

Lab-2



图形绘制技术

Final Project

大作业选题

2025 春季学期

Abstract

该文档是南京大学计算机系 2025 春季学期《图形绘制技术》课程大作业的实验手册。

课程大作业内容是在任意渲染框架中完成若干前沿图形渲染技术的探索与实践。旨在通过多个渲染子领域的选题让大家了解渲染领域常见的研究方向和相应经典或者前沿的研究成果，并积累实践经验。

各位同学如果在课程大作业实验过程中有任何疑问或想法，包括但不限于

- 实验框架的出现的 Bug
- 手册中叙述不完善的部分
- 对实验安排的建议
- 更好的框架设计
- 对现有算法的新理解和改进思路

主讲老师：过洁 Email : guojie@nju.edu.cn

欢迎联系助教，帮助我们完善课程的实验部分。TAs :

- 杨铭 QQ : 925882085 Email : 925882085@qq.com
- 孙奇 QQ : 745356675 Email : 745356675@qq.com

同时，课程的框架代码以及实验文档也会不断更新改进，请同学们关注助教发布的相关信息。

目录

1 大作业可选课题	3
2 高效采样方法 ReSTIR	4
2.1 算法原理	4
2.2 参考文献	6
3 经典材质模型 Disney Principled BSDF	7
3.1 核心参数	7
3.2 参考资料	8
4 高质量体积云渲染	9
4.1 体渲染原理	9
4.2 离线 or 实时方案	10
4.3 推荐阅读及参考资料	11
5 基于体素的实时全局光照	12
5.1 全局光照	12
5.2 算法原理	12
5.3 参考文献	13
6 作业提交	14
6.1 分数说明	14
6.2 提交内容	14

1. 大作业可选课题

本年度的图形绘制技术期末大作业选题会介绍四个主题的具体方向，分别是：**高效采样方法 ReSTIR**、**经典材质模型 Disney Principled BSDF**、**高质量体积云渲染**、**基于体素的实时全局光照**。

依照给出的主题，你可以在**任意离线/实时渲染框架**（离线框架例如 Moer、Mitsuba、PBRT，实时框架例如 Unity/Unreal、Falcor、Filament 等，甚至可以是自己的渲染器）中完成你自己的实现。

在每一个主题中，文档将会给出相关的参考文献，建议你按照参考文献实现。针对每个主题，你可以将实现进行简化（比如，对于下文中将要提到的高效采样方法，你可以将其退化到 Resampled Importance Sampling (RIS)），当然，你也可以提出其他实现，或者在对应题目下做出新的改进或优化，我们会视实现的具体效果进行评估和打分。

当然，如果你有其他想做的选题，也欢迎与我们联系，我们会对选题进行进一步评估。

2. 高效采样方法 ReSTIR

近年来，硬件加速光线追踪技术的发展使蒙特卡洛路径追踪在实时渲染中的应用成为可能，但每个像素所能追踪的光线数量仍然有限。这一限制在复杂光传输场景中常常导致显著的图像噪声。尽管现代降噪技术在一定程度上可以缓解噪声问题，高质量渲染的实现仍然高度依赖于高效采样策略的设计。

课程中简单介绍了重要性采样，本部分将会简单介绍高效采样方法的任务目标，并明确我们要实现的 ReSTIR (Reservoir-based Spatiotemporal Importance Resampling) 采样方法的应用场景。

2.1 算法原理

蒙特卡洛路径追踪本质上是在求解渲染方程

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

其中 L_o 是出射辐射度， L_e 是自发光项， Ω 是采样区间， f_r 是 BSDF/BRDF， L_i 是入射辐射度， n 为着色表面法线， ω_o 为出射方向立体角， ω_i 为入射方向立体角。此处我们考虑后半部分的积分，其是连续的，为了在计算机中求解，我们需要对其进行蒙特卡洛估计：

$$\int_{\Omega} f_r(x, \omega_i, \omega_o) \cdot L_i(\omega_i) \cdot n \cdot \omega_i d\omega_i = E\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{f_r(x, \omega_i, \omega_o) \cdot L_i(\omega_i) \cdot n \cdot \omega_i}{p(\omega_i)}\right]$$

其中 $p(\omega_i)$ 从概率密度函数 p 中采样得到，为了得到正确的积分结果，我们需要进行多次采样以获取接近积分值的结果。

注意，概率密度函数的形状越接近被积函数，采样效率越高，所需的采样次数越少。最优的情况下，假设概率密度函数

$$p(\omega_i) = \frac{f_r(x, \omega_i, \omega_o) \cdot L_i(\omega_i) \cdot n \cdot \omega_i}{\int_{\Omega} f_r(x, \omega_i, \omega_o) \cdot L_i(\omega_i) \cdot n \cdot \omega_i d\omega_i}$$

则有

$$\frac{f_r(x, \omega_i, \omega_o) \cdot L_i(\omega_i) \cdot n \cdot \omega_i}{p(\omega_i)} = \int_{\Omega} f_r(x, \omega_i, \omega_o) \cdot L_i(\omega_i) \cdot n \cdot \omega_i d\omega_i$$

仅需要一次采样我们就可以得到正确的积分结果，然而这本身是有问题的，因为

概率密度函数包含了目标函数的积分结果，但这能够说明提高样本的质量能明显加快蒙特卡洛估计的收敛速度，基于此理论，大量的采样方法被发现，以提高蒙特卡洛估计的样本质量，加快路径追踪渲染的收敛速度。

ReSTIR 便是其中之一，且是非常适用于实时路径追踪的采样方法，由 Bitterli 等人提出，其结合了重采样重要性采样（Resampled Importance Sampling, RIS）和加权蓄水池采样（Weighted Reservoir Sampling, WRS），通过流式考察复用屏幕空间光照样本，能够显著提升复杂光源场景下的光照样本质量。其主要思路为：

- 基于 RIS，对多个候选样本进行重采样，从而提高最终样本的质量。
- 使用 WRS 对样本进行流式考察，无需一次存储 RIS 所需的多个样本，而是通过流式考察，来减少存储相关成本。
- 结合实时渲染的优势，在时域和空域进行样本复用，从而大大提高一帧渲染中能进行重采样的样本数，使渲染结果快速收敛，达到实时性能。

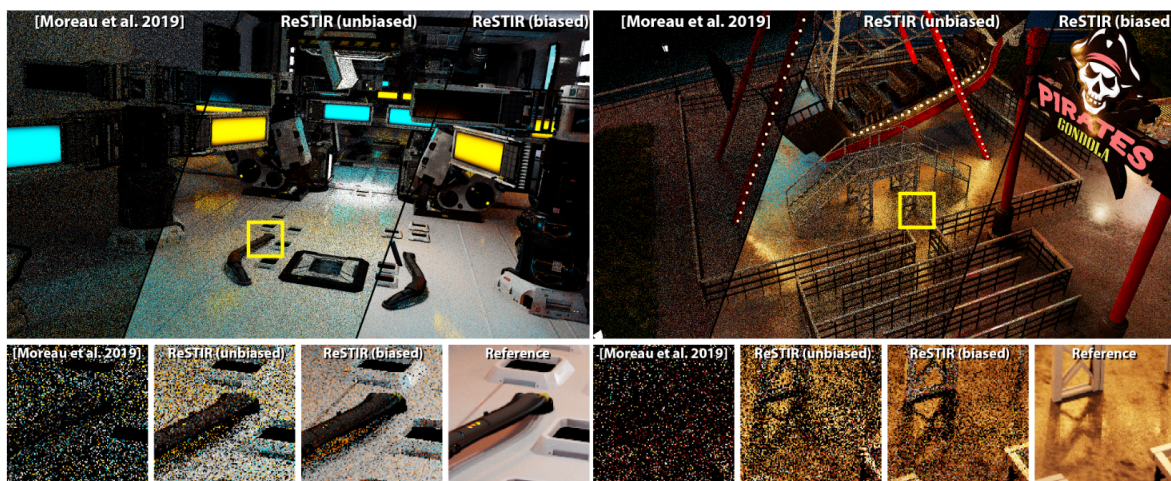


Fig. 1. Two complex scenes ray traced with direct lighting from many dynamic lights. (Left) A still from the ZERO DAY video [Winkelmann 2015] with 11,000 dynamic emissive triangles. (Right) A view of one ride in an AMUSEMENT PARK scene containing 3.4 million dynamic emissive triangles. Both images show three methods running in equal time on a modern GPU, from left to right: Moreau et al. [2019]’s efficient light-sampling BVH, our new unbiased estimator, and our new biased estimator. The ZERO DAY image is rendered in 15 ms and AMUSEMENT PARK in 50 ms, both at 1920×1080 resolution. ZERO DAY ©beep, Pirate Ship ©sema edis

图 1: Spatiotemporal reservoir resampling for real-time ray tracing with dynamic direct lighting

你需要实现论文中的采样方法来检验 ReSTIR 的高性能和高质量效果，我们推荐你使用硬件光追的实时渲染框架进行实现，因为它天然适配该算法，离线框架也可以实现该算法，但如果你选择使用离线框架进行实现，你的时域样本服用可能会受到限制，我们会根据你使用的渲染框架评估你的得分，所以不用担心使用离线框架会出现扣分的情况。

2.2 参考文献

- Bitterli, Benedikt et al, *Spatiotemporal reservoir resampling for real-time ray tracing with dynamic direct lighting*. ACM Transactions on Graphics (TOG) 39 (2020): 148:1 - 148:17.
- Chris Wyman, Markus Kettunen, et al, *A Gentle Introduction to ReSTIR Path Reuse in Real-Time*. ACM SIGGRAPH 2023 Courses.

3. 经典材质模型 Disney Principled BSDF

Disney Principled BSDF 是由 Walt Disney Animation Studios 于 2012 年和 2015 年提出和扩展的一种基于物理的材质模型，旨在通过统一的参数集模拟多种常见材质（如金属、塑料、布料、皮肤等），并提供艺术家友好的调节方式。该模型已被广泛应用于 Blender、Unreal Engine、RenderMan 等主流渲染引擎中。

3.1 核心参数

表 1: Disney Principled BSDF 参数列表

参数	说明
Base Color	基础色，定义材质的主要颜色
Subsurface	次表面散射程度，用于模拟皮肤、蜡等半透明材质
Metallic	金属度，0 表示非金属，1 表示金属
Specular	镜面反射强度，控制非金属材质的高光反射程度
Specular Tint	镜面反射颜色，调整高光颜色向基础色的偏移程度
Roughness	粗糙度，影响表面的光滑程度，从而影响高光的锐利度
Anisotropic	各向异性度，控制高光的拉伸程度，常用于模拟拉丝金属等材质
Sheen	光泽度，模拟布料等材质在边缘处的柔和高光
Sheen Tint	光泽颜色，调整 Sheen 高光的颜色
Clearcoat	清漆层强度，添加额外的高光层，用于模拟汽车漆等材质
Clearcoat Roughness	清漆层粗糙度，控制清漆层的光滑程度
IOR	折射率，影响材质的反射和折射行为
Transmission	透射度，控制光线穿透材质的程度
Transmission Roughness	透射粗糙度，影响透射光的模糊程度

Disney Principled BSDF 基于微表面理论（Microfacet Theory），其核心组件包括：

- **漫反射 (Diffuse)**：采用改进的 Schlick Fresnel 模型，考虑了粗糙度对反射的影响。
- **镜面反射 (Specular)**：使用 GTR（Generalized Trowbridge-Reitz）分布函数，结合 Smith-GGX 几何遮蔽项和 Schlick Fresnel 项，模拟真实的高光行为。
- **次表面散射 (Subsurface Scattering)**：通过两个指数项的总和来模拟光在材质内部的散射行为，适用于皮肤等半透明材质。
- **清漆层 (Clearcoat)**：添加额外的高光层，使用独立的 GTR 分布函数，模拟清漆等透明涂层的反射效果。

你需要实现论文中的 Disney Principled BSDF，并在多样材质下进行效果测试，

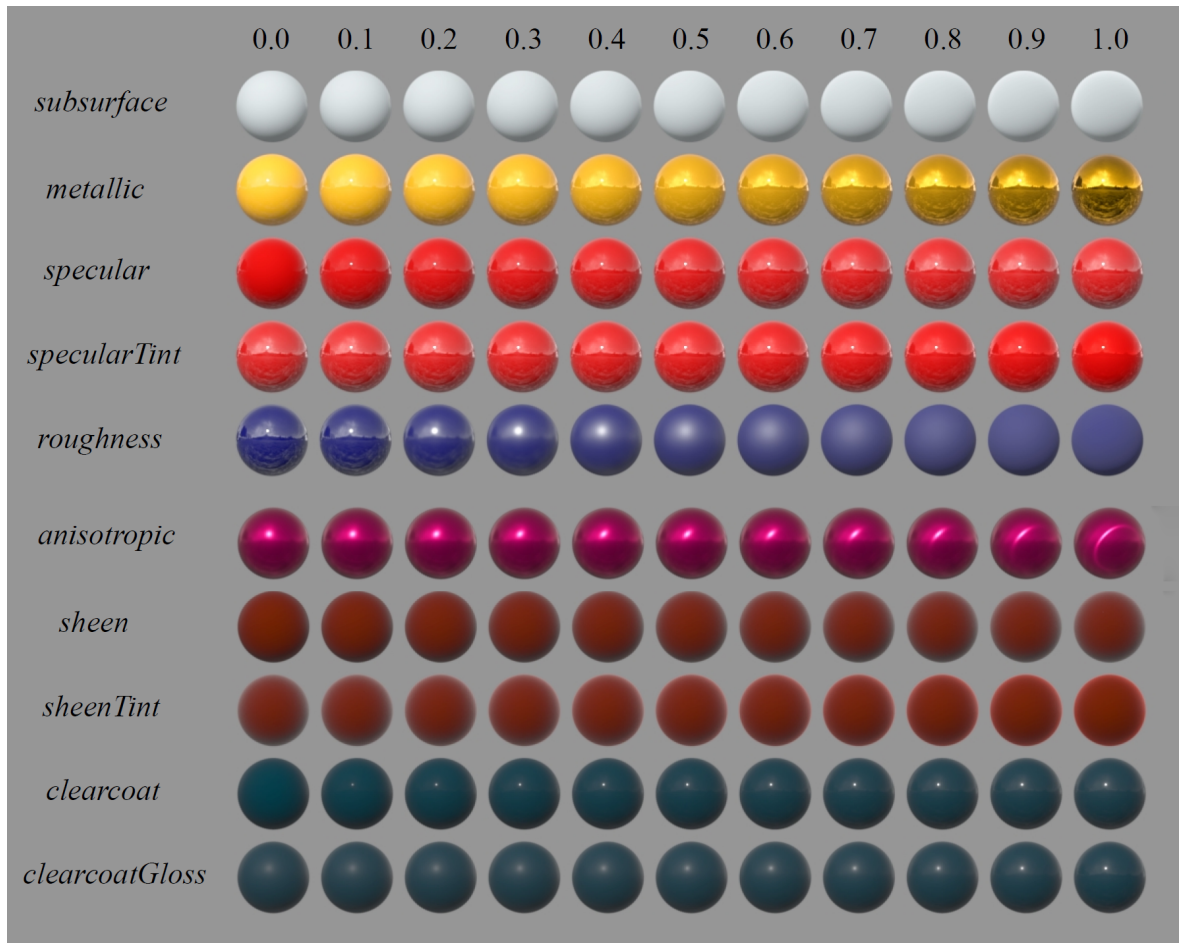


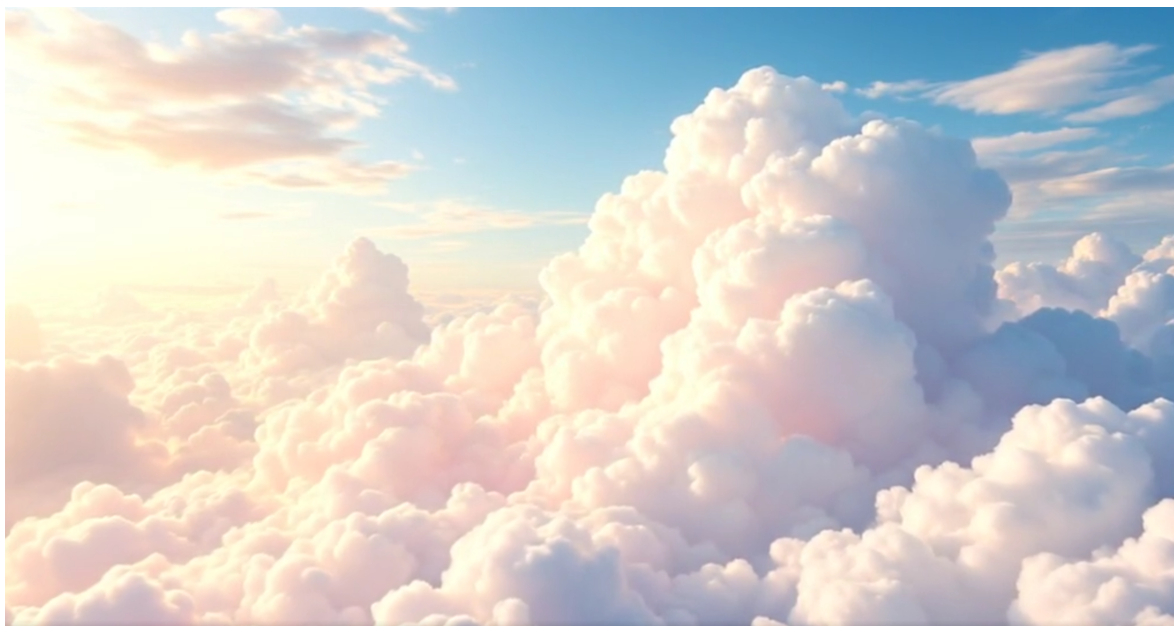
图 2: Disney Principled BSDF 参数示意图

你可以在实时渲染框架或离线渲染框架中进行实现，我们会根据你材质模型的完成度和效果评估你的得分。

3.2 参考资料

- Brent Burley, *Physically-Based Shading at Disney*, SIGGRAPH 2012. https://media.disneyanimation.com/uploads/production/publication_asset/48/asset/s2012_pbs_disney_brdf_notes_v3.pdf
- Brent Burley, *Extending the Disney BRDF to a BSDF with Integrated Subsurface Scattering*, SIGGRAPH 2015. https://blog.selfshadow.com/publications/s2015-shading-course/burley/s2015_pbs_disney_bsdf_notes.pdf

4. 高质量体积云渲染



4.1 体渲染原理

光在参与介质中进行，可能发生如下四种事件：

- 吸收 (absorption)：光能转化为介质内其它形式的能（如热能）。
- 外散射 (out-scattering)：光被介质中的粒子散射到其它方向。
- 自发光 (emission)：介质内其它形式的能（如热能）转化成光能。
- 内散射 (in-scattering)：来自任何方向的光子被介质粒子散射到当前光路的方向，并对最终 radiance 产生贡献。

其中前二者使 radiance 衰减，后二者使 radiance 增强。

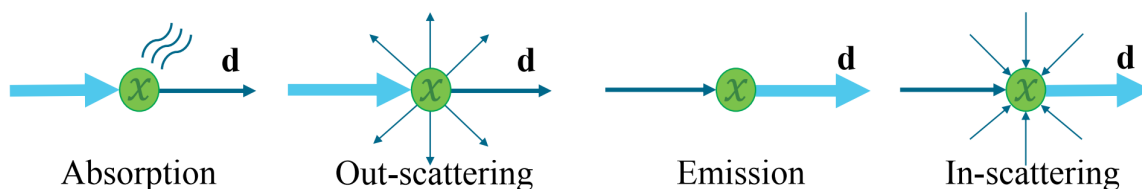


图 3: 四种散射现象

衰减部分，描述散射强度的系数 σ_s 以及描述吸收强度的系数 σ_a ，可以合并为消光系数 σ_t ， $\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a$ 。

增强部分，忽略自发光，内散射结果需要积分球面空间中的入射光，其结果与散射系数 σ_s 以及相位函数（phase function）有关。相位函数用于描述光线在介质中散射时，从入射方向到出射方向的概率分布。

则**辐射传输方程**（Radiative Transfer Equation, RTE）为：

$$\frac{L(x + s\omega, \omega)}{ds} = -\sigma_t L(x, \omega) + \sigma_s \int_{\Omega^2} f_p(x, \omega, \omega') L(x, \omega') d\omega'$$

其中， s 为光线在 ω 方向移动的距离。右式第一项为衰减部分，第二项为内散射部分， f_p 为相位函数。

为简洁起见，定义：

$$L_s(x, \omega) = \int_{\Omega^p} f_s(x, \omega, \omega') L(x, \omega') d\omega'$$

则 RTE 可写为：

$$\frac{L(x + s\omega, \omega)}{ds} = -\sigma_t L(x, \omega) + \sigma_s L_s(x, \omega)$$

RTE 为一阶微分方程，解该微分方程，可得**体渲染方程**（Volume Rendering Equation, VRE）：

$$L(x, \omega) = \int_{s'=0}^s \exp\left(-\int_{s'}^s \sigma_t(x_{s''}) ds''\right) [\sigma_s(x_{s'}) L_s(x_{s'})] ds' + L(0) \exp\left(-\int_{s'=0}^s \sigma_t(x_{s'}) ds'\right)$$

（详细推导过程见[此处](#)。）

此式具有直观的物理意义，右式第一项描述其他方向的光线在 s' 处发生内散射的结果，再经过 $s' \rightarrow s$ 的衰减过程。由于发生内散射的位置可以在 $0 \rightarrow s$ 路径上的任意点，因此外层存在 $0 \rightarrow s$ 的积分。右式第二项则描述了光线直接通过 $0 \rightarrow s$ 的路径衰减的结果。

值得注意的是，此处仅考虑了光线在介质中散射一次的结果，实际光线可能在参与介质中弹射多次，关于多重散射的更多资料请阅读参考文献。

4.2 离线 or 实时方案

本次大作业中，你可以选择离线和实时的方案中的任意一种。

在光追渲染器中实现通常需要你修改 integrator 的逻辑，我们会根据渲染结果质量以及实验报告对作业分数进行评估。

在光栅化渲染器中的实现通常需要进行 ray marching，你可能需要一些近似简化以保证在不同平台上的计算效率，你可以参考近年的 Siggraph Course 以及 GDC

分享进行优化（例如棋盘格，时序投影），我们会根据渲染质量以及性能进行综合评估，请务必附上性能测试数据。

4.3 推荐阅读及参考资料

- Julian Fong, et al, *Production Volume Rendering*, SIGGRAPH 2017 Course. <http://graphics.pixar.com/library/ProductionVolumeRendering/paper.pdf>
- Scratchapixel, *Volume Rendering*. <https://www.scratchapixel.com/lessons/3d-basic-rendering/volume-rendering-for-developers/volume-rendering-summary-equations.html>
- Hillaire, S´ebastien, *Physically Based Sky, Atmosphere and Cloud Rendering in Frostbite*, SIGGRAPH Physically Based Shading in Theory and Practice course, July 2016. <https://media.contentapi.ea.com/content/dam/ea.com/frostbite/files/s2016-pbs-frostbite-sky-clouds-new.pdf>
- Fabian Bauer, *Creating the Atmospheric World of Red Dead Redemption 2: A Complete and Integrated Solution*, SIGGRAPH 2019 Course. https://advances.realtimerendering.com/s2019/slides_public_release.pptx

5. 基于体素的实时全局光照



5.1 全局光照

直接光照：光源直接照射到表面的光照。

间接光照：场景中的每个物体均可作为次级光源，照亮其他表面，以模拟光线在场景中的多次弹射。

全局光照：直接光照 + 间接光照。

5.2 算法原理

VXGI (Voxel-based Global Illumination) 先将场景物体作为次级光源，注入到体素中，随后每个像素发出锥体，采样体素中的间接光照信息，得到屏幕空间间接光结果。

体素化：场景中物体的片元 (fragment) 经过 MVP 变换后，计算其落入的 voxel 位置，将其直接光照颜色及遮挡信息填入 voxel 内。由于一些三角面片从某些角度观察，可能无法生成片元，因此你可能需要根据三角形的法线调整相机朝向，以便为此类三角形生成片元。不论哪个角度观察三角形，其世界空间的位置是一定的。

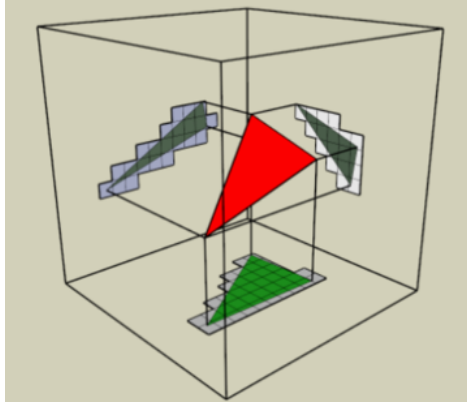


图 4: 体素化原理

锥体追踪: 和 ray marching 类似, 光线从着色点世界空间位置出发, 逐步步进并采样体素内的间接光照信息, 累计遮挡信息, 直至被完全遮挡, 或进行到最大距离。漫反射材质将发出多个锥体, 而光泽材质则可仅发出反射方向的锥体。

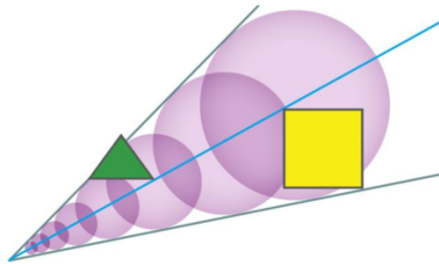


图 5: 锥体追踪

你可以通过 Geometry Shader 画出体素以辅助实现和调试, 可以通过循环寻址优化体素化性能, 更多基于体素的优化方案详见参考文献。

5.3 参考文献

- Nvidia, *Voxel Cone Tracing and Sparse Voxel Octree for Real-time Global Illumination*. <https://developer.download.nvidia.cn/GTC/PDF/GTC2012/PresentationPDF/SB134-Voxel-Cone-Tracing-Octree-Real-Time-Illumination.pdf>
- Nvidia, *Interactive Indirect Illumination Using Voxel Cone Tracing*. <https://research.nvidia.com/sites/default/files/publications/GIVoxels-pg2011-authors.pdf>
- Ayerbe, Alejandro Cosin et al, *Dynamic Voxel-Based Global Illumination*. Computer Graphics Forum 44 (2024).

6. 作业提交

6.1 分数说明

由于本次作业的几个选题存在难度差异，我们会根据难度对分数进行平衡。**难度参考：**

- Restir: 10.0
- Disney Principled BSDF: 7.5
- 体积云: 8.5
- VXGI: 9.0

需要注意的是，以上方案的实现难度不同，实现水平的上限也不同。我们会根据实际的**渲染结果质量、代码工作量、性能**（如果为实时方案）来综合评估作业分数。

如实现的算法需要自己实现底层框架的支持，我们也会依据工作量给予相应的加分。

为倡导学术诚信，并鼓励同学们将大作业作为求学和升职的个人作品，**开源大作业的源码将获得加分**。

6.2 提交内容

提交 pdf 格式实验报告，包括以下内容：

- 实验的各个步骤，遇到的问题和困难。
- 详细的代码实现思路。
- 对算法的理解（优点？缺点？改进空间？）。
- 实验结果图。
- 能证明你完成了实验的各种材料。
- 对实验的建议和吐槽。

需要提交额外动图和视频以证明效果的同学可以展示在开源仓库，或发送至助教邮箱。