

计算机图形学实验作业报告

256515 王安琪

项目效果演示见项目源文件中 `效果演示.mp4` 和 `效果演示-点光源 only.mp4` 视频。

1. 使用手册

本项目采用 **C++ + OpenGL (GLFW + GLAD)** 实现一个带有完整光照、材质、阴影和多几何物体的三维 Cornell Box 场景。工程结构清晰，可在 Windows 与 Linux 下通过 CMake 构建。

1.1 运行环境

- C++17
- OpenGL 4.1 Core Profile
- GLFW3 (窗口和输入)
- GLAD (OpenGL 函数加载)
- stb_image (贴图加载)
- CMake ≥ 3.10

1.3 编译方式

1.2.1 windows

使用 `MinGW` 和 `Clang` 进行编译，步骤如下

1. 确保已将 MinGW 和 Clang 的 bin 目录添加到系统环境变量 Path 中 (避免编译时找不到工具链)。
2. 打开PowerShell，执行以下命令启动构建：

```
cd cg_project  
.\\build_windows.bat
```

1.2.2 macOS

使用 `Homebrew` 安装依赖 glfw：

```
brew install glfw
```

打开终端，执行以下命令启动构建：

```
cd cg_project  
# 先给脚本加执行权限 (只需要做一次)  
chmod +x build_macos.sh  
.\\build_macos.sh
```

1.4 项目结构

```
cg_project
├ CMakeLists.txt // CMake 配置文件
├ build_macos.sh // macOS 构建脚本
├ build_windows.bat // Windows 构建脚本
├ image // 实验报告插图
│ ┌ cornell_box.png
│ ┌ debug_mode.png
└ include // 头文件
    ┌ GLFW
    ┌ KHR
    ┌ glad
    ┌ glm
    ┌ stb_image.h
└ lib // 库文件
    ┌ libglfw3.a
└ readme.md // 项目说明
└ shader // 着色器文件
    ┌ default_fragment_shader.fs // 默认片段着色器
    ┌ default_vertex_shader.vs // 默认顶点着色器
    ┌ normal_fragment_shader.fs // 法线片段着色器
    ┌ normal_vertex_shader.vs // 法线顶点着色器
    ┌ phone_fragment_shader.fs // phone片段着色器, 带阴影
    ┌ phone_vertex_shader.vs // phone顶点着色器, 带阴影
    ┌ point_shadow_fragment_shader.fs // 点光源阴影片段着色器
    ┌ point_shadow_vertex_shader.vs // 点光源阴影顶点着色器
    ┌ shadow_fragment_shader.fs // 平行光源阴影片段着色器
    ┌ shadow_vertex_shader.vs // 平行光源阴影顶点着色器
└ src // 源文件
    ┌ Camera.cpp
    ┌ Camera.h // 相机类
    ┌ Shader.cpp
    ┌ Shader.h // 着色器类
    ┌ glad.c
    ┌ light // 光源
        ┌ DirectionalLight.h // 平行光源
        ┌ Light.h // 光源基类
        ┌ PointLight.h // 点光源
    ┌ main.cpp // 主程序
    ┌ material // 材质
        ┌ Material.h // 材质基类
        ┌ PhoneMaterial.cpp
        ┌ PhoneMaterial.h // phone材质
        ┌ PureColorMaterial.cpp
        ┌ PureColorMaterial.h // 纯色材质
        ┌ TexturedPhoneMaterial.cpp
        ┌ TexturedPhoneMaterial.h // 带贴图的phone材质
    ┌ object // 几何体
        ┌ Cone.cpp
        ┌ Cone.h // 圆锥
        ┌ Cube.cpp
        ┌ Cube.h // 立方体
        ┌ Cylinder.cpp
        ┌ Cylinder.h // 圆柱
        ┌ Object.h // 几何体基类
        ┌ Plane.cpp
        ┌ Plane.h // 平面
        ┌ Sphere.cpp
        ┌ Sphere.h // 球体
    ┌ stb_image_impl.cpp
    ┌ texture // 贴图
        ┌ Texture.cpp
        ┌ Texture.h // 贴图类
    ┌ tool // 工具类
```

```

|   |   |   | Line.cpp
|   |   |   | Line.h
|   |   |   | Point.cpp
|   |   |   | Point.h
|   |   | texture // 贴图文件
|   |   |   | brick.jpeg
|   |   |   | earth.jpg
|   |   |   | floor.jpeg
|   |   |   | painting.jpg
|   |   |   | wall.jpg
|   |   |   | wood.jpg
|   |   | 实验报告.md
|   |   | 实验报告.pdf
|   |   | 效果演示-点光源 only.mp4
|   |   | 效果演示.mp4

```

1.5 相机控制交互方式

程序内置类似 FPS 的自由相机：

- **W / S**: 前进 / 后退
- **A / D**: 左移 / 右移
- **鼠标移动**: 调整视角 (yaw/pitch)
- **鼠标滚轮**: 缩放视场角 (FOV)
- **Esc**: 退出程序

1.6 场景内容概述

程序运行之后，可以看到一个由多个平面围成的景箱（Cornell Box），内部布置了：

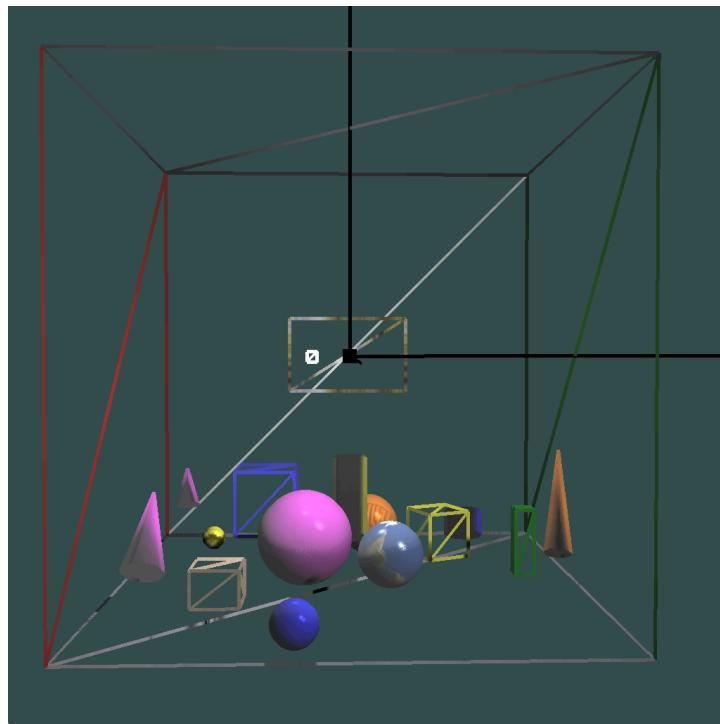


- 左边的红墙和右边的绿墙
- 对面墙面的画
- 具有材质贴图的墙和地板
- 不同材质和贴图的立方体、球体、圆柱、圆锥
- 动态旋转的点光源(图中白色立方体)与平行光源(方向为 $\text{vec3}(-1 -1 -1)$)
- PCF 软阴影
- 使用 Phong 光照模型的高光、漫反射与环境光

整体效果接近一个可交互的三维室内展示空间。

1.7 Debug mode

在 `main.cpp` 中，通过 `bool debugMode = true;` 可以开启 debug 模式，此时会渲染物体的线框，场景的原点以及三个坐标轴，便于调试。



2. 设计思路

本实验的整体目标是构建一个 **真实感较强、结构清晰、可交互、具备阴影与纹理的三维场景渲染**。为了达到这一目标，我采用了偏向“图形引擎架构”的设计方式：从基础模块（Shader / Texture / Camera）开始，再逐步叠加光照、阴影、材质与对象体系，最终组合成复杂场景。

2.1 模块化架构思想（Engine-style 架构）

为了避免把所有逻辑写在 `main.cpp` 中，我按真实渲染引擎的方式，将项目拆分为七大系统：

(1) Shader 系统：渲染语言与 CPU-GPU 通道

独立封装 Shader，使它承担以下职责：

- 加载 .vs / .fs 文件
- 编译、链接、检测错误
- 缓存并设置 uniform (setInt / setFloat / setVec3 / setMat4...)
- 与材质、光照、模型的交互接口

Shader 是 GPU 执行逻辑的核心。因此把 Shader 抽象成模块，使 CPU 端逻辑与 GPU 端 shader 代码保持松耦合。

(2) Camera 系统：可漫游的交互式三维视角

Camera 模块实现了典型 **FPS-style** 相机：

- WASD 进行平移
- 鼠标控制 yaw/pitch
- 滚轮控制 zoom
- 生成 viewMatrix 与 projectionMatrix

(3) Light 系统：支持多光源类型

项目包含三类光照：

- DirectionalLight (方向光)
→ 模拟太阳光，生成大面积阴影

- PointLight (点光源)
 - 用于局部照亮，生成实时立体阴影
- Ambient 成分
 - 模拟环境光，确保暗部不完全黑

每种光源都具有材质化属性 (diffuse / specular / ambient)，且通过 shader 统一管理。

(4) Material 系统：现实感渲染的基础

实验实现了三类材质：

- **PureColorMaterial**: 无光照，用于 debug
- **PhongMaterial**: 经典光照模型
- **TexturedPhongMaterial**: 加入漫反射纹理的版本

所有材质均继承自同一个抽象基类 Material，并统一通过 `material->apply(shader);` 把材质参数传到 GPU。这样做能实现“**材质可热插拔**”的效果，不同 object 只需替换材质即可获得不同外观。

(5) Object 系统：抽象几何体的统一接口

Object 是所有几何体的抽象父类，包含：

- VAO/VBO/EBO 的封装
- model 矩阵
- shader 与材质指针
- draw() 渲染接口

子类 (Cube / Sphere / Cone / Cylinder / Plane) 只关心自己的几何数据；

渲染逻辑由 Object 负责；

shader 和材质由 material 决定。

这是一种典型的“**抽象几何体接口 + 多态渲染**”的设计方式。

(6) Texture 系统：图像数据与 OpenGL 纹理的桥梁

Texture 模块负责：

- 使用 stb_image 读取图片
- 翻转、RGB/rgba 判断、数据加载
- 生成 OpenGL 纹理对象并绑定

纹理被材质持有，然后在渲染时绑定到统一的 texture unit。

(7) Shadow 系统：真实感的关键组成

实现了两套阴影技术：

1) Shadow Map (平行光)

- 光源先从自己的视角渲染场景深度
- 再在主渲染中比较片元深度是否被遮挡

2) Cube Shadow Map (点光源)

- 六次深度渲染生成立方体深度贴图
- 根据片元方向决定 cube face 采样

2.2 场景构建策略（扩展版康奈尔盒）

为了让实验场景既有教学意义又不显得空，我采用了“**康奈尔盒**”：

(1) 基础环境：全由 Plane 构建

- 地面：带纹理 (floor.jpeg)
- 左墙：红色
- 右墙：绿色
- 天花板：白色
- 后墙：贴 wall.jpg

通用的康奈尔盒提供了稳定的光照环境，便于展示阴影效果。

(2) 十余个物体构成“展览布局”

包含：

- 大方块 / 倾斜方块
- 大球、小球、带纹理的地球球
- 高圆锥、矮圆锥
- 金属材质的圆柱体
- 木纹立方体
- 后墙挂画

2.3 光照设计（真实感的核心）

为了让场景效果尽量真实，我使用了双光源结构：

(1) 主光源：方向光 (Directional Light)

相当于“太阳光”：

- 方向固定
- 覆盖整个场景
- 使用正交投影
- 负责生成大面积阴影

方向光让场景具备 整体统一的主光照和清晰的大阴影区域。

(2) 辅助光源：点光源 (Point Light)

点光源可以进行动态绕 y 轴旋转，用来：

- 产生动态局部照明
- 在球体、金属柱上生成高光
- 提供立体阴影 (Cube Shadow Map)

点光源让场景显得鲜活、有节奏变化。

(3) 软阴影 (PCF 模糊)

阴影是场景真实感的决定性因素。为避免锯齿形状，我对每个阴影采样点进行：

- $3 \times 3 / 5 \times 5$ 随机偏移 PCF 模糊
- 深度偏移 bias 防止 acne
- 线性深度衰减控制柔和程度

最终得到柔和、自然、不突兀的阴影边缘。

3. 实现

本项目整体采用“初始化 → 预处理（阴影图）→ 正常渲染 → 交互控制”的架构。核心代码集中在 `main.cpp` 中，其余模块以类的形式进行封装，保证结构清晰、便于扩展。

3.1 渲染流程

主渲染循环 (`while (!glfwWindowShouldClose(window))`) 中, 每一帧的具体流程如下:

(1) 更新帧时间与相机输入

1. 使用 `glfwGetTime()` 计算当前帧时间与上一帧时间差 `deltaTime`。
2. 调用 `processInput(window, deltaTime)`:
 - 根据 W / A / S / D 键的按下与否, 更新 `keys[]` 数组;
 - 将 `keys` 传给 `camera.ProcessKeyboard(deltaTime, keys)`, 在世界坐标系中进行平移。
3. 鼠标与滚轮的回调函数 `mouse_callback`、`scroll_callback` 已在初始化阶段注册, 用来更新相机的 `yaw / pitch / zoom`, 最终影响 `view` 矩阵与 `projection` 矩阵。

(2) 更新点光源位置 (动画)

在每一帧中, 根据时间 `currentFrame`, 让点光源沿 Y 轴做圆周运动:

- 使用 `angle = rotationSpeed * currentFrame` (转为弧度) 计算当前旋转角;
- 点光源位置更新为:
 - `x = radius * cos(angle)`
 - `z = radius * sin(angle)`
 - `y` 高度保持不变
- 同步更新表示点光源实体的小立方体的 `model` 矩阵, 使其在场景中随光源一起运动。

这样可以直观观察到 **阴影随点光源位置实时变化** 的效果。

(3) 渲染平行光阴影贴图 (Directional Light Shadow Map)

1. 构建光源空间矩阵:
 - 使用 `glm::ortho` 构建正交投影矩阵 `lightProjection`, 保证整个康奈尔盒都在光源视锥体内。
 - 使用 `glm::lookAt` 根据平行光的方向构建 `lightView`, 将光源放在 `-dir * 某个距离` 的位置, 看向场景中心。
 - 得到 `lightSpaceMatrix = lightProjection * lightView`。
2. 绑定阴影 FBO:
 - `glViewport(0, 0, SHADOW_WIDTH, SHADOW_HEIGHT)` 将视口切换为阴影贴图的分辨率 (1024×1024)。
 - 绑定 `depthMapFBO`, 清空深度缓冲。
3. 使用专用深度着色器 `shadowShader`:
 - 仅计算 `gl_Position = lightSpaceMatrix * model * vec4(position, 1.0)`;
 - 片元阶段只写入深度, 不输出颜色。
4. 遍历所有 `objects`:
 - 对每个物体设置 `uModel`, 调用 `obj->renderVertex()` 渲染顶点。
 - 渲染结果写入 **深度纹理** `depthMap` 中。
5. 渲染完成后解绑 FBO, 恢复窗口大小的视口。

(4) 渲染点光源立方体阴影贴图 (Point Light Shadow CubeMap)

点光源阴影使用 **深度立方体贴图**, 需要对 6 个方向分别渲染深度:

1. 构建透视投影矩阵:
 - 使用 `glm::perspective(glm::radians(90.0f), 1.0f, 0.1f, pointLightFar)`, FOV 为 90°, 宽高比为 1。
2. 为 6 个方向构建视图矩阵 `pointViews[i]`:
 - 朝 +X、-X、+Y、-Y、+Z、-Z 六个方向 `lookAt`;
 - `up` 向量根据方向不同略有调整, 避免视图翻转。
3. 绑定 `pointDepthMapFBO`, 设置视口为立方体贴图尺寸 (2048×2048), 清空深度缓冲。
4. 启用 `pointShadowShader`:
 - 设置 `uLightPos` 为点光源位置;
 - 设置 `uPointLightFar` 为点光源的远平面值, 用于深度归一化。
5. 循环 6 个面:
 - 每次将当前面绑定到 FBO 的深度附件上:
`glFramebufferTexture2D(GL_FRAMEBUFFER, GL_DEPTH_ATTACHMENT, GL_TEXTURE_CUBE_MAP_POSITIVE_X + i, pointDepthMap, 0);`
 - 计算 `pointVPMatrix = pointProjection * pointViews[i]` 并传入 shader 的 `uPointVPMatrix`;
 - 遍历所有物体, 设置 `uModel`, 调用 `renderVertex()` 渲染。

最终得到一个 6 面深度立方体贴图 `pointDepthMap`，每一面记录了点光源视角下的场景深度信息，可以用于点光源阴影判断。

(5) 正常渲染场景（带阴影）

1. 恢复默认帧缓冲与窗口视口：

- `glBindFramebuffer(GL_FRAMEBUFFER, 0);`
- `glViewport(0, 0, SCR_WIDTH, SCR_HEIGHT);`
- 清空颜色与深度缓冲。

2. 计算相机矩阵：

- `view = camera.GetViewMatrix();`
- `projection = camera.GetProjectionMatrix(SCR_WIDTH / SCR_HEIGHT);`

3. 先绘制点光源实体小立方体，用默认 shader 与纯色材质，帮助观察光源轨迹。

4. 遍历所有场景物体 `objects`：

- 使用物体自身绑定的 `shader`（一般是 Phong 或 TexturedPhong）；
- 设置变换与光照相关 uniform：
 - `uModel`、`uView`、`uProjection`
 - `uLightSpaceMatrix`（用于平行光阴影）
 - 绑定并设置：
 - `uShadowMap` → 2D 深度纹理 `depthMap`
 - `uPointShadowMap` → 立方体深度纹理 `pointDepthMap`
 - 设置光源结构体参数 `dirLight`、`pointLight`（环境光、漫反射、镜面、位置/方向、衰减等）；
 - 设置 `uViewPos` 为相机位置，用于镜面高光计算。

5. 在 fragment shader 中完成：

- Phong 光照计算；
- 基于 `uShadowMap` 与 `uLightSpaceMatrix` 的平行光阴影判断；
- 基于 `uPointShadowMap` 与 光源 → 点 的距离 的点光源阴影判断；
- 使用 PCF 对阴影深度进行多点采样和平均，使阴影边缘变得柔和。

6. Debug 模式下，还会额外绘制三条坐标轴线与原点，便于观察场景尺度。

3.2 主要模块说明（基于源码结构）

(1) Shader 模块

文件： `Shader.h` / `Shader.cpp`

- 负责读取 `.vs` / `.fs` 着色器源码，编译并链接为 OpenGL 程序。
- 内部封装了错误检查与 `glUseProgram`。
- 提供了一系列 `setXXX` 接口：
 - `setMat4(name, glm::mat4)`
 - `setVec3(name, glm::vec3)`
 - `setInt(name, int)`
 - `setFloat(name, float)`
- 让上层代码在 C++ 侧设置 uniform 可以像调用普通函数一样简单。

(2) Camera 模块

文件： `Camera.h` / `Camera.cpp`

- 实现 FPS 风格相机，维护以下状态：
 - `position`：相机位置
 - `front` / `up` / `right`：相机坐标系基向量
 - `yaw` / `pitch`：欧拉角
 - `zoom` (FOV)
- 提供：
 - `GetViewMatrix()`：返回 `lookAt` 形式的视图矩阵；
 - `GetProjectionMatrix(aspect)`：根据 FOV、near/far 生成透视投影矩阵；
 - `ProcessKeyboard(deltaTime, keys[])`：根据 W/A/S/D 更新位置；
 - `ProcessMouseMovement(xOffset, yOffset)`：根据鼠标偏移更新 yaw/pitch；
 - `ProcessMouseScroll(yoffset)`：根据滚轮缩放 FOV。

这样所有与相机相关的逻辑都被封装在一个类里，主循环只需调用上述接口即可。

(3) Object 抽象基类与几何子类

文件: `Object.h` 以及 `Cube / Sphere / Plane / Cylinder / Cone` 对应的 `.h/.cpp`

- 抽象基类 `Object`:
 - 成员:
 - `glm::mat4 model` : 物体自身的模型变换矩阵;
 - `Shader* shader` : 该物体使用的着色器;
 - `Material* material` : 材质指针;
 - `unsigned int VAO, VBO, EBO` : OpenGL 缓冲对象句柄。
 - 接口:
 - `virtual void render(glm::mat4 model, glm::mat4 view, glm::mat4 projection)` : 完整渲染接口，会调用材质设置参数等;
 - `virtual void renderVertex()` : 只画几何，不考虑光照，用于阴影贴图阶段。
- 几何子类 (以 `Cylinder` 为例):
 - 在构造函数中，通过 `generateCylinderData()` 生成顶点与索引:
 - 顶部/底部圆面中心点;
 - 圆周上的顶点与法线;
 - 侧面四个一组顶点，计算法线 (沿半径方向);
 - 将数据存入 `VBO/EBO`，配置位置、法线、纹理坐标的顶点属性 (`layout = 0/1/2`)。
 - `renderVertex()` 调用 `glDrawElements(GL_TRIANGLES, indices.size(), GL_UNSIGNED_INT, 0)` 完成绘制。

`Sphere`、`Cube`、`Plane`、`Cone` 等类实现方式类似，只是几何生成方式不同。

(4) Light 模块

文件: `Light.h / DirectionalLight.h / PointLight.h`

- `Light` 基类定义光源的公共接口;
- `DirectionalLight`:
 - 成员: `direction`、`ambient`、`diffuse`、`specular`
 - 提供 `applyLight(Shader& shader, const std::string& name)`，内部调用 `shader.setVec3(name + ".direction", ...)` 等，将光源参数写入 `shader` 中的结构体:

```
struct DirLight {
    vec3 direction;
    vec3 ambient;
    vec3 diffuse;
    vec3 specular;
};
```

- `PointLight`:
 - 成员: `position`、`ambient`、`diffuse`、`specular`、衰减系数 `constant / linear / quadratic`
 - 同样提供 `applyLight`，向 `shader` 中写入 `pointLight.position` 等。

这样在 `main.cpp` 里，每一帧只需要执行:

```
dirLight.applyLight(*obj->shader, "dirLight");
pointLight.applyLight(*obj->shader, "pointLight");
```

就能把光源信息同步进 GPU。

(5) Material 模块

文件: `Material.h / PhoneMaterial.* / PureColorMaterial.* / TexturedPhoneMaterial.*`

- `Material` 为抽象类，定义接口:
 - `virtual void apply(Shader& shader) = 0;`，用于把材质参数传给 `shader`。
- `PhongMaterial`:
 - 成员: `ambient / diffuse / specular / shininess`

- apply 时向 shader 写入：


```
struct Material {
    vec3 ambient;
    vec3 diffuse;
    vec3 specular;
    float shininess;
};
```
- `TexturedPhongMaterial`:
 - 在 `PhongMaterial` 基础上增加 `Texture* diffuseMap`;
- `apply` 时绑定纹理到固定纹理单元，并设置 `useTexture = true` 等标志;
- `fragment shader` 中根据标志决定:
 - 仅使用 `material.diffuse`;
 - 或使用 `texture(diffuseMap, TexCoord)` 作为漫反射颜色。
- `PureColorMaterial`:
 - 极简材质，只输出一种颜色，主要用于点光源小立方体与 `debug` 对象。

(6) Texture 模块

文件: `Texture.h / Texture.cpp`

- 使用 `stb_image` 读取 jpg/png 文件，生成 OpenGL 2D 纹理:
 - 支持水平方向/垂直翻转;
 - 设置 `GL_REPEAT`、`GL_LINEAR_MIPMAP_LINEAR` 等参数;
- 通过 `bind()` 方法把纹理绑定到当前活动纹理单元。
- 被 `TexturedPhongMaterial` 等持有，在绘制前统一绑定。

(7) 阴影 (Shadow map)

- 平行光阴影:
 - 通过 `depthMapFBO + depthMap` 实现;
 - 在深度渲染阶段关闭颜色输出，只写深度;
 - 在 `Phong shader` 中，把当前片元位置从世界空间变换到光源空间，比较:
 - 当前片元深度 vs. 深度纹理中存储的最小深度 + bias;
- 点光源阴影:
 - 使用 `cube map` 记录 6 个方向的深度;
 - `fragment shader` 中根据片元与点光源的方向确定 `cube map` 采样方向;
 - 比较实际距离与 `cube map` 中存储的深度，判断是否在阴影中。
- 使用 PCF:
 - 在深度纹理上取一个小窗口进行多次采样;
 - 统计遮挡比率作为阴影强度，使阴影边缘过渡柔和。

4. 小结

本次实验从零构建了一个完整的 **OpenGL 三维渲染场景**，涵盖了：

- 几何建模 (`Cube / Sphere / Cone / Plane / Cylinder`)
- 材质系统 (`Phong`、纹理)
- 光照系统 (平行光 + 点光源)
- 阴影映射 (`Shadow Map + Shadow Cube Map`)
- PCF 软阴影
- 三维交互式相机
- 贴图与纹理采样
- 康奈尔盒场景搭建与多物体分布设计

整个实验开发过程，让我完整理解了一个实时渲染管线如何从“几何 → 变换 → 光照 → 材质 → 阴影 → 输出”逐步构成，也加深了我对 OpenGL 底层原理与 shader 思维方式的掌握。

如果进一步扩展，我认为可以加入：

- 全局光照算法
- PBR 材质
- 面光源
- PCSS 软阴影

本次项目是一个完整而扎实的 3D 渲染练习，使我对计算机图形学渲染流程有了系统而深入的理解。