

图形学渲染大作业：路径追踪

指导教师：胡事民 助教：陈拓、冯启源

2025 年 4 月 15 日

1 实验综述

1.1 实验介绍

本次大作业要求同学们完成一个支持 NEE (Next Event Estimation) 的路径追踪引擎。本次实验共 45 分。

大作业的基础要求为：先实现 Whitted-Style 光线追踪，再实现支持 NEE 的路径追踪。完成基础要求的第一项，即 Whitted-Style 光线追踪，至少 25 分；按照实验文档要求完成全部基础要求（包含对比），至少 30 分。

请同学们按照大作业推荐实现步骤完成大作业，以得到实验报告中要求的 Whitted-Style 渲染图，并基于 PA1 框架完成大作业，否则加分项将不给分。想要采用 D3D12/Vulkan 框架或者想要自己写一个新的框架完成大作业的同学请联系助教。

1.2 基础要求

(1) Whitted-Style 光线追踪：

- 材质：折射
- 材质：反射
- Shadow Ray：阴影

(2) 路径追踪：

- 无穷递归：支持面光源；终止策略使用 Russian Roulette
- 基于物理的渲染 (Physically-Based Rendering, PBR)：使用蒙特卡洛积分计算 Radiance；支持漫反射、理想折射、理想反射材质；支持 glossy BRDF (如 Cook-Torrance BRDF)
- NEE (Next Event Estimation)：对光源采样

(3) 需要实现的对比项（对比项不需要考虑构图加分）：

- Whitted-Style 光追与路径追踪的对比分析，详细要求见3.3
- 未实现 NEE 的路径追踪与实现 NEE 的路径追踪的对比分析，详细要求见4.1

1.3 加分项

请基于 PA1 框架完成大作业，并按照实验文档给出 Whitted-Style 渲染图以及路径追踪渲染图的对比（建议使用一个变量控制使用何种算法选型），否则加分项不得分。

推荐大家先实现完基础要求，再实现加分项。对于每个加分项，请务必在相同场景下渲染至少两张图，一张是未采用该加分项进行渲染的，一张是采用该加分项进行渲染的。如果与效率相关，可以测量渲染时间或 SPP (samples per pixel) 等进行对比。各个加分项的给分权重如下：

【高】

- 复杂光线追踪方案：双向光线跟踪算法 (BDPT)、ReSTIR DI、ReSTIR GI、DDGI 变体或者Lumen的surface cache等（光子映射类算法不得分）
- 复杂采样策略：Path Guiding
- 蒙特卡洛体渲染：次表面散射等
- 风格化渲染：复现论文得全部加分；使用描边和色调量化等等后处理手段得部分加分
- Nanite: 一些笔记
- 更快的软件光线追踪求交方案：Lumen的SDF Tracing, 可以参考Embree的实现

【中】

- 参数曲面解析法求交：参见第三讲习题课
- 复杂网格模型及其求交加速（包围盒和层次结构）：参见课程第五讲
- Levels of Detail (LoD)
- 三角网格的位移贴图
- 色散
- 超分辨率
- 基于 CUDA 的 GPU 并行加速

【低】

- 其他采样方法：cos-weighted 采样，BRDF 采样，MIS等
- 景深，运动模糊
- 抗锯齿（SSAA 不得分）
- 三角网格的纹理贴图/法线贴图：需要支持 obj 文件中的 vt。两者皆实现会比实现其一的加分略高。仅实现球体的贴图只获得部分加分。
- 法向插值
- 伽马校正
- 基础要求文档中提到的加分项，请按照文档要求实现

- 基于 OpenMP 的 CPU 并行加速

此外还有构图分数等主观分数。上面没有列出的额外效果只要实现并写明原理也会加分。如果实现了某种效果（例如：景深、色散、贴图 etc），请在最终提交的图片中体现。

2 作业要求

2.1 线下验收

选择光线追踪大作业的同学需要在 DDL 之前在预约表格中预约时间进行当面线下验收，否则会极大影响最终成绩。可以线下验收的具体日期会另行通知，一般为大作业 DDL 之前 2-3 天。通过线下验收的功能在实验报告中将不需要详细书写原理，而没有通过线下验收而在最终提交中新增的功能需要详细描述原理、逻辑等等，实现错误将不给分。

2.2 提交方式

请同学们在网络学堂中提交大作业，提交的压缩包中应包括：

1. 大作业报告，命名为 REPORT.pdf。应包含“实现功能”，“原理”，“代码逻辑”，“参考代码”（参考了哪些第三方代码的说明），“结果”（你的渲染图，以及每张图中体现了哪些功能）。
2. 代码文件夹，命名为 code。
3. 渲染结果图文件夹，命名为 results。渲染图除了嵌入报告外，还应另外将原图放在 results 文件夹中一起上传。

除了最终结果渲染图之外，实验文档中将会要求同学们渲染一些对应要求的渲染图，请同学们注意一并放入报告和 result 文件夹。

2.3 查重

在真实感渲染的大作业中，同学们需要在源代码中明确标注自己的原创部分。我们将代码的原创性分为三类：完全拷贝、参考已有代码和独立实现。请同学们在代码中清楚标注每一段代码的原创类别。如果整个文件都是同一种原创性，只需在文件开头注释说明即可；否则，需要对每一段代码单独标注。对于参考已有代码和独立实现的部分，需要注明参考的具体来源。如果是课程中讲解的内容，可以标注为“课程内容”。

关于评分规则，如果你正确标注了代码的原创性，评分如下：完全拷贝的代码段实现的功能点不计入分数，完全独立实现的代码段将正常得分，参考已有代码的部分一般也会正常得分。

未正确标注原创性的代码将会被扣分。标注不全将轻微扣分，标注错误（如将完全拷贝的代码标为独立实现）将严重扣分。当然如果你将自己实现的代码错误标注为完全拷贝，助教大概率不会介入。

今年的真实感渲染大作业的查重范围包括本届同学和往届部分作业。

3 基础要求 1: Whitted-Style 光线追踪

Turner Whitted 于 1980 年首次提出一个包含光反射和折射效果的模型：Whitted 模型，并第一次给出光线追踪算法的范例 (Whitted-Style Ray Tracing)，是计算机图形学历史上的里程碑。

在 PA1 中，我们实现了光线投射算法。它体现了光追中逆向跟踪每个像素的思路，然而仅仅考虑光线的第一次弹射，并不支持折射、反射效果。此外，我们的 PA1 中也同样不考虑阴影。

在我们最终实现的路径追踪引擎中，要求实现折射、反射与阴影——因此，我们把这部分可以复用的代码放入第一部分基础要求，即 Whitted-Style 光线追踪。

现在，让我们跟随 Whitted 的脚步，逐步实现 Whitted-Style 光线追踪。

3.1 材质：反射与折射

光线的反射与折射定律见第四讲课件。注意，大作业的基础要求中，为了方便验证实现正确性，完美折射材质界面上仅发生折射或全反射，即不考虑部分反射行为，也即不考虑菲涅尔系数（当然，这是不符合物理现实的）。PA1 中，我们对漫反射材质采用 Phong 着色。与之对应地，完美反射与折射材质则是在着色时计算出反射或折射时的光线方向，递归地计算求交，并对递归的返回值乘上一个衰减系数。递归当且仅当光线击中漫反射表面或 miss 时终止。

3.2 阴影：Shadow Ray

PA1 中，对漫反射表面进行着色时，我们未曾考虑阴影，即漫反射点与光源之间的遮挡关系。因此，此处需要实现 Shadow Ray，这是一条从漫反射点向着光源方向发出的光线，我们关心的是：Shadow Ray 是否被其他物体遮挡？如果被遮挡，意味着光源对该点的直接光照贡献为 0，即，在 Phong 着色中与光源相关的项的贡献为 0。

3.3 实现效果与要求

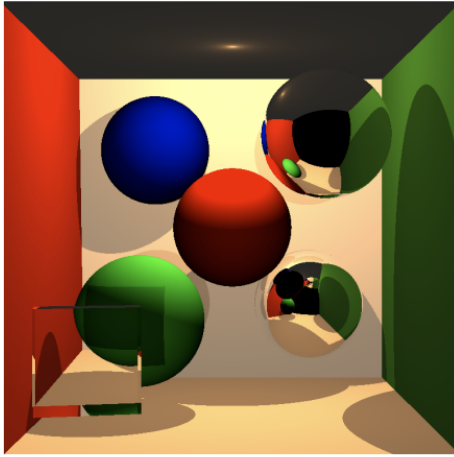
基础要求 1 的给分将考察同学们是否实现了完美反射与折射材质，阴影，以及效果对比（详见下文）。

Whitted-Style 光线追踪仍然采用 Phong 着色而非基于渲染方程的着色，因此并不涉及到采样。在下一部分路径追踪中，我们将会使用蒙特卡洛采样解渲染方程积分——这会带来估计方差，在渲染中体现为噪点。在图1中可以看出，Whitted-Style 光线追踪并不会产生噪点。

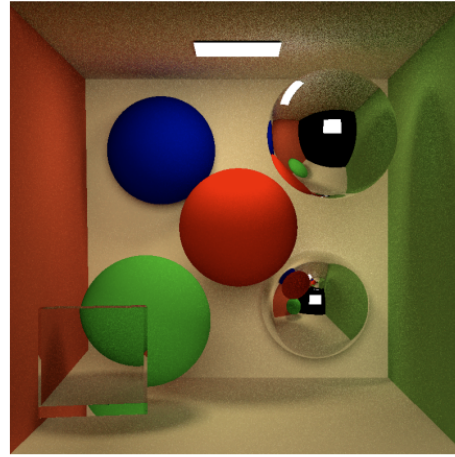
【注意】请大家自己设计场景，对于同一个场景（光源放在同一个位置即可），分别使用 Whitted-Style 光线追踪和路径追踪，即基础要求 1 与基础要求 2 实现的最终算法，各渲染一张图片，进行效果对比，并分析：两张图片不同之处有哪些，导致渲染效果不同的原因是什么，并写入实验报告。

4 基础要求 2: 路径追踪

路径追踪，也称为蒙特卡洛光线追踪。相对于之前使用的 Phong 着色，路径追踪采用更贴近物理的方式来计算物体的颜色。在课程第三讲中，我们学习了辐射度量学以及渲染方程：



(a) Whitted-Style 光线追踪，包含折射、反射和阴影



(b) BRDF 着色，NEE，128SPP，设置了两个面光源

图 1: 噪点对比 (by 陈煜翔, 2024)

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

而路径追踪就是使用蒙特卡洛法估计渲染方程中的半球积分的方法：

$$\int_{\Omega} L_i(p, \omega_i) f_r(p, \omega_i, \omega_o) (n \cdot \omega_i) d\omega_i \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{L_i(p, \omega_i) f_r(p, \omega_i, \omega_o) (n \cdot \omega_i)}{pdf(\omega_i)} \quad (1)$$

更详细的介绍，例如如何把上述估计对应到光线追踪采样的实现，请参见第二讲习题课。这里的 L 即为 radiance，描述一根光线的能量。对于某个像素，我们对这个像素进行着色，正是依据相机从这个像素的方向接收到的光线 radiance 而完成的。

4.1 无穷递归

Whitted-Style 光线追踪的 Phong 着色并不符合物理现实——即使对于漫反射表面，光线也应该继续弹射。因此，我们首先就需要修改对于漫反射表面的 radiance 计算，让它使用蒙特卡洛法来估计积分。注意，完美折射和反射表面并不需要进行很多修改，同样只需要返回对应方向的 radiance 再乘上一个衰减系数即可。这是因为它们的 BRDF 实际上是由冲激函数描述的。

对于光源，我们定义其发光强度 (Intensity)，即单位立体角的光通量。我们考虑光源向着各个方向发出的光强相等，那么此时出射 radiance 在半球方向上均匀，它会与 Intensity 有一个常数系数上的差别。由于光源的发光强度是我们自己在场景文件中设定的，因此这里我们不再展开说明这个系数如何计算。

关于无穷递归、俄罗斯轮盘赌终止策略、相关伪代码，请参照第二讲习题课。请记得实现面光源（只有击中光源时，光线才会被上色）。

【注意】 实现完无穷递归和面光源之后，大家就可以对一个简单场景跑一下路径追踪了。之后实现完 NEE 之后，会要求大家在同一个场景下再跑一张 NEE 的渲染图进行对比，例如图2。NEE 将会相对无 NEE 的方法有显著的收敛速度提升；但注意，它们对于同一个像素解的是同一个渲染方程，因此蒙特卡洛估计量的期望应当是一样的（也即，两张图片应该没有明显的色差）。同样地，请大家对渲染图的结果进行分析：为什么使用 NEE 会有收敛速度的明显提升？

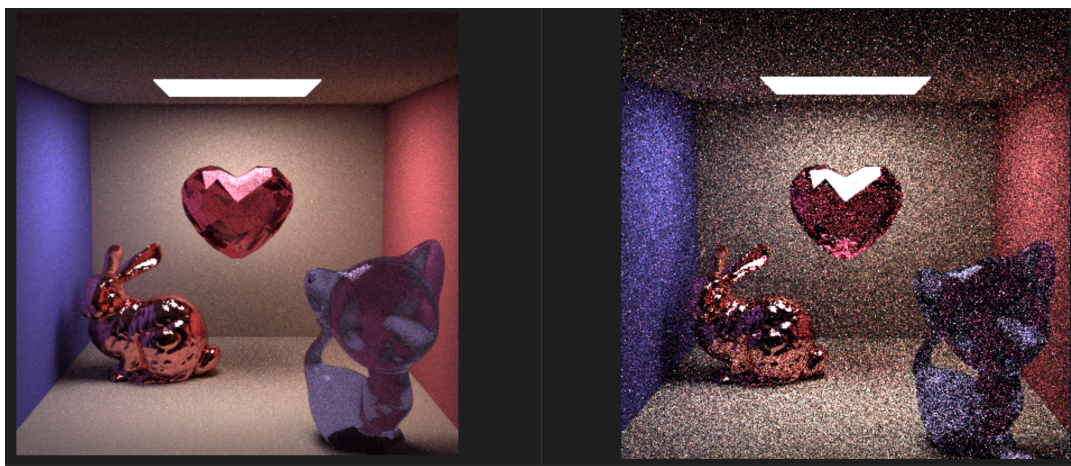
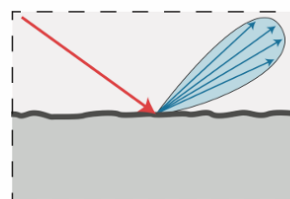


图 2: 100SPP 对比 (左: NEE; 右: w/o NEE) (by polynomial matrix, 2024)

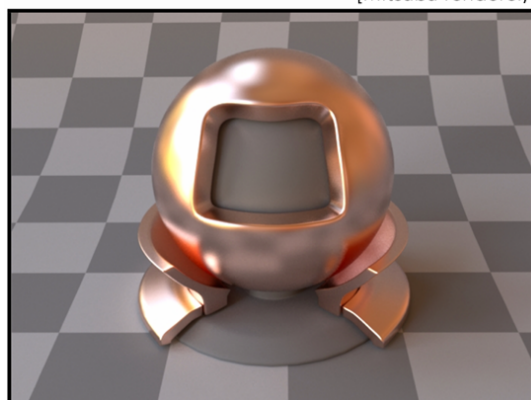
4.2 glossy BRDF

我们已经实现了漫反射、完美镜面、完美折射材质的 BRDF。接着，我们需要实现一种新的材质，即光滑面材质的 glossy BRDF。一般地，我们可以想象金属、塑料、釉等等材质，它们不完全是镜面反射材质，但也不是漫反射材质，如图3。对于各向同性材质，例如，可以实现 Cook-Torrance BRDF，来实现 glossy 表面。具体请参见课程第三讲 PPT。

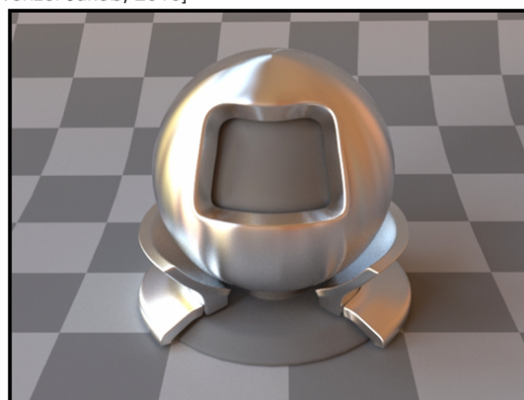
Glossy material (BRDF)



[Mitsuba renderer, Wenzel Jakob, 2010]



Copper



Aluminum

图 3: glossy 材质示意图

【加分项】请先实现完基础要求再回来实现加分项！实际上，在折射材质界面上，如果不是全反射，那么光线在折射的同时，还会有部分反射行为，光线发生反射的比例，即反射率，可以使用菲涅尔系数的 Schlick 近似来计算： $F_r(\theta_i) = R_0 + (1 - R_0)(1 - \cos \theta_i)^5$ 。请实现菲涅尔系数，控制光线在折射界面上的反射行为。为验证正确性，请渲染出：(1) 同一个场景，使用菲涅尔系数前后的对比图；(2) 对于一个有水和玻璃两种材质球的场景，渲染图片，并对

比两种材质的不同，并说明哪种材质内部会发生全反射，这会在渲染图中有什么不同的表现；(3) 自行设计对比实验，展示在入射角 θ_i 接近 0° 时，反射率会上升到较大的数值。

【加分项】请先实现完基础要求再回来实现加分项！ Cook-Torrance BRDF 仅能处理各向同性 BRDF。请实现一种支持各向异性的 BRDF，例如 PPT 中提到的，各向异性 Ward 模型。除此之外，还有 GGX、GTR1 等等。本加分项的要求为：(1) 对于你实现的 Glossy 材质，在同一个场景下，进行参数上的调整，渲染对应的图片并且回答：什么参数下该材质的行为更偏向漫反射材质，什么参数下该材质的行为更偏向反射材质？(2) 实现一种各向异性材质，渲染一张图片，并且设计实验，说明该材质是各向异性的（回忆：各向同性材质和各向异性材质的区别）。

4.3 NEE (Next Event Estimation)

路径追踪应用 RR 之后虽然能够终止，然而很难命中光源。这时，我们就需要使用 NEE 来对光源进行采样。具体方法参见第二讲习题课。实现完之后，请按照 4.1 中的要求完成实现 NEE 前后的对比分析。

【加分项】 多重重要性采样。参见第二讲习题课。请自行设计对比实验，展示实现 MIS 前后的差异对比，并进行分析。

5 部分加分项简述

加分项文档征集中！ 如果有同学实现了本章未涉及到的加分项，或者有加分项可以参考的资源，欢迎投稿至 ct23@mails.tsinghua.edu.cn，你的努力将为之后选课的同学提供宝贵的帮助！

对于大部分加分项，在 1.3 中已经提供了对应的学习资料。下面选取一些加分项进行介绍：

5.1 风格化渲染

这篇论文把风格化渲染结合到了光线追踪框架里面去。如果复现这篇论文，将得到高权重的加分。

另一方面，一般地，工业界中的风格化渲染更多是在后处理方面下功夫，例如描边和色调量化。实现这种风格化渲染将得到中权重的加分。**注意，使用神经网络对已经渲染完成的图片进行风格化后处理并不是本加分项的目的，在实时渲染中也难以应用，因此这种手段不作加分。**

5.2 Levels of Detail (LoD)

LoD 是现代渲染引擎广泛使用的一项技术。在实时渲染时，为了减少性能开销，往往会将物体划分细节层次，决定分配计算资源的多少：离相机越远的物体，应该分配越少的资源——一般地，采用更简化的网格模型。

因此 LoD 最广泛的实现就是基于网格简化 (mesh simplification) 的，具体实现方案请参见课程第八讲 PPT。

要实现 LoD，首先要实现对应的网格简化算法，在进入渲染循环之前的初始化阶段，加载物体时，先判断是否生成了 LoD 网格：如果未生成，就进行网格简化并且生成简化后的网

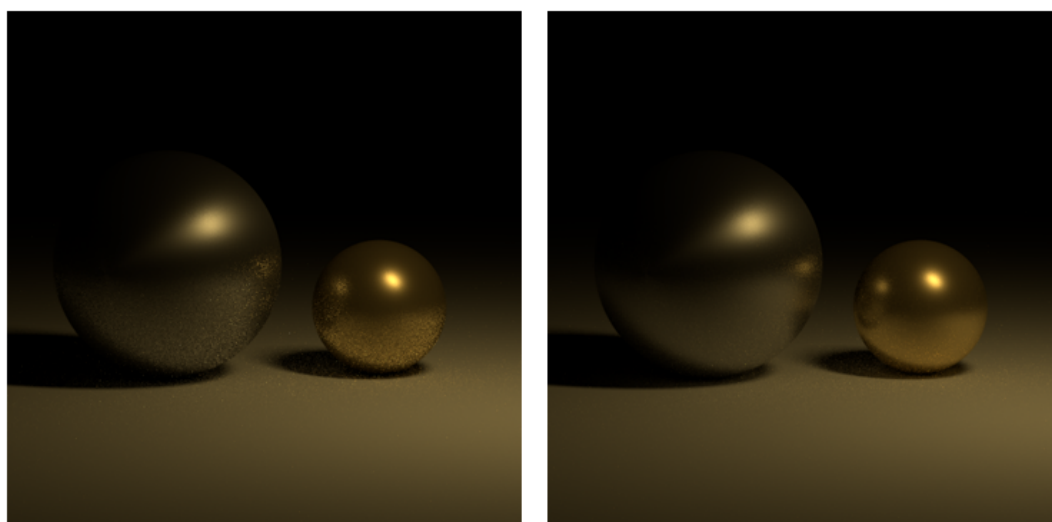
格文件；如果已生成，就读取所有细节层次对应的网格文件。然后，在进入渲染主循环之后，根据物体离相机的远近或其他标准来选用不同的网格模型用于渲染。

5.3 其他采样方法

此前，我们采用的是均匀球面采样。采样分布的形状越接近渲染方程中被积函数的形状，估计量的方差越小。渲染方程中的被积函数可以分为三个因式：入射 radiance、着色点 BRDF、入射光线与法线夹角的 \cos 值。

直接了解到被积函数的形状是困难的。因此，我们退而求其次，分别考察上述三个因式，以期让我们的采样分布接近其中一个因式，这也就对应了若干种采样方法：Path Guiding、BRDF Sampling、 \cos -weighted sampling。而这些采样方法就是使用多重重要性采样（MIS, Multiple Importance Sampling）结合的。MIS 具体介绍见第二讲习题课。

BRDF 采样对于 glossy 材质有很好的效果，如图4。



(i) 不使用采样器,64spp

(j) 按照brdf采样,64spp

图 4: BRDF 采样前后对比图 (by 濮成风, 2024)

5.4 三角网格贴图

贴图分为位移贴图、纹理贴图、法线贴图等等。凹凸贴图本质上也是一种法线贴图，因此这里不作为额外要求。

本质上，贴图是【2D 贴图坐标->3D 物体点坐标->物理量】的映射。例如，纹理贴图中，这个物理量就是 albedo；法线贴图中，这个物理量就是 normal；位移贴图中，这个物理量是点的三维位移。位移贴图的难点在于，它会对物体表面的点做出实际上的改变（也因此会影响到求交加速结构的生成）。

注意，三角网格贴图加分项要求支持 obj 文件中的 vt。也就是说，如果仅仅实现了球体的贴图，只能够获得部分加分。

5.5 伽马校正

这是一种通过非线性调整亮度以匹配人眼感知特性和显示设备响应的图像处理技术。还记得吗？我们计算出的实际上是像素对应方向接收到的 radiance 值，而并非是人眼感知到的颜色值；而人眼对亮度的感知和物理功率不成正比，而是幂函数的关系。因此就需要进行伽马校正。请对比实现伽马校正前后的渲染图。

6 框架代码说明

6.1 环境配置与编译

与 PA1 相同。环境要求：

- Windows: WSL 下安装 CMake
- Linux: CMake
- MacOS: CMake

如果你使用其他系统的时候遇到了编译问题，请先尝试自行解决。我们的框架代码没有任何外部依赖，请在包含有 `run_all.sh` 的文件夹下打开终端，并执行：

```
1 bash ./run_all.sh
```

调试方法可参照 PA0 的 README.pdf。

7 测试用例

大家可以自己编写测试用例，用于在最终渲染图中呈现出更好的渲染效果。场景构图分是主观加分项。

框架仅仅支持 OBJ 格式的模型文件，同学们如果想要使用其他格式的模型文件，可以用 Blender 等工具转换为 OBJ 再进行渲染。以下为同学们提供一些可以找到网格模型的网站（同样，欢迎同学们投稿有用的网站）：

- 一些 OBJ 格式的模型：<https://casual-effects.com/data/>
- GLTF 格式的模型：<https://github.com/KhronosGroup/glTF-Sample-Models/tree/main/2.0>
- 模之屋里面有米哈游各个游戏（原神等等）开源的 PMX 格式三维模型。如果用 Blender 转换为 OBJ，需要安装对应插件。

8 致谢

由于教学需要，请同学们尽量不要将本文档或框架代码随意传播，感谢同学们的支持。