实感：

- (一) 烟火效果模拟符合自然规律，视觉表现逼真；
- (二) 虚拟现实交互操作与真实消防动作一致，培训效果贴近实际；
- (三) 场景细节丰富，包含多种典型火灾环境与消防设备。

4.3 良好的扩展性

系统采用模块化设计，具有良好的扩展性，可根据实际需求进行功能拓展：

- (一) 基于 Web 技术栈，便于后续功能升级与场景扩展；
- (二) 支持多种 VR 设备适配，兼容性良好；
- (三) 培训内容与考核标准可根据实际需求自定义配置。

5 结论与展望

本文设计的 Web 虚拟现实消防培训系统通过创新技术实现了轻量化与高真实感的平衡，解决了传统系统部署困难、成本高昂的问题。系统无需插件、即插即用的特点使其易于在各类单位推广应用，同时兼容主流 VR 硬件配置，保障了培训体验的流畅性。

未来工作将重点拓展以下功能：

- (一) 增加更多火灾场景（如高层建筑、地下空间等）；
- (二) 完善培训评估体系，实现操作规范性的自动评判；
- (三) 支持多用户协同培训，模拟团队消防场景。