

The background of the slide is a complex, abstract geometric pattern composed of numerous overlapping triangles. These triangles are rendered in a variety of colors, including shades of red, orange, yellow, green, blue, and purple, creating a vibrant, low-poly aesthetic. The triangles vary in size and orientation, filling the entire frame.

毕业设计答辩 基于 OptiX 的路径追踪渲染器的设计与开发

刘贝

2021090922011

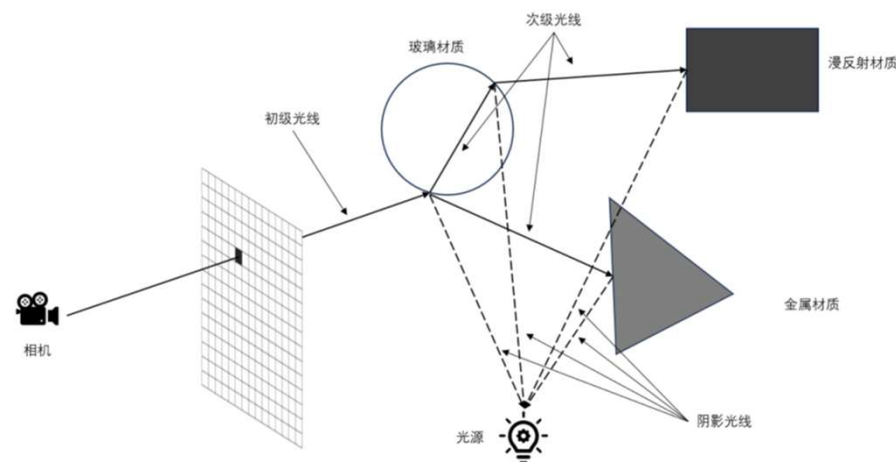
项目背景与研究意义



随着真实感图形渲染需求提升，传统光栅化方法已难以满足复杂光照与材质交互模拟的要求。

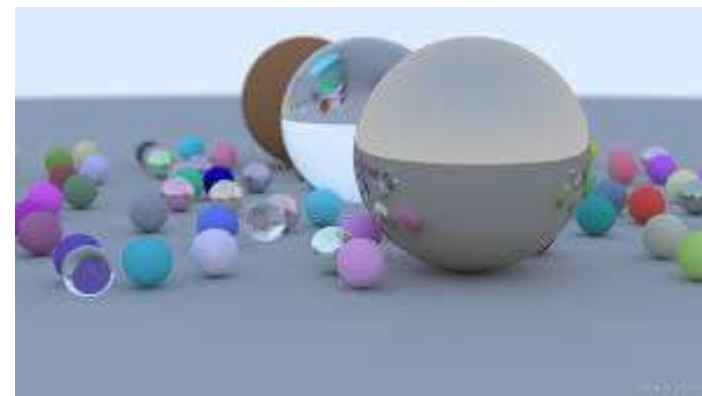
基于物理的渲染（PBR）方法，尤其是路径追踪，能统一模拟阴影、漫反射、镜面反射、全局光照等现象。

路径追踪依赖大量光线采样，计算量大，适合 GPU 并行加速。本项目旨在基于 NVIDIA OptiX 构建一套可扩展、可调节、真实感强的路径追踪渲染器。



OptiX

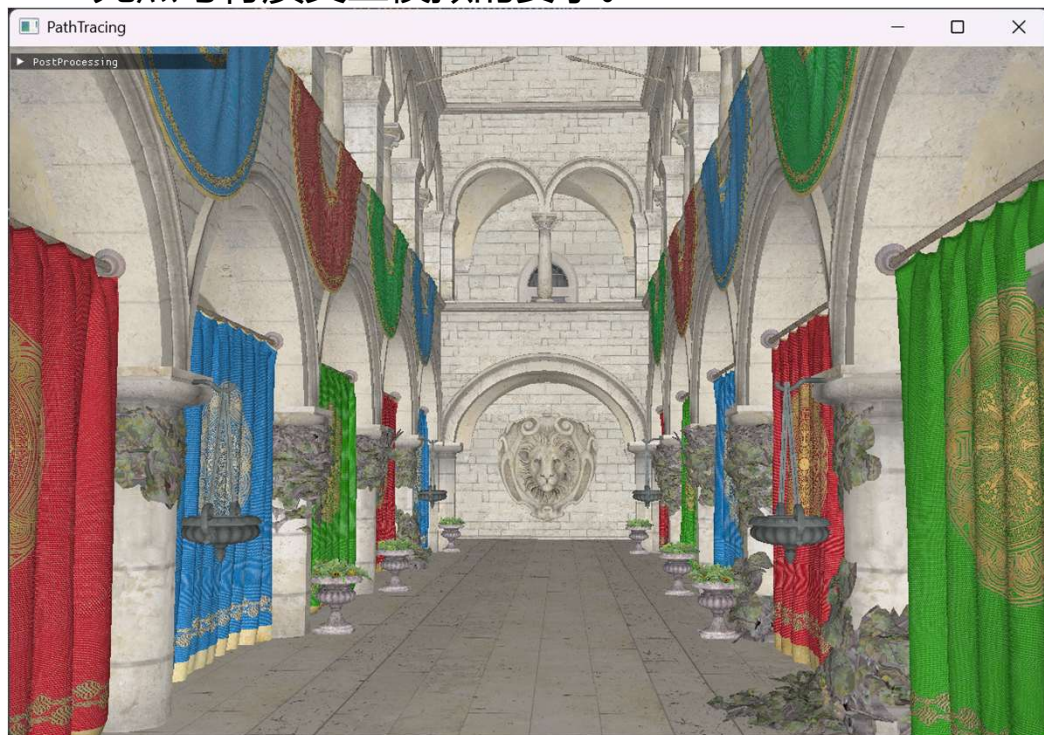
OptiX 是由 NVIDIA 开发的高性能光线追踪引擎。它基于 GPU 的 CUDA 架构，通过高度优化的硬件加速为光线追踪任务提供高效的计算支持，广泛应用于图形渲染、科学模拟和 AI 推理领域。



项目背景与研究意义



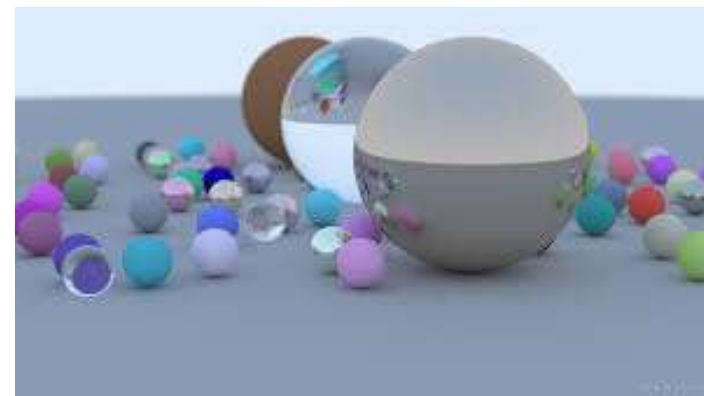
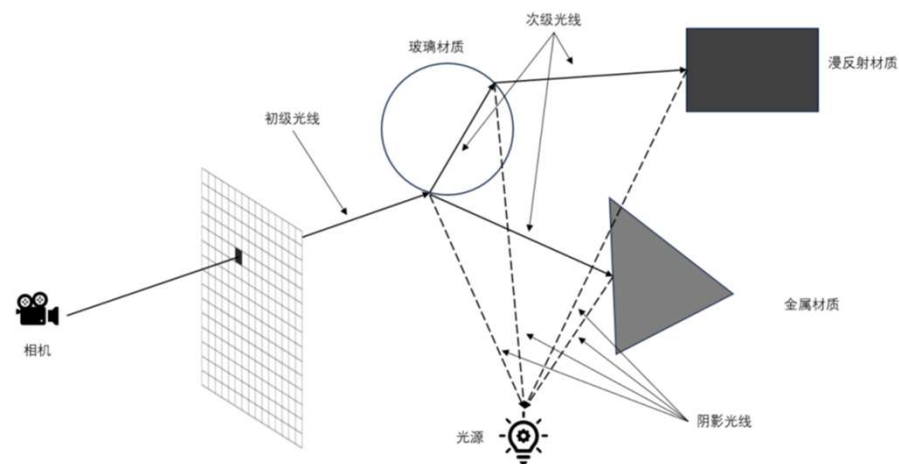
随着真实感图形渲染需求提升，传统光栅化方法已难以满足复杂光照与材质交互模拟的要求。



统一模拟阴

并行加速。
调节、真实

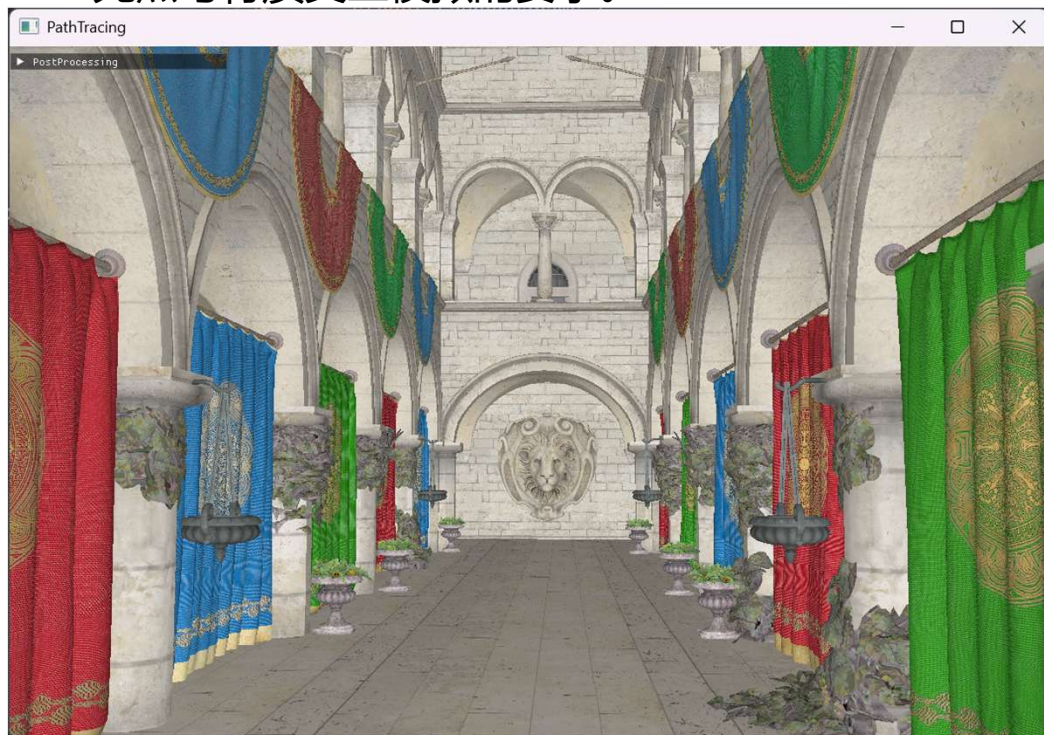
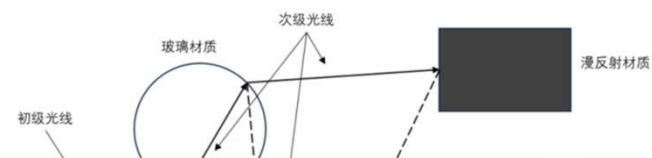
基于
光线追踪
科学模



项目背景与研究意义



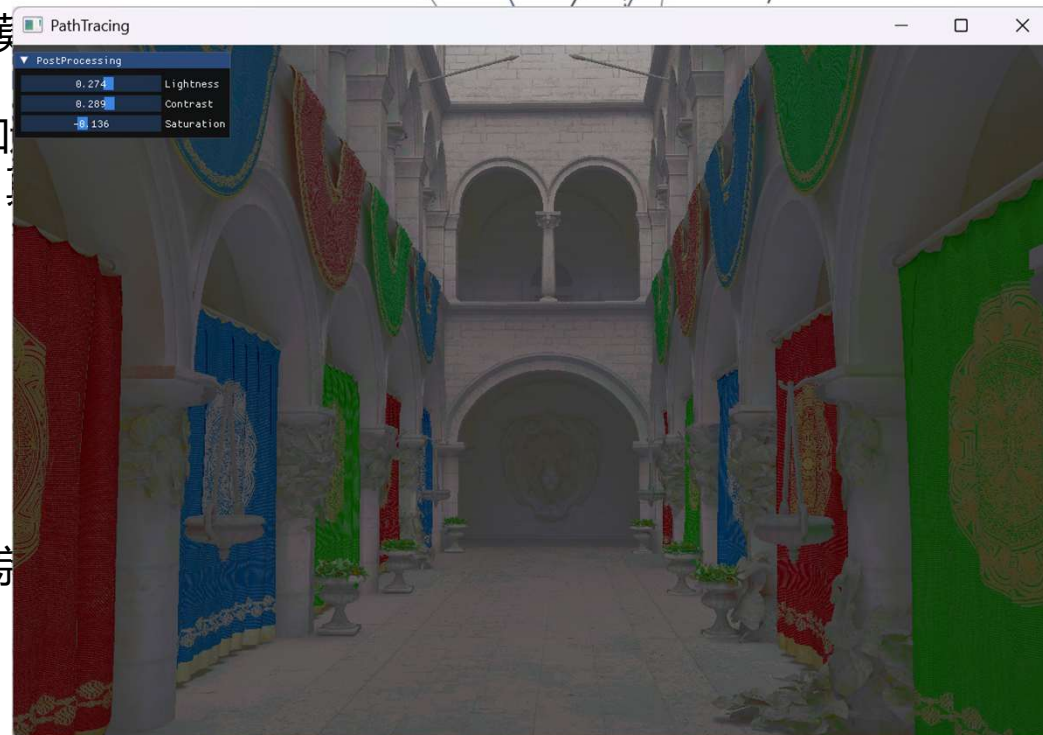
随着真实感图形渲染需求提升，传统光栅化方法已难以满足复杂光照与材质交互模拟的要求。



统一模

并行加
调节、

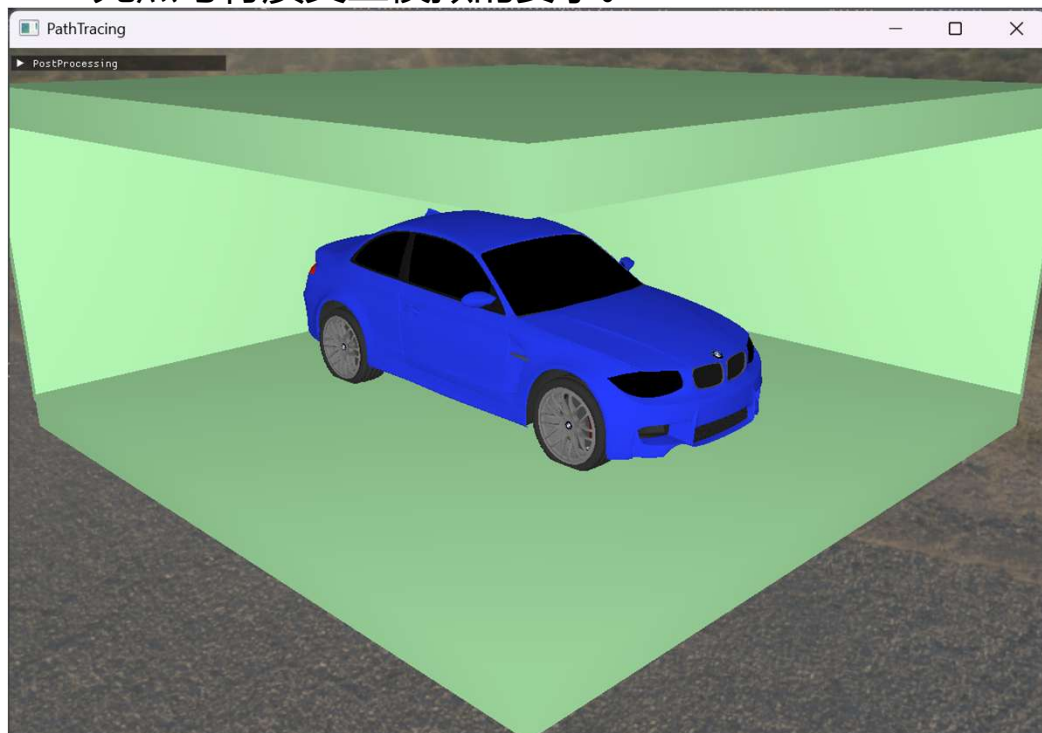
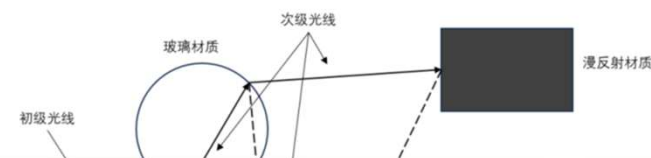
基于
光线追踪
科学模



项目背景与研究意义



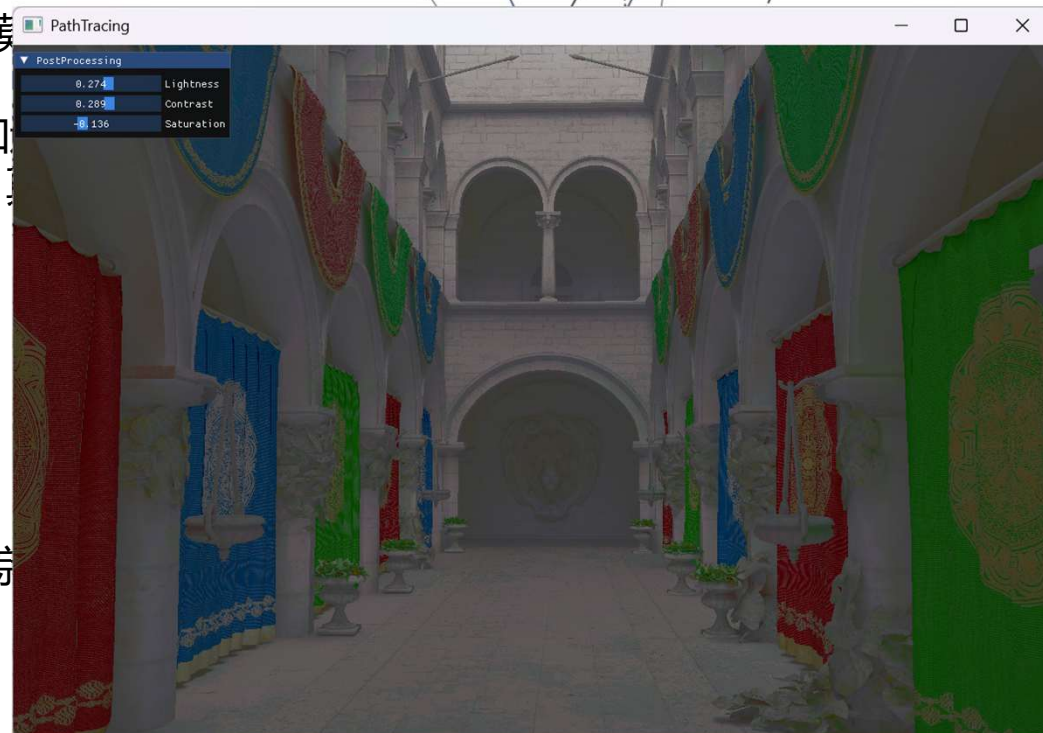
随着真实感图形渲染需求提升，传统光栅化方法已难以满足复杂光照与材质交互模拟的要求。



统一模

并行加
调节、

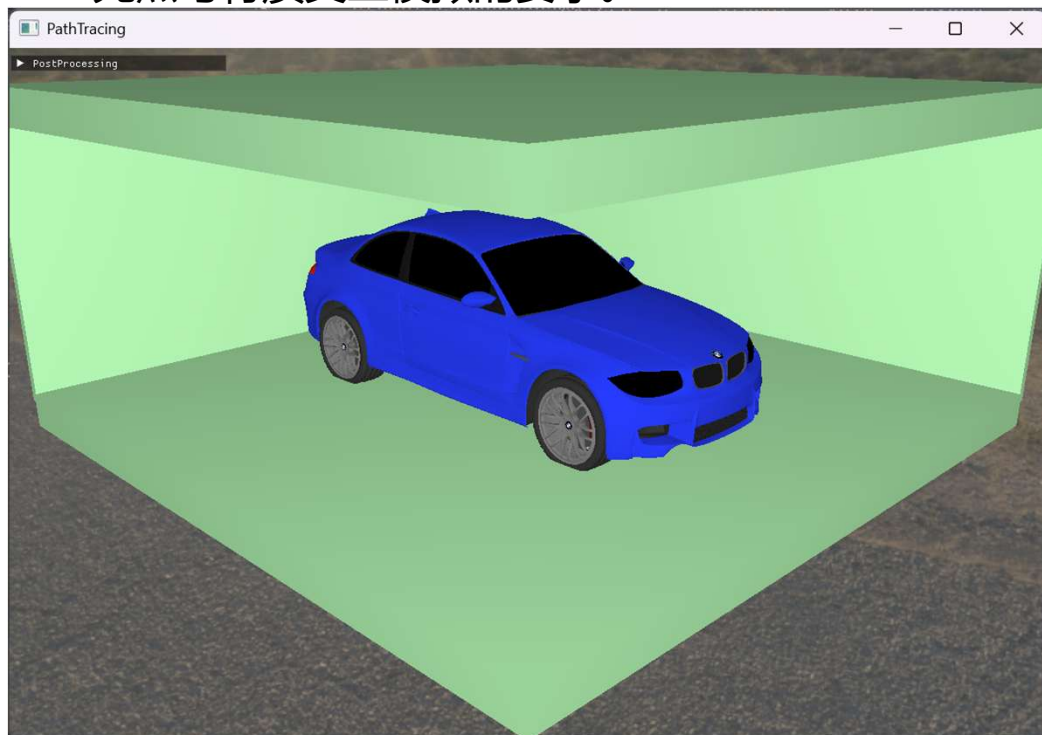
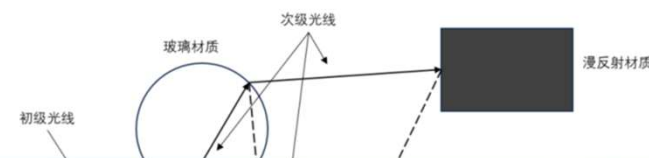
基于
光线追踪
科学模



项目背景与研究意义



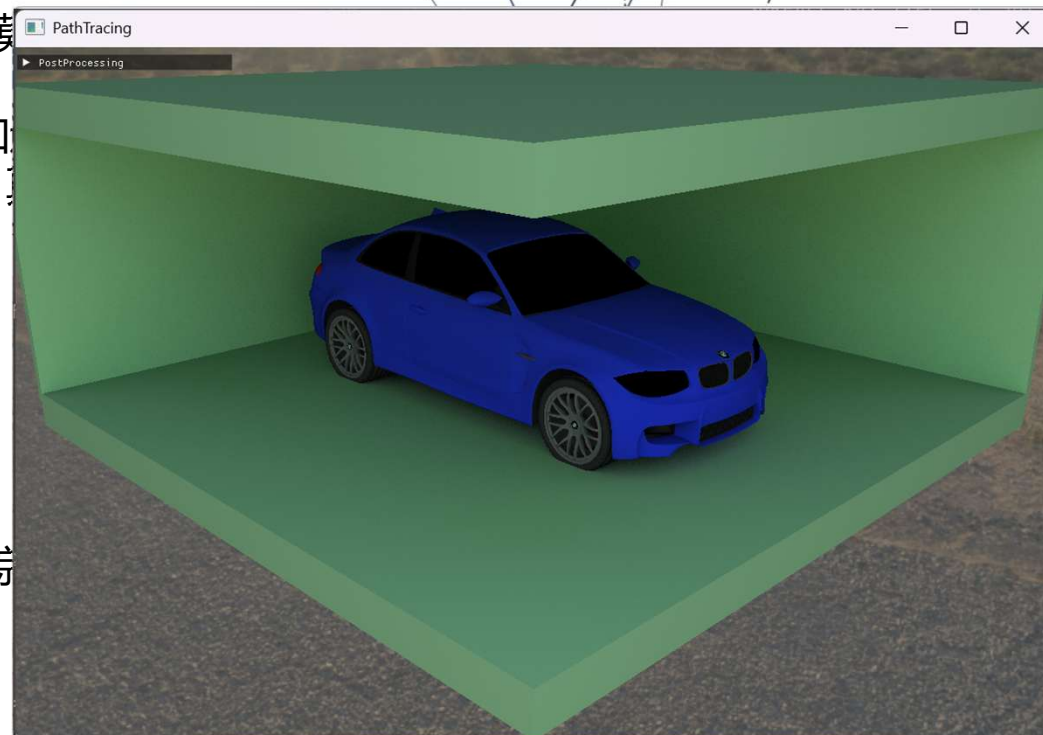
随着真实感图形渲染需求提升，传统光栅化方法已难以满足复杂光照与材质交互模拟的要求。



统一模

并行加
调节、

基于
光线追踪
科学模



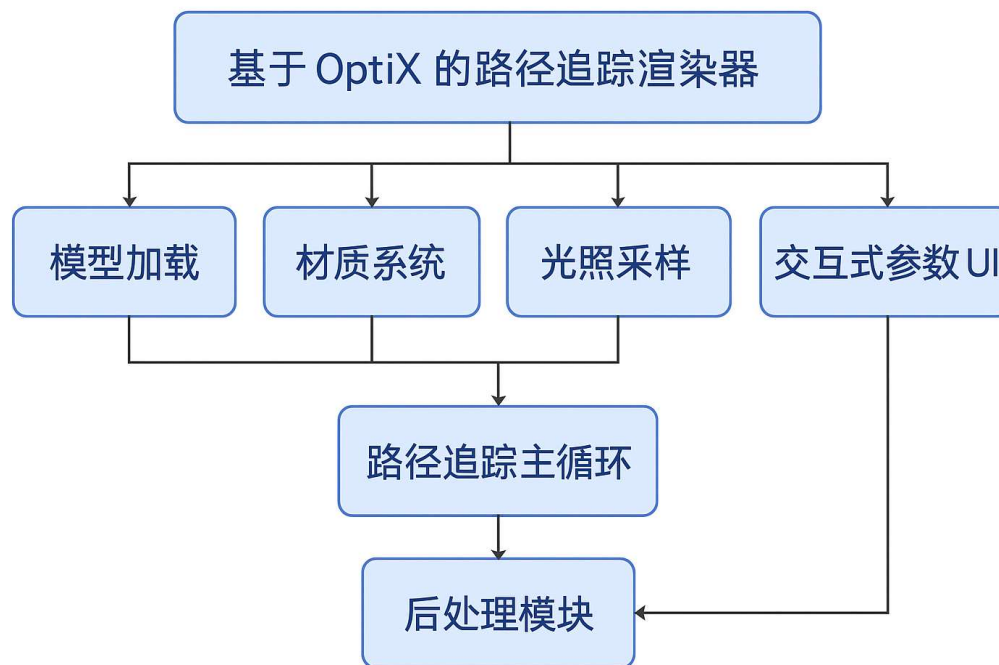
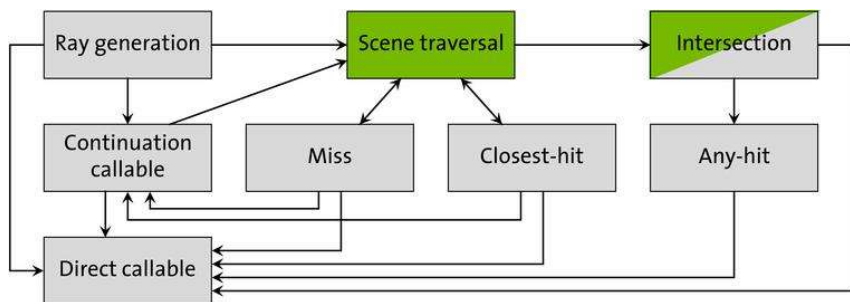
项目目标与功能概述

项目目标

开发一个基于 OptiX 平台的路径追踪渲染器，支持多材质、多光照模型、贴图采样与参数交互调节。

主要功能

- 支持漫反射、金属、透明三类材质；
- 实现环境贴图采样与直接光源采样；
- 支持 CUDA 加载纹理资源；
- 集成 ImGui 实时调节渲染参数；
- 实现亮度、对比度、饱和度等后处理功能。



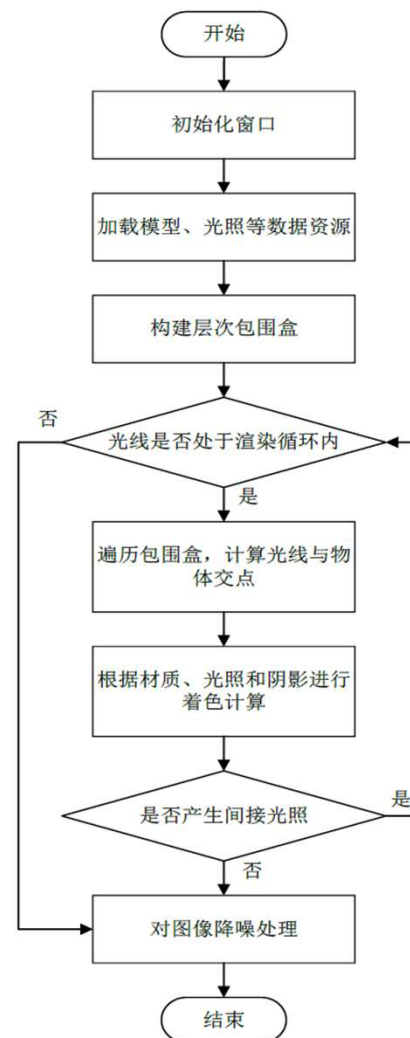
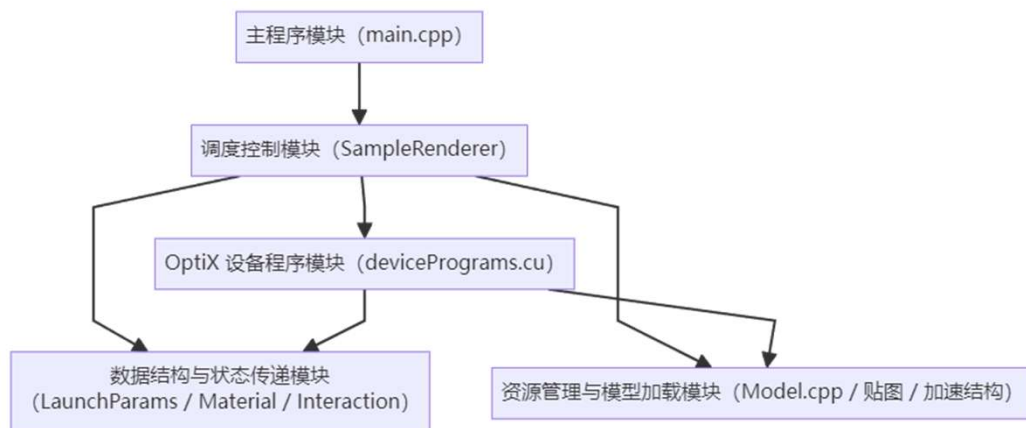
系统架构设计与技术方案



系统架构

系统主要分为五大模块：

- 主程序模块；
- 调度控制模块（渲染器本体，相机、鼠标键盘交互）；
- 数据结构与状态传递模块；
- **Optix 设备程序模块（材质系统、光照采样与 BSDF）；**
- 资源管理（构建 SBT 和 payload）与模型加载；



$$L_o(x, \omega_o) = L_e(x, \omega_o) + \int_{\Omega} f_r(x, \omega_i, \omega_o) L_i(x, \omega_i) (\omega_i \cdot n) d\omega_i$$

其中:

$L_o(x, \omega_o)$: 点 x 沿方向 ω_o 的出射亮度

$L_e(x, \omega_o)$: 自发光项, 表示该点本身沿该方向发出的光 (如光源)

$f_r(x, \omega_i, \omega_o)$: BSDF, 描述入射方向 ω_i 的光被表面反射至 ω_o 的能力

$L_i(x, \omega_i)$: 来自方向 ω_i 的入射亮度

n : 该点表面的单位法向量

Ω : 半球积分范围

蒙特卡洛积分 (Monte Carlo Integration)

$$L_o(x, \omega_o) \approx L_e(x, \omega_o) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f_r(x, \omega_i, \omega_o) L_i(x, \omega_i) (\omega_i \cdot n)}{p(\omega_i)}$$

应用到渲染方程

$$L_o(x, \omega_o) \approx L_e(x, \omega_o) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f_r(x, \omega_i, \omega_o) L_i(x, \omega_i) (\omega_i \cdot n)}{p(\omega_i)}$$

材质系统与 BSDF 实现



材质	漫反射	金属	透明
BSDF	$f_r(\omega_i, \omega_o) = \frac{\rho}{\pi}$ 其中 ρ 是反射率, 表示材料表面对入射光的反射比例; 该模型假设反射与方向无关, 即各个方向出射能量一致	反射颜色仍采用漫反射颜色 $f_r(\omega_i, \omega_o) = \frac{\rho}{\pi}$	$f_r(\omega_i, \omega_o) = \begin{cases} \frac{F_r \cdot \delta(\omega_o - \omega_r)}{ \cos \theta_o }, & \text{若为反射} \\ \frac{(1 - F_r) \cdot \delta(\omega_o - \omega_t)}{ \cos \theta_o }, & \text{若为折射} \end{cases}$ $\delta(\omega_o - \omega_t)$ 表示光线只在理想反射/折射方向具有非零概率的 Dirac Delta 函数, 用于描述完全确定的出射方向。
采样概率密度函数 (PDF)	$p(\omega_i) = \frac{\cos \theta}{\pi}$	$\omega_r = \omega_i - 2(\omega_i \cdot n)n$ $\text{pdf} = \frac{1}{(\pi - 1) \cdot \text{roughness} + 1}$	$\text{pdf} = \begin{cases} F_r, & \text{若选择反射方向} \\ 1 - F_r, & \text{若选择折射方向} \end{cases}$ $\omega_t = \eta(\omega_i + \cos \theta \cdot n) - n \cdot \sqrt{1 - \eta^2(1 - \cos^2 \theta)}$ 其中 F_r 是菲涅尔反射项 $F_r(\cos \theta) = R_0 + (1 - R_0)(1 - \cos \theta)^5,$ $R_0 = \left(\frac{1 - \eta}{1 + \eta} \right)^2$ η 表示两介质的折射率比 $\cos \theta$ 是入射光与法线之间的夹角余弦

材质系统与 BSDF 实现



材质

BSDF

采样概率密度函数 (PDF)

漫

示反身该无



为反射

为折射

方向具
述完全

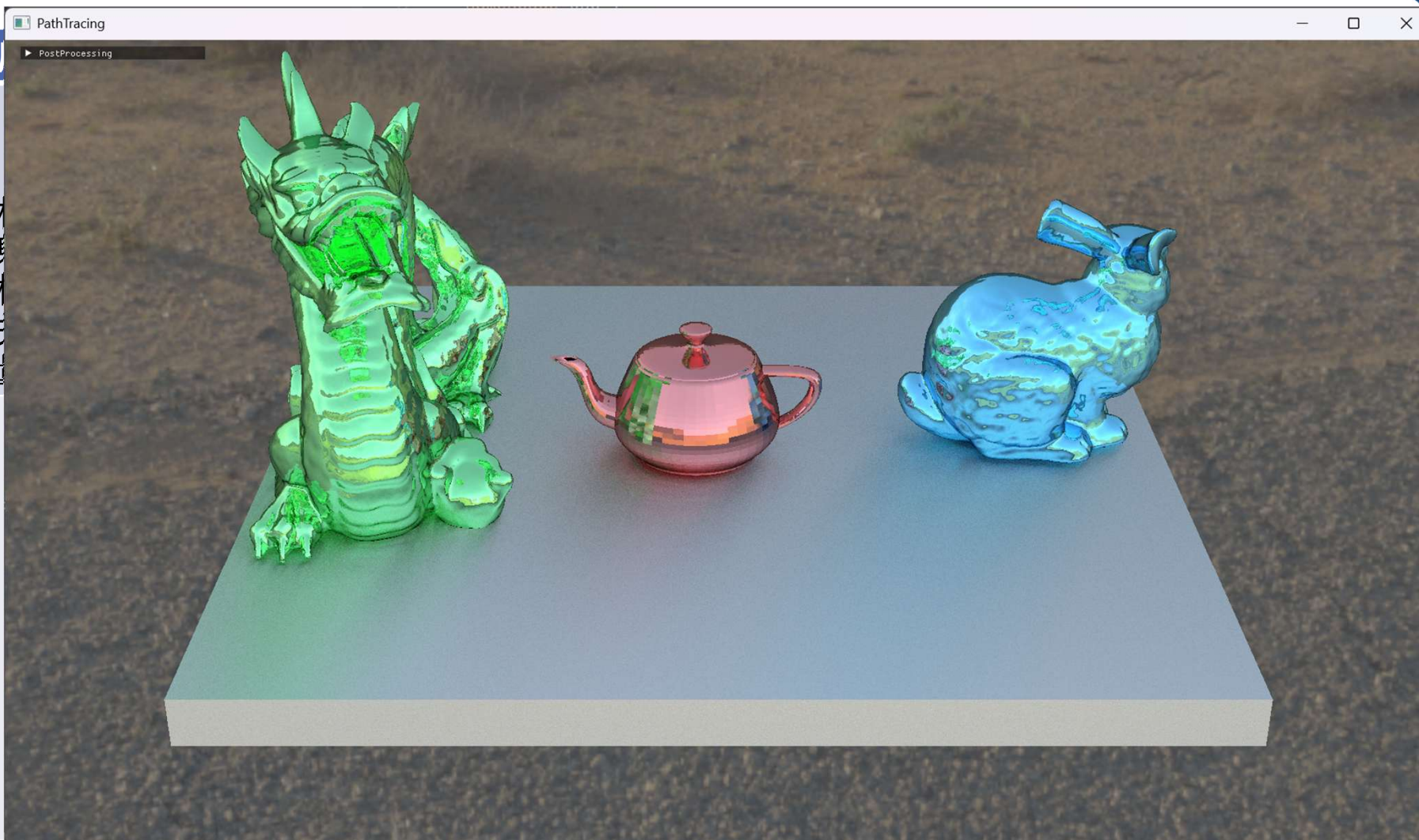
$\cos^2 \theta$)

)⁵,

材质系统与 BSDF 实现



材质	漫
BSDF	示反身该无能力
采样概率密度函数 (PDF)	



反射

折射

道具完全

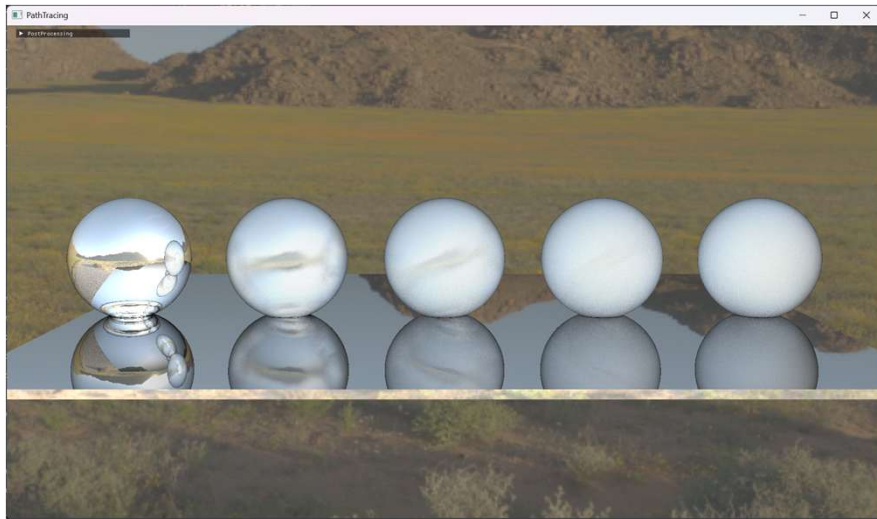
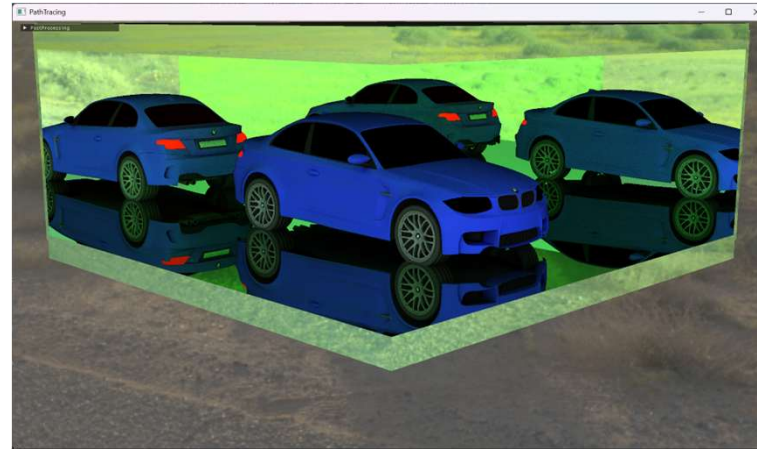
$s^2 \theta)$

材质系统与 BSDF 实现

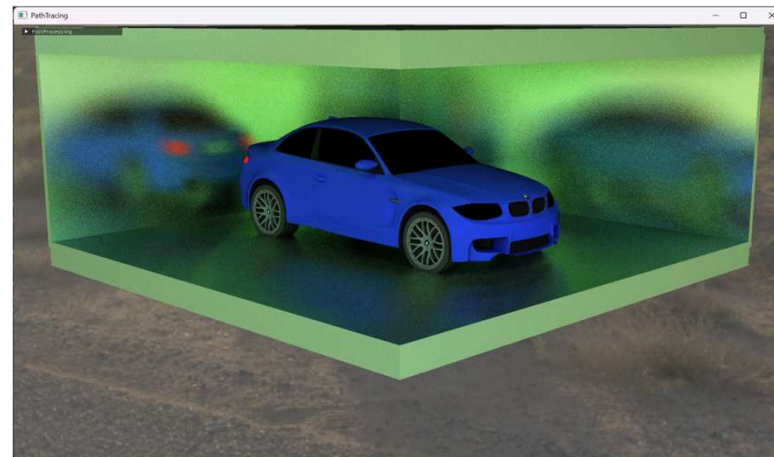
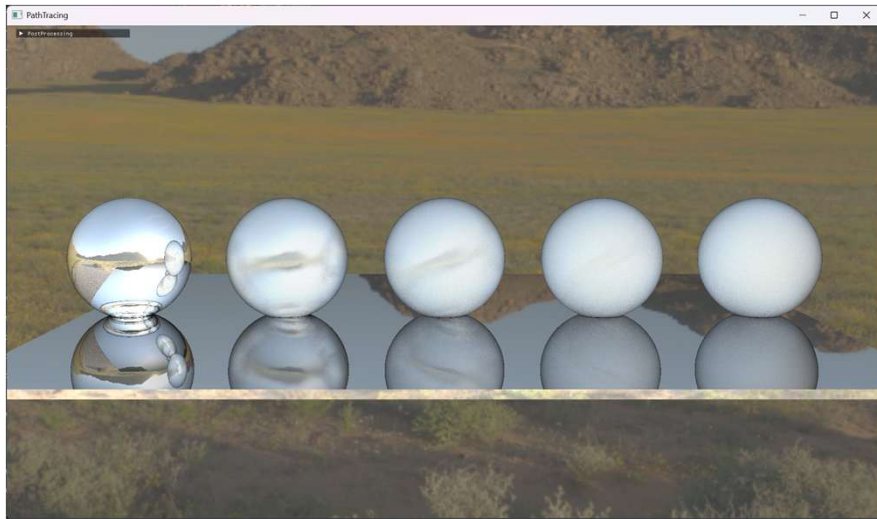
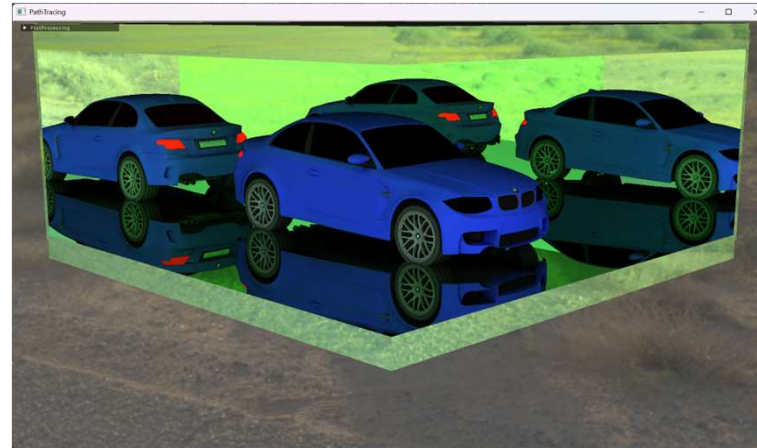


材质	漫		反射
BSDF	示反该无能		折射 均具完全
采样概率密度函数 (PDF)			$\overline{s^2 \theta})$

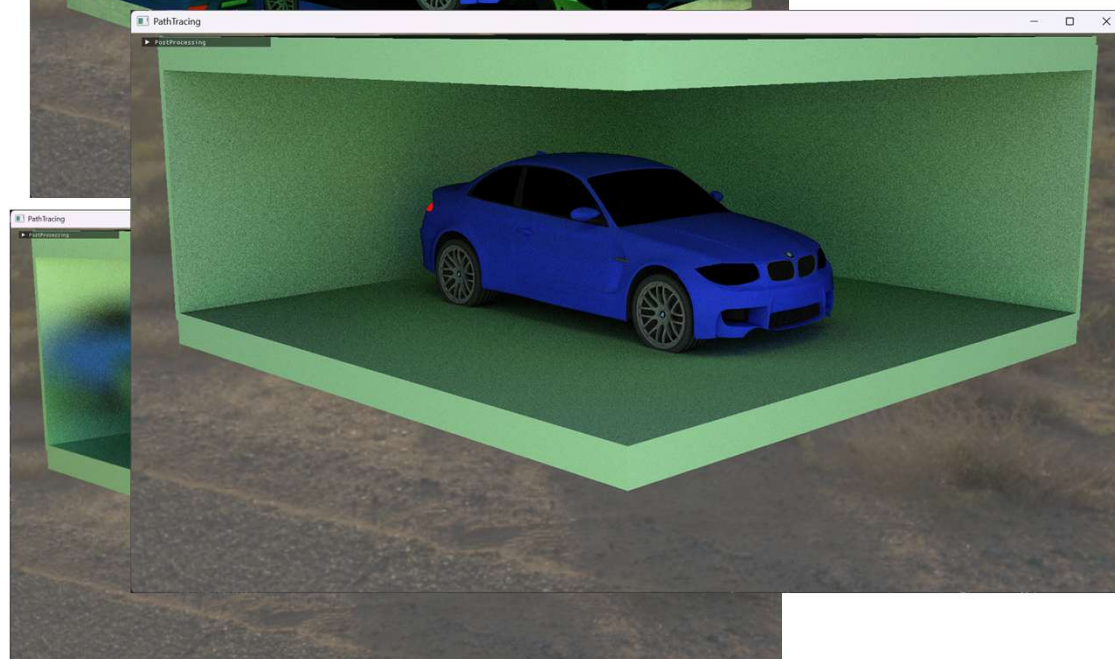
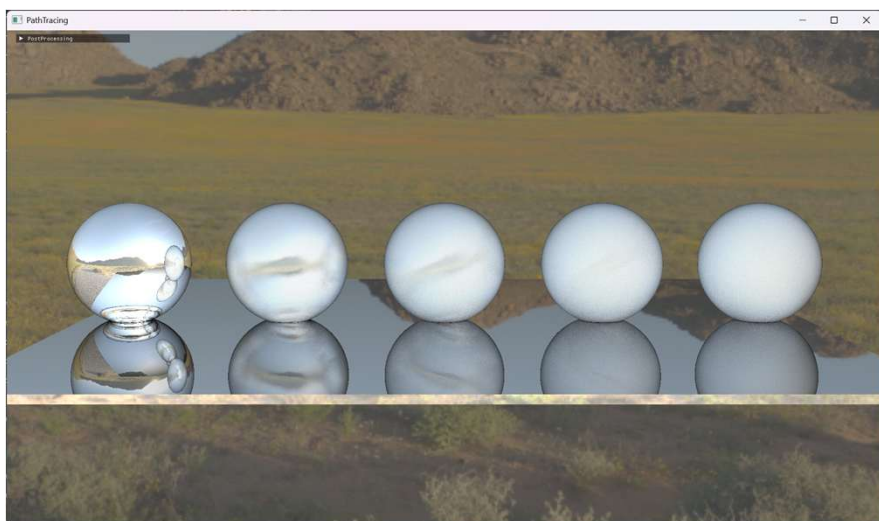
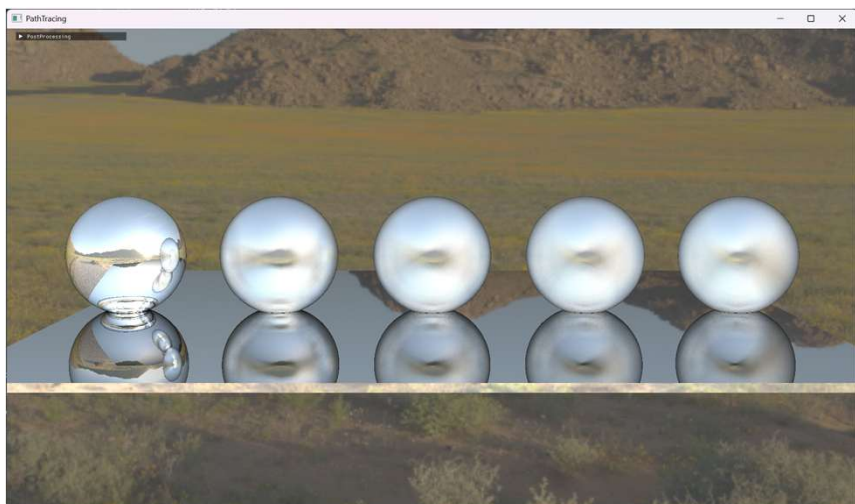
基于粗糙度的插值



基于粗糙度的插值



基于粗糙度的插值

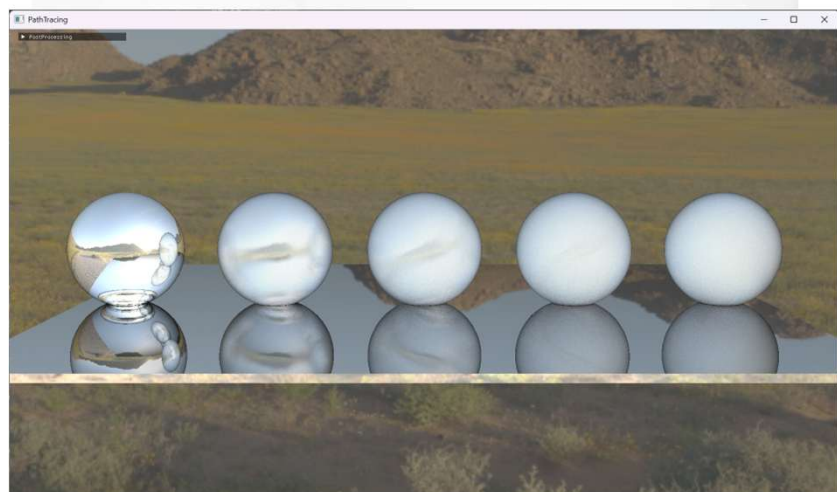
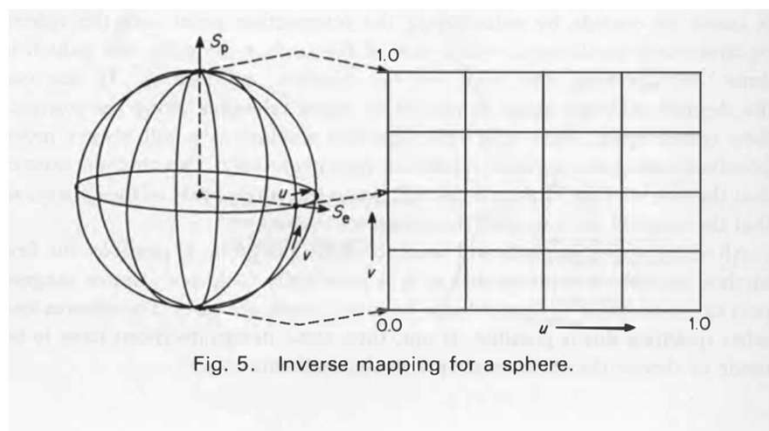


光照采样与贴图支持



环境光采样

支持加载 HDR 环境贴图，基于球面坐标采样颜色；



光照采样与贴图支持



环境光采样

支持加载 HDR 环境贴图，基于球面坐标采样颜色；

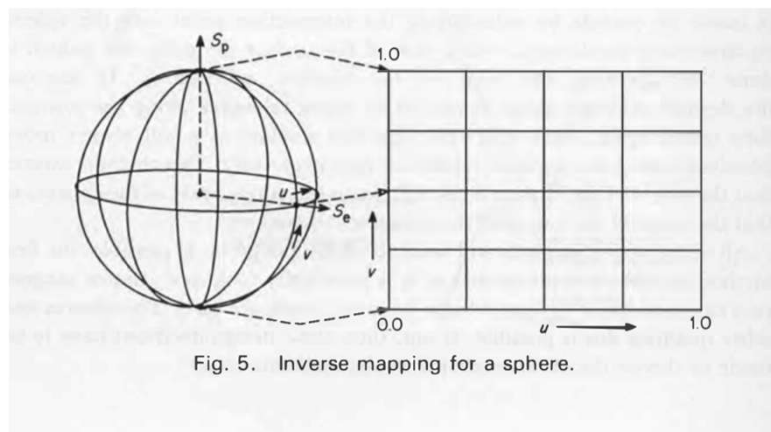
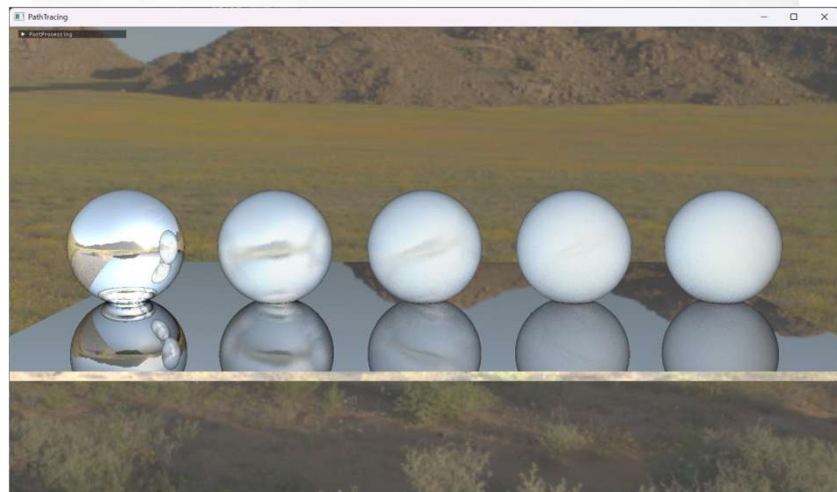


Fig. 5. Inverse mapping for a sphere.

直接光源识别与采样

选取发光面片作为重点采样对象

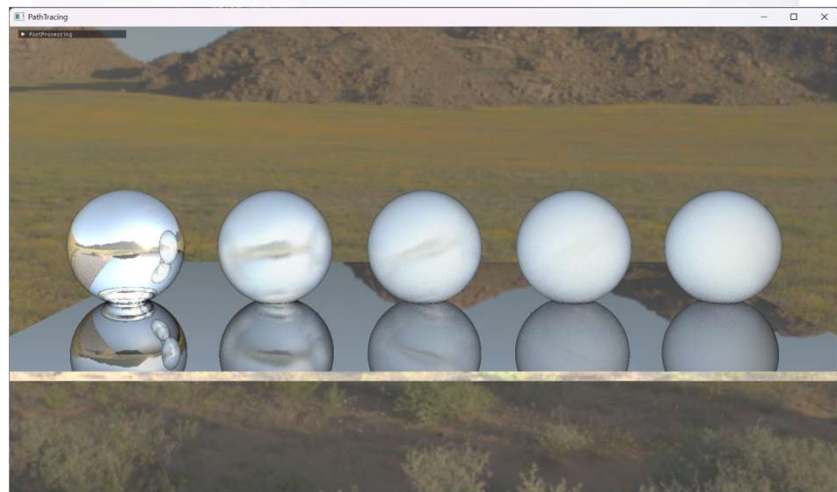
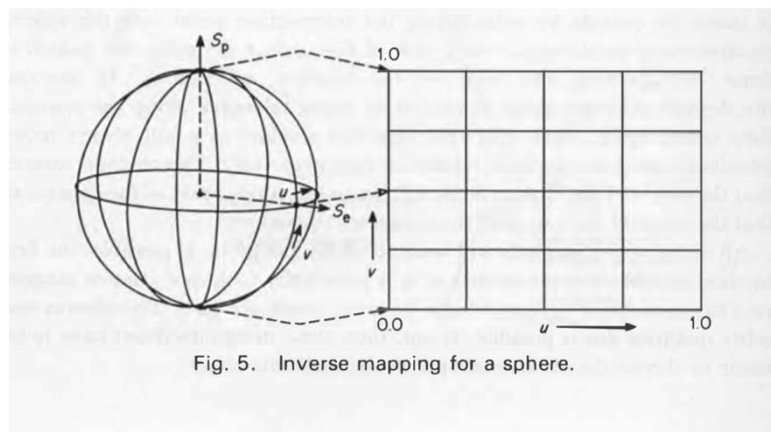


光照采样与贴图支持



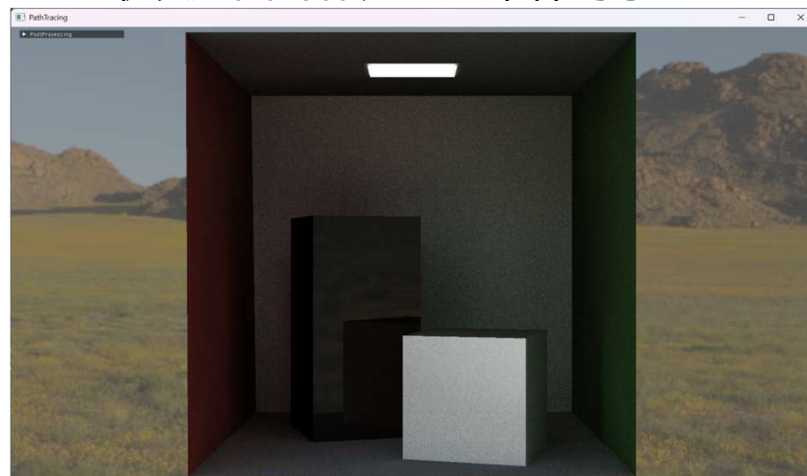
环境光采样

支持加载 HDR 环境贴图，基于球面坐标采样颜色；



直接光源识别与采样

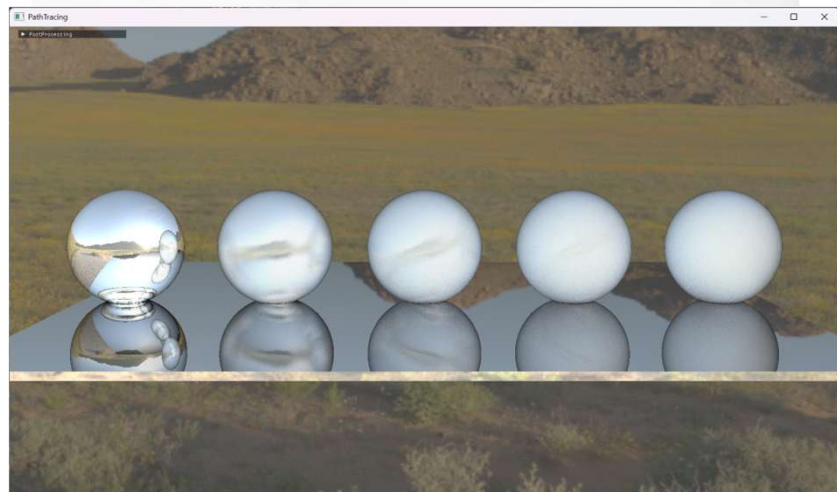
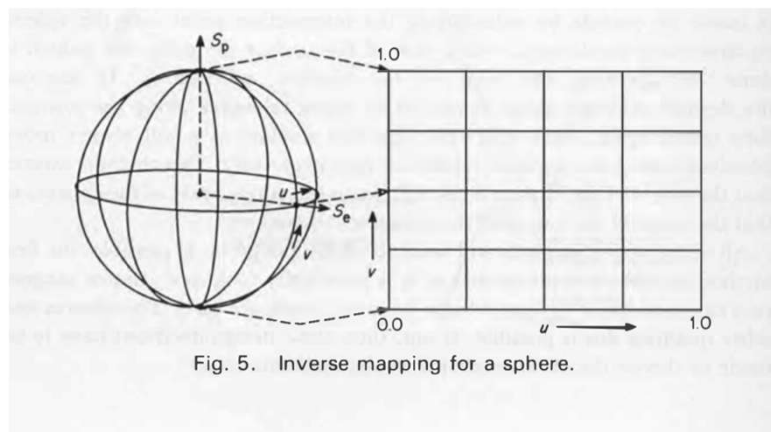
选取发光面片作为重点采样对象



光照采样与贴图支持

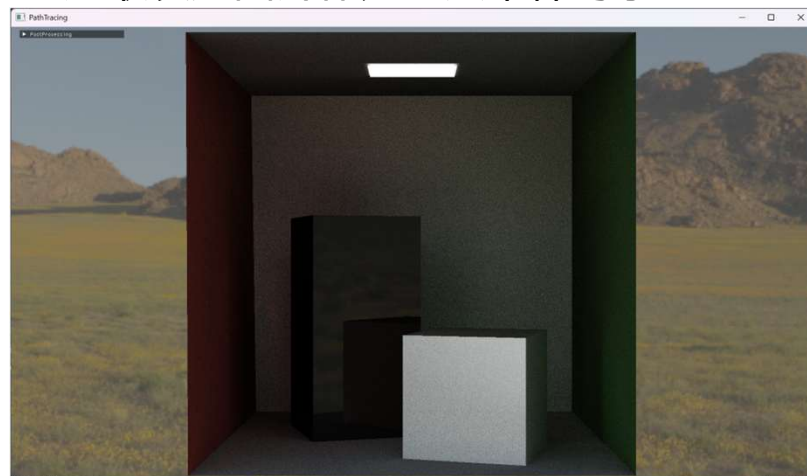
环境光采样

支持加载 HDR 环境贴图，基于球面坐标采样颜色；



直接光源识别与采样

选取发光面片作为重点采样对象



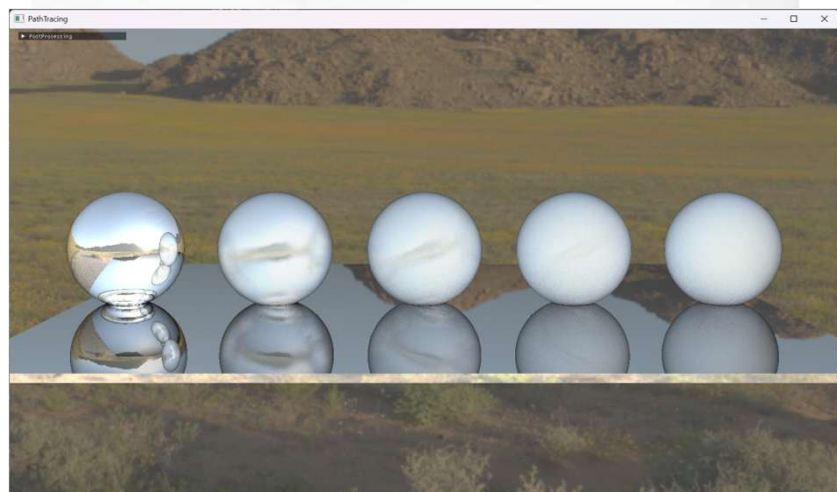
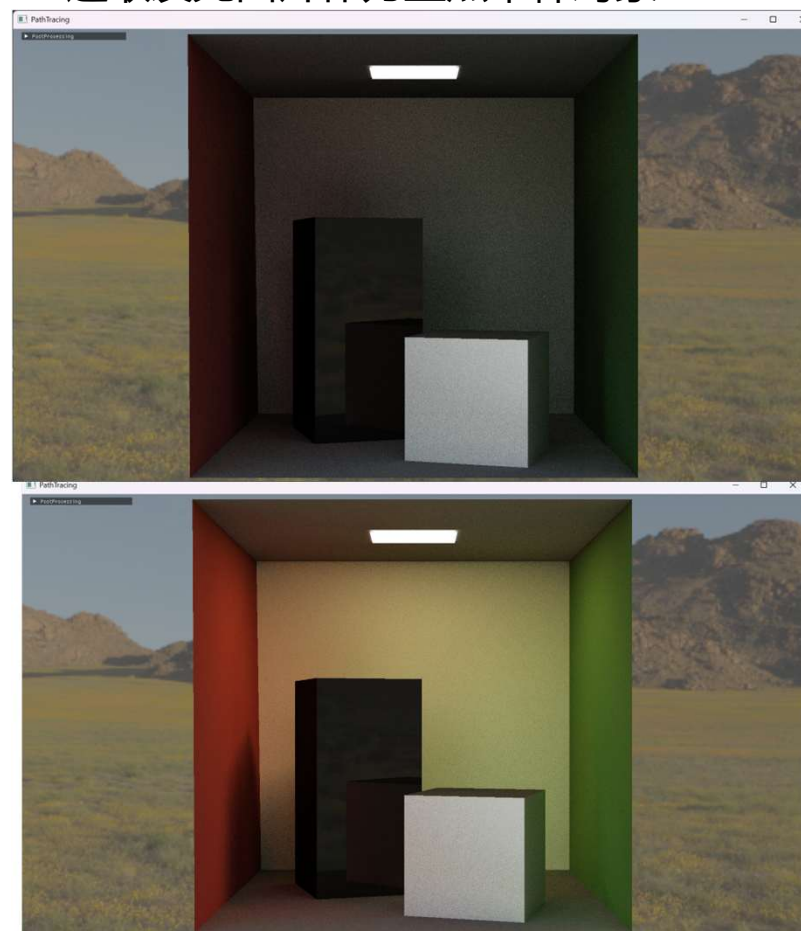
光照采样与贴图支持



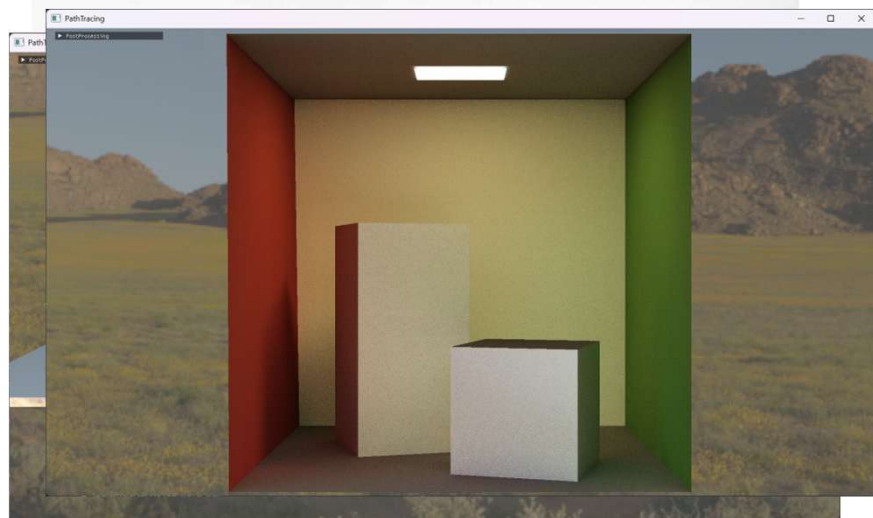
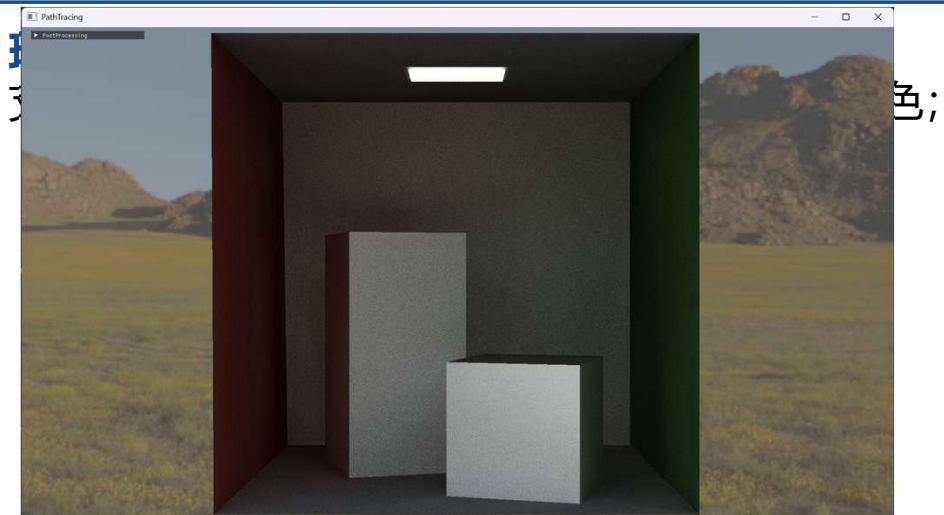
色;

直接光源识别与采样

选取发光面片作为重点采样对象

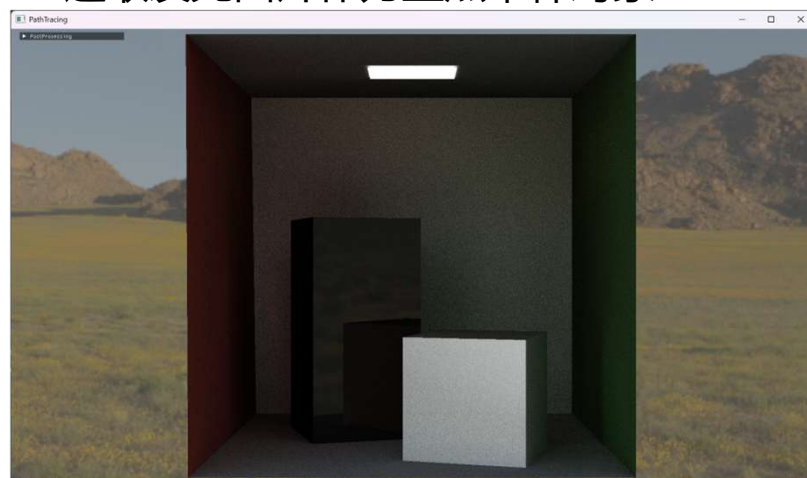


光照采样与贴图支持



直接光源识别与采样

选取发光面片作为重点采样对象



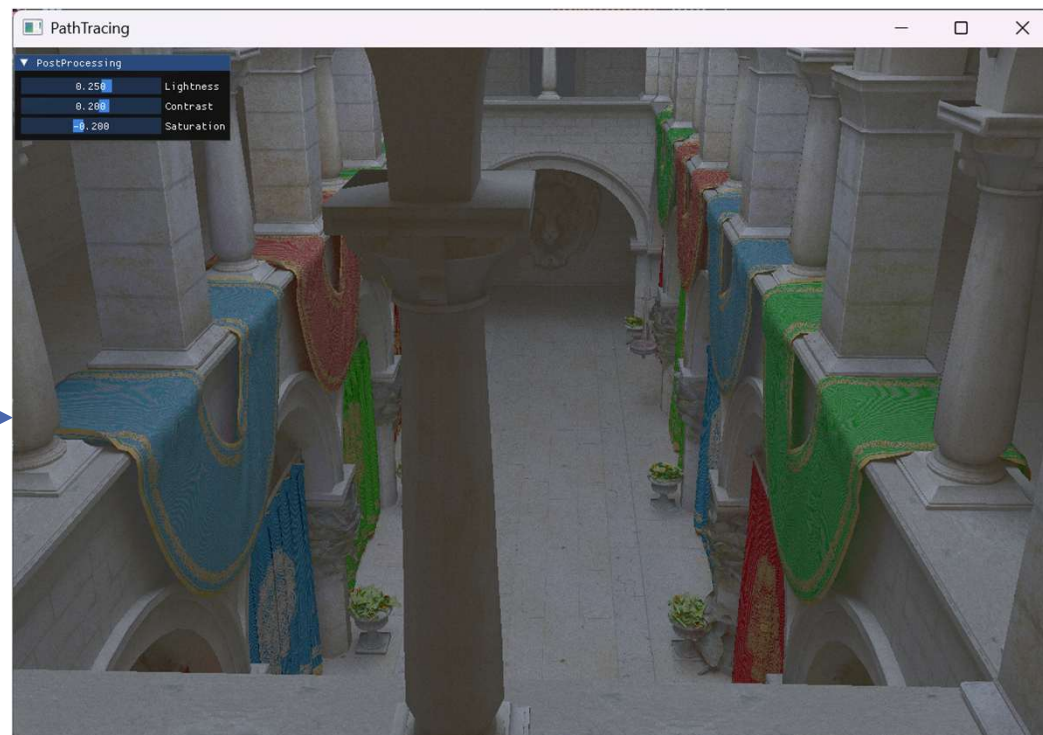
时域降噪机制

针对路径追踪图像噪声问题，实现帧间图像融合策略，将当前帧结果与历史帧加权混合，增强时间上的图像连贯性。通过时间的方式减少噪点波动，提升低采样帧率下的画面稳定性。



时域降噪机制

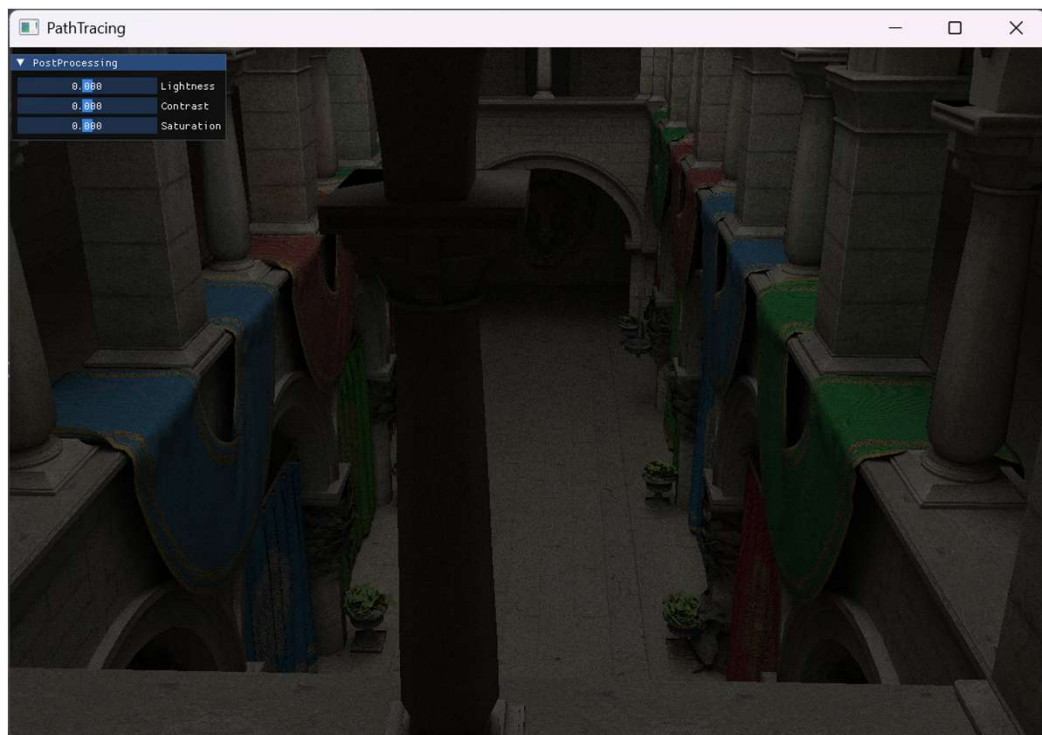
针对路径追踪图像噪声问题，实现帧间图像融合策略，将当前帧结果与历史帧加权混合，增强时间上的图像连贯性。通过时间的方式减少噪点波动，提升低采样帧率下的画面稳定性。



ImGui 和后处理



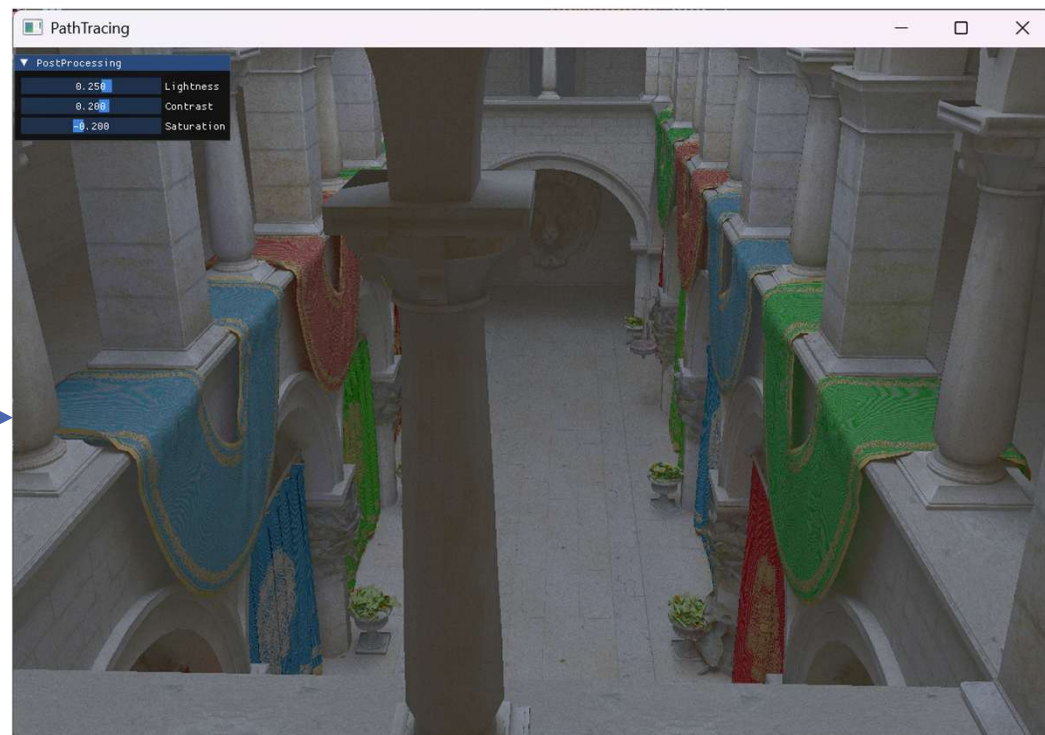
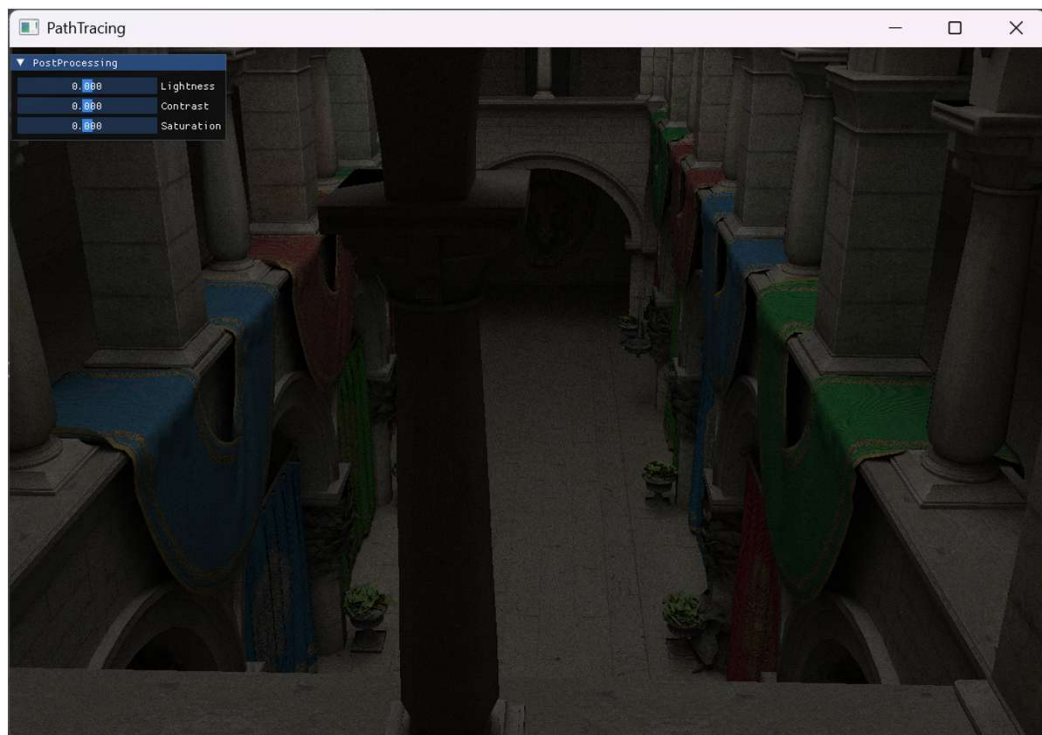
集成 ImGui 图形界面库，在渲染窗口中搭建可交互的 UI 控件，设计了亮度、对比度、饱和度等参数的拖动条。通过实时调整后处理参数并即时预览效果，极大提升了调试效率与算法测试的便利性。



ImGui 和后处理



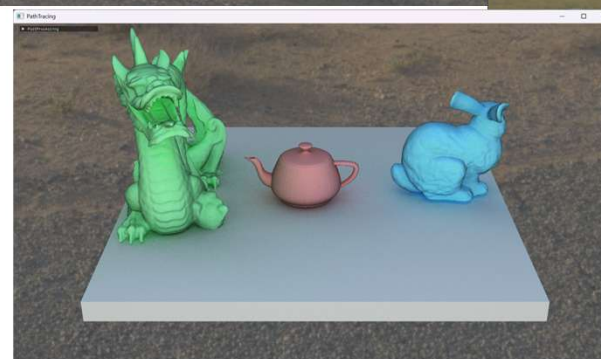
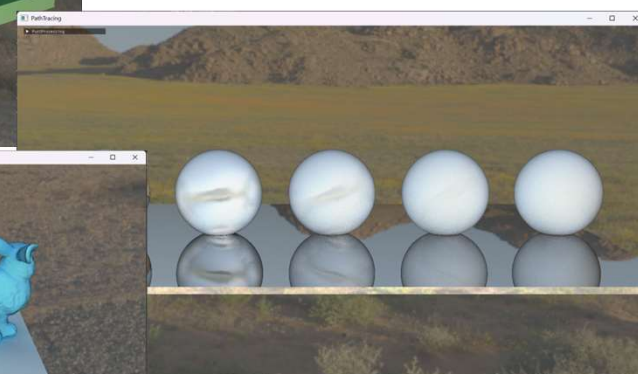
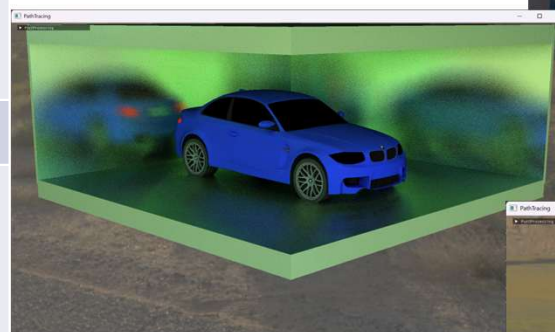
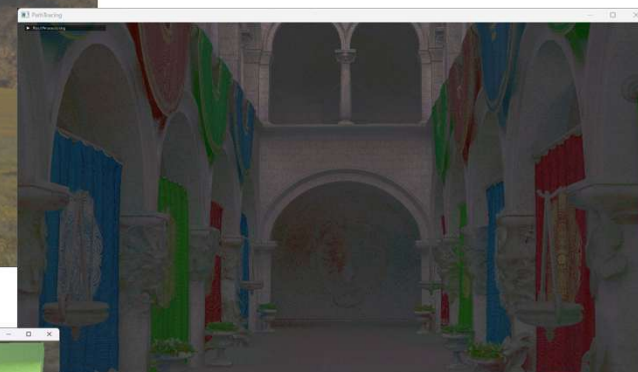
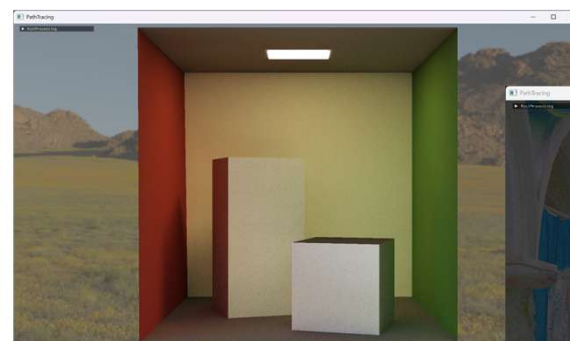
集成 ImGui 图形界面库，在渲染窗口中搭建可交互的 UI 控件，设计了亮度、对比度、饱和度等参数的拖动条。通过实时调整后处理参数并即时预览效果，极大提升了调试效率与算法测试的便利性。



性能评估与显存使用



场景	网格数	材质类型	启动时间 (ms)	每帧耗时 (ms)
Cornell Box	510	DIFFUSE/METAL	239/237	107.282/103.022
Sponza	300+	METAL	6421	172.189
BMW	52	METAL	581	120.223
Test1	4球+地板	METAL(varying roughness)	301	9.7285
Test2	3模型+地板	DIFFUSE/METAL/DIELECTRIC	1163/1154/1166	27.7229/14.5542/21.4266



性能评估与显存使用



资源类型	显存占用 (估算)	描述
顶点与索引缓冲	50–1400 MB	不同模型规模下的数据量差异较大
贴图纹理资源	100–200 MB	加载 HDR 环境图与漫反射贴图
加速结构 (GAS)	20–80 MB	OptiX 自动管理, 随模型复杂度波动
渲染帧缓存	20–60 MB	存储路径追踪结果用于后处理
SBT + 参数数据	<10 MB	绑定材质、光源、纹理等数据结构

```
[Memory Usage - Before Render] Used: 1355.26 MB, Free: 15020.2 MB, Total: 16375.5 MB  
[Memory Usage - After Render] Used: 3003.26 MB, Free: 13372.2 MB, Total: 16375.5 MB
```

实际运行总显存占用约在 **300MB–1500MB** 范围内, 具备较好扩展性, 可运行在大多数现代 GPU 上。

总结与展望

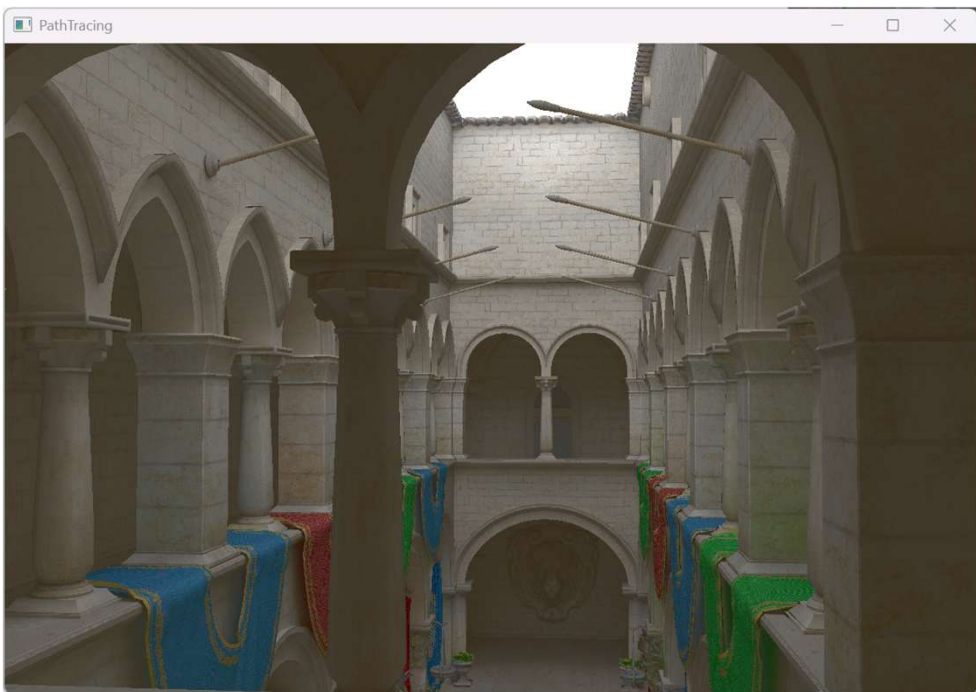


项目总结

本项目实现了一个基于 OptiX 的 GPU 路径追踪渲染器；支持多种材质类型、光照采样和实时参数调节；图像质量与性能表现良好，结构清晰、易于扩展。

后续展望

引入 Disney BSDF 等通用微表面模型，提升材质真实感；加入多重重要性采样（MIS）与路径重排，提高采样效率；优化内存管理与系统交互，增强调试与实用性。





视频展示



谢谢
