图形学实验 1：光线投射

指导教师：胡事民 助教：方晓楠

2020 年 2 月 27 日

1 实验综述

本实验要求实现课上所讲的光线投射（Ray Casting）算法，你将实现一个简单的渲染引擎，支持包括球、平面和三角面片等多种基本几何体的绘制，并为他们加入基本的 Phong 材质。

本次作业将是本课程大作业的基础，请大家充分重视，尽早开始。

我们为大家准备了一些基本的框架代码，同学们可以自由选择是否使用。在本课程的大作业中，你可以基于这套框架代码完成完整的光线追踪算法。

我们将主要在 7 个测例上评测你的代码。

2 细节说明

2.1 算法框架

光线投射的基本框架我们在第 2 周的课程上进行了介绍，其基本思想是：把屏幕想象成相机的成像平面，每个像素发射一条射线和场景中的物体求交并找到最近交点，之后计算该点处由光源照射影响产生的局部光强即可。

本次实验中我们不要求实现阴影。代码如下：

```
// 循环屏幕空间的像素
for (int x = 0; x < camera->getWidth(); ++x) {
    for (int y = 0; y < camera->getHeight(); ++y) {
        // 计算当前像素(x,y)处相机出射光线camRay
        Ray camRay = sceneParser.getCamera()->generateRay(Vector2f(x, y));
        Group* baseGroup = sceneParser.getGroup();
        Hit hit;
        // 判断camRay是否和场景有交点，并返回最近交点的数据，存储在hit中
        bool isIntersect = baseGroup->intersect(camRay, hit, 0);
        if (isIntersect) {
            Vector3f finalColor = Vector3f::ZERO;
            // 找到交点之后，累加来自所有光源的光强影响
            for (int li = 0; li < sceneParser.getNumLights(); ++li) {
                Light* light = sceneParser.getLight(li);
                Vector3f L, lightColor;
                // 获得光照强度
                light->getIllumination(camRay.pointAtParameter(hit.getT()), L, lightColor);
                // 计算局部光强
                finalColor += hit.getMaterial()->Shade(camRay, hit, L, lightColor);
            }
            setPixel(x, y, finalColor);
        } else {
            // 不存在交点，返回背景色
            setPixel(x, y, sceneParser.getBackgroundColor());
        }
    }
}
```

2.2 几何求交

从相机发出的射线需要和场景进行求交，一条射线R由发射点O_R和出射方向$\overrightarrow{d_R}$组成的二元组定义。

我们采用解析的方法求解光线和球体以及平面的交点，和三角形求交的时候先求和三角形所在平面的交点，再判断交点是否在三角形内部（即重心坐标均落在$[0,1]$内）。

2.3 透视相机模型

透视相机（也称小孔相机：Pinhole Camera）依据的是小孔成像原理，这种模型渲染出的图片和真实世界拍摄的图片非常相似。

描述一个相机自身的参数也成为相机的内参（Intrinsics），最常用的透视相机表示方式含有 6 个参数(w,h,f_x,f_y,c_x,c_y)，其中w,h是所拍照片的宽度和高度，c_x,c_y是光心位置，f_x,f_y是图像空间到真实世界空间的尺度参数。

假设我们需要计算像素(u,v)处的射线，我们首先计算相机空间下（即以相机为原点的坐标系）的射线R_c：

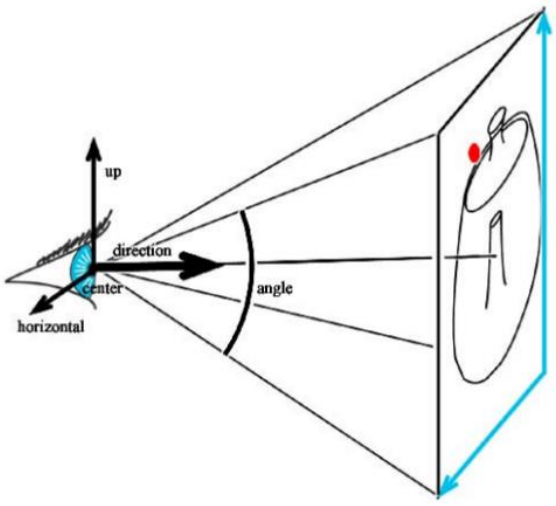
$$O_{R_c}=(0,0,0)^T,\overrightarrow{d_{R_c}}=normalized\left(\frac{u-c_x}{f_x},\frac{v-c_y}{f_y},1\right)^T,$$

接着，通过坐标转换，将相机空间下的射线R_c转换到世界空间下的射线R_w，便于和场景计算交点：

$$O_{R_w}=\boldsymbol{t},\overrightarrow{d_{R_w}}=\boldsymbol{R}\overrightarrow{d_{R_c}},$$

其中$\boldsymbol{R}\in \mathrm{R}^{3\times3}$是相机的旋转矩阵，$\boldsymbol{t}\in \mathrm{R}^3$是相机的位移，（即相机中心点在世界坐标系下的位置），这两个参数确定了相机的位姿（Pose），有时也被称作相机的外参（Extrinsics）。

旋转矩阵的 3 列可以看作$\mathrm{R}^{3\times3}$的一组基，给定了相机的三个正交的主方向单位向量$\overrightarrow{up},\overrightarrow{horizontal},\overrightarrow{direction}$（如下图所示），则$\boldsymbol{R}=[\overrightarrow{horizontal},-\overrightarrow{up},\overrightarrow{direction}]$。成像区域沿$\overrightarrow{up}$和$\overrightarrow{horizontal}$方向的最大张角记为$angle$，本次实验中我们约定这两个方向张角相同。



如果想详细地学习这种小孔相机模型，我们推荐 Scratchapixel 网站作为参考，上面包含了相机成像原理的详细解释和更多的示例代码：https://www.scratchapixel.com/lessons/3d-basic-rendering/3d-viewing-pinhole-camera/how-pinhole-camera-works-part-1

2.4 Phong 模型着色

使用 Phong 模型计算局部光强，每个像素最终的着色公式为：

$$I_{pixel} = c_a k_a + \sum_x c_x \left(k_d \mathrm{ReLU}\left(\overrightarrow{L_x} \cdot \vec{N}\right) + k_s \mathrm{ReLU}\left(\vec{V} \cdot \overrightarrow{R_x}\right)^s \right),$$

其中$\mathrm{ReLU}(x) = \max(0, x)$。本次作业的所有例子都不包含环境光项（即$c_a = 0, k_a = 0$）。$c_x$是第$x$个光源的颜色。$\vec{N}$代表相机射线$R_w$和物体相交处$P$的法向，$\overrightarrow{L_x}$代表从相交处$P$指向第$x$个光源的单位向量，$\vec{V} = -\overrightarrow{d_{R_w}}$，$\overrightarrow{R_x}$代表光源发出的光在物体表面$P$处的反射光线方向，其计算公式为：

$$\overrightarrow{R_x} = 2\left(\overrightarrow{L_x} \cdot \vec{N}\right)\vec{N} - \overrightarrow{L_x}$$

注意上述所有向量均为单位向量，k_a, k_d, k_s是物体的材质属性（环境光系数、漫反射系数、镜面反射系数），k_d可以设置为物体本身的固有颜色，而k_s是镜面反射的高光颜色，通常是白色，s是光泽度。

3 框架代码说明

3.1 环境配置与编译

我们推荐使用带有 CMake 套件的 Ubuntu 系统进行编程，如果你在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：

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

这段脚本会自动设置编译，并在 7 个测例上运行你的程序。你的程序最终会被编译到 bin/文件夹中，而输出的渲染图片位置在 output/文件夹中。

我们在框架代码中去除了一些光线投射的重要逻辑，因此现在这段代码仅仅是能编译而已，你需要按照课上讲的算法自行进行实现。

3.2 推荐实现步骤

因为本次作业代码量比较大，同学们可以按照本节推荐步骤进行一步步的代码实现。

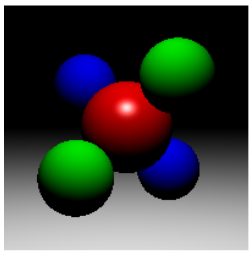
- 首先熟悉代码框架，vecmath 库以及 Image 类分别规定了向量运算，图像的访存。从代码风格上来看，大多数实现都直接写在了头文件里，你可以选择性地重构代码。
- 看 Object3D 类，是一个虚基类，提供了 intersect 方法，代表了三维世界中的物体，你自己的物体（例如球、平面）需要继承它并实现虚方法。
- 实现 Sphere 类的 intersect 方法，一个球体由中心和半径来定义。求交的时候注意两个量，第一个是 Hit 结构中的t，另一个是$tmin$，前者存储了之前的相交测试中最小的t，如果此次相交算出的t比上次的大，则说明本次相交并不是离相机最近的，应该舍弃，否则应该相应地更新t。$tmin$是一个常量，定义了最小可能的t值，如果$t < tmin$，本次相交也应该舍弃。此外，你也需要将计算好的相交处法向$\vec{N}$传入 Hit。
- 相类似地，你需要实现 Plane 和 Triangle 类的 intersect 方法。类 Mesh 的相交方法遍历了所有存储的三角形依次求交，最终形成一个完整的模型渲染，已经实现好了。
- 实现 Group 类，该类存储了 Object3D 的一个列表，推荐用 STL 容器实现，其中的 intersect 方法需要对列表中所有 object 求交并求出最近的一个交点。

- 实现 PerspectiveCamera 类的构造函数和 generateRay 方法。具体的相机模型可以参考 2.3 节。
- 看 SceneParse 类，作用是读入配置文件，已经为你实现好了。
- 实现 main.cpp 中的主逻辑，我们在 2.1 节中给出的伪代码基本上可以直接拷贝过来使用，但你首先需要构造一个 SceneParse 类来从命令行读入配置文件，具体命令行输入请参考框架代码。
- 实现 Material 类的 Shade 方法，该方法已经将计算 Phong 模型光照（2.4 节）所需的变量都传进来了，因此你只需要把公式输入进去即可。

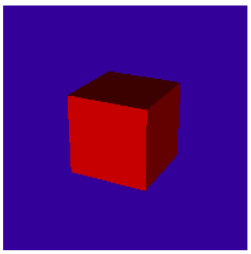
所有需要填写的地方都被标记了 TODO，每实现完成一个功能，你就可以去掉一个 TODO。由于我们的大作业光线追踪的基础就是光线投射，因此我们也鼓励你通读所有的代码，了解程序的整体运行机制。

4 测试用例

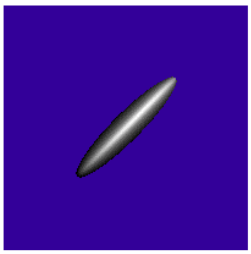
为了测试代码是否正确无误，我们构建了以下 7 个测试用例，你也可以根据场景的文件格式构造样例进行自我测试。但我们在检查作业的时候将主要检查这 7 个样例的输出结果。



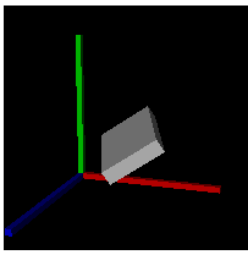
五个球体



正方体



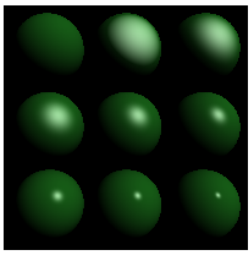
变形球体



坐标系

简单兔子

复杂兔子



镜面反射

五个球体（testcases/scene01_basic.txt）：包含了一个平面和五个球体，其中一个红色球体包含有高光。

正方体（testcases/scene02_cube.txt）包含一个红色的正方体，该正方体实际上是一个 obj 模型，所有 obj 模型都放在了 mesh 文件夹下，如果你的程序提示找不到文件，请检查路径是否正确。

变形球体（testcases/scene03_sphere.txt）：一个压缩并旋转了的球体，看起来像一根针，Transform 类的正确实现已经为你提供，因此如果你的 Sphere 求交算法实现正确，则理论上可以直接输出结果。关于 Transform 类对物体进行变形的原理，请参考以下文档 10.8 节的 Instancing：http://www.cs.utah.edu/~shirley/books/fcg2/rt.pdf

坐标系（testcases/scene04_axes.txt）：用拉长了的正方体组成的坐标系。

简单兔子（testcases/scene05_bunny_200.txt）：一个包含了 200 个三角面片的斯坦福兔子。原始模型下载地址：http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/

复杂兔子（testcases/scene06_bunny_1k.txt）：同样的斯坦福兔子，面片个数为 1000，同时对网格进行了缩放。

镜面反射（testcases/scene07_shine.txt）：由 9 个绿色的球组成，每个球的光泽度（shininess）都不一样。

5 提交说明

请将你的代码放入 code 文件夹，和一个 REPORT.pdf 文档一起打包成 zip 文件提交至网络学堂。

具体文件树结构如下所示。由于助教会使用自动化测试脚本来运行大家的程序，因此请务必遵循该文件树。文件夹包含 MacOS 生成的.DS_STORE 文件不影响评分。

```
姓名-学号-PA1.zip
 |----REPORT.pdf
 |----code
 |      |----run_all.sh
 |      |----CMakeLists.txt
 |      |----src/
 |      |----include/
 |      |----…
 |----…（其他你想放的文件）
```

在 README.pdf 文档中主要回答以下问题：

- 你所实现的光线投射算法逻辑是怎样的？你在实现中遇到了哪些问题？
- 你在完成作业的时候和哪些同学进行了怎样的讨论？是否借鉴了网上/别的同学的代码？
- 如何编译你的代码并输出上述 7 个测试用例的渲染结果？如果你没有使用框架代码，请放上你渲染的图片结果。
- 你的代码有哪些未解决的 bug？如果给你更多时间来完成作业，你将会怎样进行调试？
- (可选) 你对本次编程作业有什么建议？文档或代码中有哪些需要我们改进的地方？

本次作业的 Deadline 以网络学堂为准。

迟交的同学将得到一定的惩罚：晚交 3 天内分数将降低为 80\%，3 天以上 1 周以内分数降为 50\%，迟交一周以上的同学分数为 0。

在检查你的作业时，助教的自动化脚本会在 code 目录下运行 run_all.sh 文件，不能成功编译者可能会被酌情扣分。

最后，欢迎同学们在压缩包中加入自己设计的场景 txt 文件，你的场景可能会被用于下学期的课堂作业教学中哦。

6 致谢

本实验文档和代码部分借鉴于 MIT Open Courseware，按照其发布协议，本文档原则上允许同学们以 CC BY-NC-SA 4.0 协议共享引用，但是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。