

Lab-Final



图形绘制技术

An Exploration of Frontier Graphics Technology

镜头炫光/高效采样/微粒材质

Lab Final-前沿图形技术探索

2024 春季学期

1. 期末考核简介

本年度的图形绘制技术期末考核为指定主题的形式。在本文档中，将会介绍三个主题，建议依照给出的主题在 Moer-lite（或 Moer）中完成你自己的实现。

在每一个主题中，文档将会给出参考文献，建议你按照参考文献实现。然而，在实现近似效果的情况下，你也可以使用其他的实现或是在参考文献的基础上发明自己的实现。

期末考核由每个人独立完成而非组队完成。与先前的作业形式不同，在期末考核中，我们将不会给出详细的代码框架，也不会给出示例结果。你将要完全依赖自己。

对于某些较为困难的主题，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，你可以将三维空间和二维立体角做出启发式的均匀划分而非实现自适应 kd-tree）。

期末考核将会给出大概一个月的时间供你完成，并且有概率延期。课程将会在六月下旬进行线下核验，采用报名制，请希望展示自己的同学踊跃报名。

2. 镜头炫光 Lens Flare



图 1: Lens Flare 视觉效果

与渲染器中的相机不同，现实中的相机由多个镜片组成，镜片的数量可能多至数十个。使用这些镜片的目的是尽可能地让光线不经扭曲地到达相机的传感器。然而，由于相机镜片材质本身的特性，与渲染器中的完美相机相比，现实中的相机有着多种光学缺陷：

1. 畸变 (distortion)。在镜头的边缘处，光线至传感器的光路可能发生偏移，进而导致边缘处的物体被扭曲。这一效果可以在广角相机或鱼眼相机上得到体现；
2. 暗角 (vignetting)。在镜头的边缘处，由于镜片材质的透光率原因，radiance 被吸收或散射的比例更大，导致相机的边缘处物体会更暗；

3. 色彩像差 (chromatic aberration)。由于镜片材质的折射率原因，光谱上不同频率 (颜色) 的光线出射的方向有着微小的不一致，产生类似于三棱镜的效果，进而导致物体边缘出现彩色。这一效果在眼镜上也有体现；
4. 镜头炫光 (lens flare)。在内部的镜片之间会产生反射与折射，在相机正对着强烈的光源时，这些额外的反射与折射会产生镜头炫光。

由于光学缺陷有时候可以提供独特的视觉和感观效果，因此我们需要在渲染器中去模拟上述的光学缺陷。在实时渲染器 (如 Unity) 中，这些效果往往通过一个简单的后处理 pass 得到。但是，在离线渲染器中，由于可以计算光路，我们可以通过基于物理的方式去**无偏地**模拟这些效果。

在 <https://graphics.stanford.edu/wikis/cs348b-07/JulienChaumond/FinalProject> 中，作者给出了一份参考实现。他指定了一个镜头组，模拟光线在镜头内部的多次反射。你可以基于这一文献实现自己的 lens flare。

3. 高效采样 Practical Path Guiding

强烈建议同学们在 Moer 框架 (而非 Moer-lite) 中实现这一主题。如果你想要在 Moer-lite 中实现它，你需要自己实现完整的 (Unidirectional) Path Tracing 算法。

采样问题是光线追踪渲染里最困难的问题之一。在课程中简单介绍了重要性采样，本文档将会首先介绍这一点在光线追踪渲染里的重要性，之后介绍 Path Guiding 以及 Practical Path Guiding 的思想。

离线渲染的本质是在计算渲染方程：

$$L_o = \int f \cdot L_i \cdot |n \cdot \omega| d\omega. \quad (1)$$

其中 f 表示 BSDF/BRDF, L_i 为入射 radiance, L_o 为出射 radiance。这里使用渲染方程的简化形式，省略了部分表示。为了在计算机中计算这一积分的解，我们需要对其进行蒙特卡洛估计：

$$E \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{f \cdot L_i \cdot |n \cdot \omega_i|}{p(\omega_i)} \right] = \int f \cdot L_i \cdot |n \cdot \omega| d\omega. \quad (2)$$

其中 ω_i 从连续概率密度函数 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，并将估计结果取平均，以获取接近积分值的结果。

采样概率密度函数的形状越接近被积函数，则采样的效率越高，所需的采样次数越少。在最优的情况下，假设我们有正比于被积函数 $f \cdot L_i \cdot |n \cdot \omega|$ 的概率密度函数 p^* ：

$$p^*(\omega) = \frac{f \cdot L_i \cdot |n \cdot \omega|}{\int f \cdot L_i \cdot |n \cdot \omega| d\omega} \quad (3)$$

此时一次蒙特卡洛估计的结果为：

$$\frac{f \cdot L_i \cdot |n \cdot \omega|}{p^*(\omega)} = \int f \cdot L_i \cdot |n \cdot \omega| d\omega. \quad (4)$$

我们可以发现，仅仅经过一次采样，我们就可以得到积分值的结果。但是，这一最优 pdf 在实际实现中几乎不可能得到，原因在于 p^* 中已经包含了积分结果。这是一个“鸡生蛋，蛋生鸡”的问题：为了提高采样效率，我们需要算出积分；为了算出积分，我们需要提高采样效率。

一系列 Path Guiding 算法的目的是，根据先前采样得到的 radiance 信息，拟合出近似的最优采样分布 \hat{p} ，并且在 \hat{p} 上进行采样以提高渲染的效率，减少噪点。

Disney 在数年前的论文 **Practical Path Guiding for Efficient Light-Transport Simulation** 中提出了一种 Path Guiding 方法，其主要思路在于：

1. 使用空间和角度查询结构，对于任意一个交点，找到其近似的 radiance 分布；
2. 根据这一分布进行采样，并更新 radiance 分布。

其中工作量最大的部分在于查询结构的构建与更新。你需要实现论文中的方法以检验 Path Guiding 的效果。

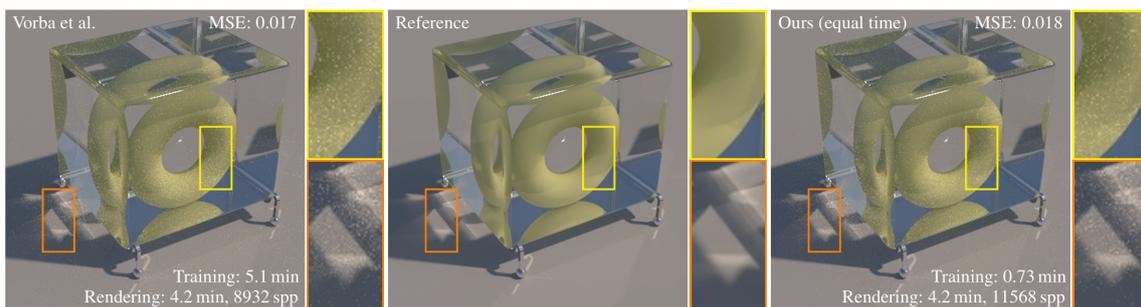


Figure 1: Our method allows efficient guiding of path-tracing algorithms as demonstrated in the TORUS scene. We compare equal-time (4.2 min) renderings of our method (right) to the current state-of-the-art [VKv*14, VK16] (left). Our algorithm automatically estimates how much training time is optimal, displays a rendering preview during training, and requires no parameter tuning. Despite being fully unidirectional, our method achieves similar MSE values compared to Vorba et al.’s method, which trains bidirectionally.

图 2: Practical Path Guiding

4. 微粒材质 Micrograin BSDF

材质系统是一个渲染系统的核心。从最基础的非物理材质 Phong 和 Blinn Phong 开始，自从 Microfacet 理论被提出，人们逐渐开始转向基于物理的材质。在实时渲染领域，PBR 往往指代 PBR 材质。Disney 在之后提出了 Principled BRDF 以及 BSDF，成为了许多行业里材质的标准模型。

然而，现实生活中有许多材质，单独使用 Microfacet 理论无法进行建模或难以渲染：

- 带有内部散射的材质，如皮肤和头发；
- 多层材质，如车漆，粗糙金属上覆盖了清漆；
- 表面带有凹凸不平高光区域的材质，如拉丝金属；
- 表面带有细小结构的材质，如物体表面的灰尘。

微粒材质用以建模上述的最后一种材质中的一部分。其核心思想在于，假设物体表面有着由半球或半椭球组成的微粒，这些微粒的材质与物体表面的材质可能相同也可能不同。由于与微粒的直接求交难以高效完成，我们需要通过一些基于蒙特卡洛的估计方法，以及一些基于微表面理论的近似方法将这些微粒对表面法线分布 (D)、几何项 (G) 做出特定的修改以达成特殊的视觉效果。文档中将会给出两篇近期的参考文献：

1. **A Micrograin BSDF Model for the Rendering of Porous Layers**
2. **A Fully-correlated Anisotropic Micrograin BSDF Model**

你可以从中任意选取一篇作为基础实现你的 Micrograin BSDF。

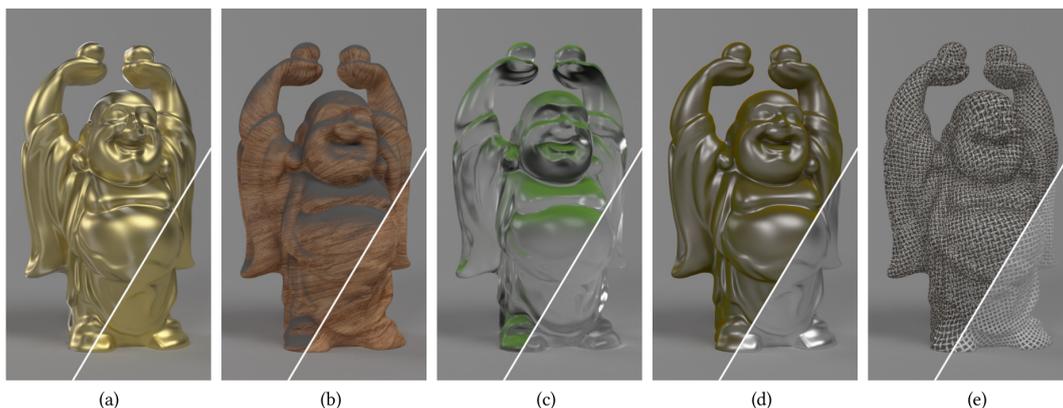


Fig. 1. Several instances of our material model rendered in Mitsuba [Jakob et al. 2022] (base surface materials shown in the bottom right corner): (a) Anisotropic aluminum micrograins on top of an isotropic rough gold conductor base; (b) Grey diffuse micrograins on top of a diffuse wood texture, conveying a dusty appearance; (c) Green diffuse+specular micrograins, mimicking bacterial deposit on top of a rough dielectric surface; (d) Height-correlated colored diffuse micrograins on a rough aluminium conductor base; (e) Gray diffuse micrograins located in small cavities of white plastic weaves to portray a dirty material.

图 3: Micrograin BSDF

5. 评分点

与先前的实验不同，期末考核的评分点分为以下几点：

- **技术性**。你需要尽可能完整地实现所需的效果；
- **艺术性**。一个可以展现实现效果的新的炫酷场景可以获得额外的加分；
- **文档**。与先前的实验不同，你需要在你的文档上付出一定的时间，一篇好文档是一篇好论文的基础。**文档需要使用学术化的语言，规范的章节形式，以及整洁的格式**。我们建议你在

文档中综合使用公式、伪代码或整齐的 C++ 代码，以及图表；

- **创新性**。如果你在介绍的方法上进行了任何的创新，你将会获得额外的**加分**；同时，我们会判断创新的学术价值，你的创新点将有概率成为一篇新的论文。

6. 提交与查验

暂定的提交截止日期为 **2024 年 6 月 30 日 23:59**。根据同学们的意见以及部分同学的考试周安排，这一时间可能会适当延后。

提交方式为**教学立方**。你需要提交一个压缩包，压缩包的名称应遵循以下格式：

姓名 + 学号 + 图形绘制技术期末考核

压缩包中应包含你的**文档，实现代码文件以及效果图原始图片文件**，无需包含全部代码而只需要包含你的主要实现代码文件。我们强烈建议同学们使用 LaTeX 完成此次实验的文档，你可以使用毕业论文的模板或其他模板，其中应包含完整的参考文献列表。

如果你想要展示你的实现效果，我们强烈建议你报名 **2024 年 6 月 30 日**在仙林校区计科楼进行的线下查验，具体的查验时间和地点待定。为了完成线下查验，你需要在上述压缩包的基础上额外完成一份便于在大屏幕上展示的文件，这一文件的形式可以为幻灯片，也可以为文档或 pdf。

7. 实验建议

三个主题的实现难度由低到高依次为：镜头炫光、微粒材质、高效采样。在挑选主题方面，我们建议你根据自身的兴趣、时间，以及以后的发展方向综合考虑。

本年度的期末考核不接受自由选题。如果你因为时间或自身安排原因难以按时完成期末考核，请与助教联系。

一个文档的结构范例为：

- **简介**，介绍选题的基本思路；
- **参考文献介绍**，对你的参考文献进行理解与阐释；
- **实现方法**，介绍你是如何在实验框架上实现这一部分功能的；
- **实验效果**，展示功能的视觉效果；
- **总结与展望**，在你的理解下，方法还可以做何改进。

上述结构仅仅是为示例，你可以在此基础上加入额外的章节或取消掉某些章节。