

# 面向复杂场景模拟的虚拟现实计算机图形处理方法

虎晶

兰州现代职业学院

**摘要:** 面向复杂场景模拟的虚拟现实计算机图形处理, 需在海量数据、动态光照与物理交互约束下兼顾真实性与实时性。本文分析了复杂场景的图形学挑战, 从渲染架构优化、空间数据动态调度及物理特效处理三方面展开研究, 探讨了混合渲染管线、层次细节技术及粒子模拟等方法。通过构建高效的图形处理机制, 旨在突破性能瓶颈, 为虚拟现实系统提供更加逼真流畅的视觉计算解决方案。

**关键词:** 虚拟现实; 复杂场景; 图形处理; 实时渲染; 细节层次

随着虚拟现实技术的飞速发展, 其应用领域已从早期的室内漫游与简单游戏娱乐, 拓展至航空航天模拟训练、智慧城市应急推演、大规模工业仿真以及复杂气候环境预测等尖端领域。这些应用场景通常具有高度的复杂性, 表现为场景规模宏大、动态元素交互频繁、物理规律模拟精确以及实时渲染要求严苛。在复杂的虚拟现实场景中, 计算机图形学面临着前所未有的挑战: 如何在有限的硬件资源下, 同时保证视觉沉浸感、物理真实性与交互实时性。传统的图形处理方法往往侧重于单一维度的优化, 难以在动态且不可预测的复杂场景中达到理想的平衡。因此, 研究面向复杂场景模拟的虚拟现实计算机图形处理方法, 旨在通过创新的渲染架构、数据组织策略及资源调度算法, 突破现有技术瓶颈, 为虚拟现实系统提供更加逼真、流畅且可靠的视觉计算解决方案。

## 1 复杂场景模拟的图形学挑战与需求分析

复杂场景模拟对计算机图形处理提出了多维度的苛刻要求, 这些需求相互制约, 构成了该领域的核心研究难题。深入理解这些挑战是设计高效图形处理方法的逻辑起点。

### 1.1 几何与材质的海量数据处理

在虚拟现实模拟中, 场景的几何复杂度往往达到数十亿甚至上百亿个多边形。例如, 在数字孪生城市中, 需要对每一栋建筑、每一条道路乃至路灯、植被进行高精度建模。传统的静态绘制方法无法直接处理如此庞大的数据集, 必须依赖高效的数据压缩、流式传输以及层次细节技术。然而, 在动态场景中, 物体不仅几何体量巨大, 其表面材质也可能随着环境变化而发生改变, 如雨后湿润的路面、冰雪覆盖的屋顶等。这要求图形处理方法不仅要管理海量几何数据, 还需支持材质的动态加载与实时更新, 确保远观宏观特征清晰、近看微观细节丰富, 同时避免因数据调度延迟

导致的画面卡顿。

### 1.2 动态光照与全局光照的实时计算

复杂场景中的光照环境极为复杂, 可能包含多个动态光源(如行进中的车灯、爆炸的火光)、半透明介质(如烟雾、水体)以及复杂的阴影关系。在现实世界中, 光线经过无数次反射、折射才进入人眼, 形成了细腻的视觉感受。在虚拟环境中复现这种效果, 即全局光照计算, 是图形学领域的难点。传统的光线追踪技术虽然效果逼真, 但计算成本极高, 难以满足虚拟现实所需的90Hz甚至120Hz的刷新率。如何在动态复杂场景中, 对直接光照、间接光照、环境遮蔽以及焦散等进行近似或降噪处理, 使其在视觉上接近物理真实, 同时保证帧率稳定, 是当前图形处理方法必须解决的关键问题。

### 1.3 物理交互的视觉一致性

复杂场景模拟不仅仅是视觉展示, 更强调用户与场景中物体的交互。当用户在虚拟世界中推动一个箱子、击碎一扇玻璃或在水面上激起涟漪时, 图形渲染必须与物理引擎的计算结果保持高度同步。这种同步要求图形处理具备极强的实时响应能力, 能够根据物理碰撞的反馈, 实时改变物体的形变状态、破碎效果或粒子系统表现。图形处理算法需要能够快速处理由物理引擎产生的非预定义几何变化, 例如动态生成破碎后的碎片模型, 并在下一帧中立即渲染出来, 这对顶点处理能力和渲染管线的灵活性提出了极高要求。

## 2 面向复杂场景的渲染架构优化

为了应对上述挑战, 必须从渲染架构的底层进行优化。传统的串行渲染管线已无法满足复杂场景的需求, 现代图形处理方法倾向于采用并行化、分帧处理以及混合渲染的策略。

### 2.1 基于分层的渲染调度机制

面对动态变化的场景, 一个有效的处理方法是采

用分层渲染调度。该机制将场景中的物体根据其运动属性、重要性以及渲染开销划分为不同的层级。静态层(如地形、建筑主体)可以被预计算光照信息并进行实例化渲染,大幅减少每帧的绘制调用次数。动态层(如角色、车辆)则需要采用更灵活的处理方式,如使用骨骼动画和实时光照。特效层(如粒子、流体)则利用 GPU 的并行计算能力进行独立模拟与渲染。通过这种分层机制,渲染系统可以将有限的 GPU 资源集中用于处理用户当前关注的核心区域,而对次要区域采用较低的渲染精度或更新频率,从而实现资源利用的最大化。

### 2.2 混合渲染管线:光栅化与光线追踪的融合

单纯依靠光栅化渲染难以实现复杂的全局光照效果,而纯路径追踪在硬件性能未实现革命性突破前也无法满足 VR 的实时性要求。因此,面向复杂场景的图形处理方法普遍采用混合渲染管线。在该架构中,对于需要精确反射和阴影的关键物体,使用硬件加速的光线追踪进行少量采样,生成粗糙的光照探头或反射信息。随后,将这些信息结合屏幕空间的已知数据,通过时空降噪滤波器进行处理,得到平滑的光照结果。而对于场景中的漫反射表面和大量环境,则继续使用高效的光栅化技术并辅以预计算的环境贴图。这种融合策略在保持高帧率的同时,极大地提升了场景的真实感,尤其适用于具有大量镜面和金属材质的工业模拟场景。

### 2.3 可变速率着色与注视点渲染

虚拟现实头显设备通常具有较高的分辨率,但对所有区域进行同等质量的渲染是对算力的巨大浪费。基于人眼视觉特性,用户仅对注视点中心区域有最高的细节感知需求。因此,引入注视点渲染技术,即根据眼动追踪数据,将全高清甚至 4K 的渲染资源集中分配给视网膜中央凹区域,而外围视野则使用较低分辨率进行渲染。结合可变速率着色技术,渲染管线可以在着色阶段对不同区域的像素分配不同的采样率。这种空间上非均匀的渲染方法,可以在几乎不损失用户主观视觉体验的前提下,将复杂场景的渲染性能提升一倍以上,为处理大规模几何数据和复杂光照计算预留出宝贵的硬件资源。

## 3 基于空间数据结构与细节层次的动态调度

复杂场景模拟的核心挑战在于“可见即可得”。由于场景规模远超显存容量和 GPU 处理极限,必须依靠高效的数据结构与算法,确保只有“可能可见”的数据被加载和渲染。

### 3.1 多尺度空间数据结构与视锥裁剪

多尺度空间数据结构是数据调度的基础。在处理

超大规模城市模型时,系统首先通过预处理将模型切分成瓦片,并构建八叉树空间索引。实时渲染时,系统通过视锥裁剪剔除不在视野范围内的瓦片,将待处理数据量减少一个数量级。在此基础上,利用遮挡查询技术将视野中被前景物体完全遮挡的背景数据进一步过滤。这种裁剪机制能够将每帧处理的数据量压缩至总量的 5% 以下,为后续渲染减轻负担。

### 3.2 连续层次细节与几何体实例化

连续层次细节与几何体实例化是降低渲染开销的核心手段。面对森林中成千上万的树木,图形处理方法必须采用几何体实例化,通过一次绘制调用渲染大量相同网格的物体,仅传递不同的变换矩阵,彻底避免状态切换带来的性能损耗。同时,采用连续层次细节技术,通过 GPU 曲面细分实现模型精度的平滑过渡。远处物体群组可合并为简化代理网格,在极远处也能正确表达轮廓和光照关系。这种基于距离的动态精度调节,是平衡视觉质量与渲染负载的关键。

### 3.3 数据流送与可见性预测

数据流送与可见性预测解决了大规模场景的载入延迟问题。当用户在场景中快速移动时,新数据需在极短时间内从硬盘加载至显存。现代图形处理方法利用高速 SSD 实现 GPU 直接解压数据,消除 CPU 瓶颈。更重要的是,引入基于运动向量的可见性预测,系统根据用户移动方向预判未来可能进入视野的场景区块,在后台提前发起异步加载。当用户转向时,所需数据已驻留显存,从而彻底消除画面卡顿,为在无限大虚拟场景中自由移动提供技术保障。

## 4 复杂物理交互与特效的实时图形处理

真实感不仅源于静态画面的细腻程度,更取决于动态变化过程的物理合理性。在复杂场景模拟中,用户与环境的交互行为要求图形处理系统必须与物理模拟引擎深度耦合,在极短时间内完成从物理状态计算到视觉呈现的全链路响应,从而构建高度可信的动态虚拟世界。

基于粒子的模拟方法是处理流体、云雾等无定形介质的核心手段。在火灾模拟或气候仿真等复杂场景中,这些现象难以用传统多边形建模描述。图形处理系统通常采用平滑粒子流体动力学方法,将连续流体离散为大量携带物理属性的粒子,在 GPU 端并行完成受力计算与位置更新。进入渲染阶段后,系统通过屏幕空间算法将这些粒子重构成连续表面,利用深度信息对粒子分布进行平滑处理,并实时计算流体的折射与散射效果。对于云雾等介质,则采用体积渲染技术,通过光线步进在密度场中逐点采样,结合分形噪声纹

理模拟光线的多次散射, 营造出具有蓬松质感且随风场变化的动态气象环境。

可破坏环境的实时渲染是图形处理技术面临的极端挑战。当用户在场景中实施破坏操作时, 物理引擎会瞬时将完整模型替换为大量破碎碎块, 并为每个碎块赋予初始速度。图形管线必须在下一帧开始前完成对这些新增几何体的接纳与处理, 广泛采用几何体实例化技术在一次绘制调用中完成成百上千个碎块的渲染, 避免性能崩溃。与此同时, 破坏瞬间产生的粉尘、碎片飞溅等视觉特效需要同步触发粒子系统, 确保微尘粒子的扩散轨迹与碎块的物理运动逻辑保持一致。更为复杂的是, 破碎后暴露的内部截面会改变场景的光照与阴影关系, 这就要求阴影图算法具备动态更新能力, 迅速响应几何遮挡关系的突变, 避免阴影断裂或光照失真。

在完成基础渲染后, 后处理环节为场景注入最终视觉真实感。需要依次叠加镜头光晕、景深及运动模糊等光学效果, 模拟光学系统在实际成像过程中的物理特性。色调映射环节则将高动态范围辐射亮度压缩至显示设备有限动态范围内, 并根据不同环境条件应用特定颜色查找表进行全局调色, 模拟人眼的视觉适应机制。这一系列操作不仅增强画面沉浸感, 更使虚拟场景的整体视觉表现自然可信, 最终完成从物理模拟到视觉感知的完整闭环。

## 5 结语

综上所述, 面向复杂场景模拟的虚拟现实计算机图形处理是一个涉及多学科交叉的综合性问题。它不再仅仅关注如何绘制得“像”, 更关注如何在巨大数据量、复杂光照、动态交互的约束下绘制得“快”且“真”。

通过构建分层融合的渲染架构、设计智能的数据动态调度策略以及实现物理同步的特效算法, 现代图形处理技术正在不断突破虚拟现实的体验边界。未来, 随着人工智能驱动的神经渲染技术和云边协同计算架构的成熟, 面向复杂场景的图形处理将更加智能化, 能够根据用户意图和场景语义, 自动分配计算资源, 最终实现完全沉浸且难以分辨真假的虚拟世界模拟。

## 参考文献:

- [1] 陈拓, 周子恒, 吴震宇, 等. 无预处理的实时全局光照渲染方法综述 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2025, 37(07): 1101-1115.
- [2] 徐翔, 吴小龙, 陈子凌, 等. 大规模三维场景光线追踪渲染方法综述 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2024, 36(8): 1155-1170.
- [3] 徐翔, 王璐, 徐延宁, 等. 基于点的全局光照绘制方法综述 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(5): 689-697.
- [4] 吴向阳, 柴学梁, 王毅刚, 等. 利用形状因子采样的实时全局光照绘制 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(6): 941-948.
- [5] 刘保权, 吴恩华, 刘学慧. 基于 GPU 的交互式动态折射绘制算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(11): 1652-1657.
- [6] 查雁南. 运用实时全局光照打造灯光模拟仿真软件 [J]. 计算机时代, 2016(6).
- [7] 周昆. 虚拟场景中实时图形绘制关键技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
- [8] 石教英. 虚拟现实复杂场景生成、简化和优化技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004.