山东大学 计算机科学与技术 学院

计算机图形学 课程实验报告

学号：202200130119	姓名：于斐	班级：学堂计机 22
实验题目：Ray tracing		
实验学时： 4	实验日期： 2024 年 11 月 23 日	

实验目的：

通过实现光线追踪算法，在 OpenGL 环境下构建一个真实感 3D 场景，深入理解光线追踪的核心原理和渲染流程。实验旨在掌握光线与几何体（如球体、平面）交互的计算方法，以及通过光源与相机位置的调节，生成逼真的光影效果。此外，通过实现场景中的颜色、反射和阴影等细节，体会基于物理的光照模型的魅力，为后续在计算机图形学领域的深入学习打下基础。

实验步骤与内容：

实验环境：OpenGL 4.6 及 GLFW，GLM 等附属库。

实验步骤：

0. 与实验 1 完全相同：项目使用 CMake 管理，原则上任何支持 CMake 的编辑器均可使用。所有未包含在项目文件中的库均使用 CMake 的 FetchContent 导入，不需额外手动安装任何库。

   程序自动生成到 dist 目录下，但运行时 pwd 需包含 assets。因此需要在根目录运行 dist/Renderer 或将 assets 拷贝到 dist 下。

   a) 建立 OpenGL 窗体及 argument parser，config parser。前者代码位于 Renderer::init()中，在 src/renderer/renderer.h，renderer.cpp 下可以找到。后者代码位于 src/utils 中。使用 ImGUI 构建交互选单，用于控制程序运行时的行为。相关代码位于 src/gui/ 下。

1. 普通光线追踪方法分析

   考虑一个普通光线追踪方法。此处一步到位考虑 path tracing。

```
Color TracePath(Ray ray, count depth) {
  if (depth >= MaxDepth) {
    return Black;  // Bounced enough times.
  }

  ray.FindNearestObject();
  if (ray.hitSomething == false) {
    return Black;  // Nothing was hit.
  }

  Material material = ray.thingHit->material;
  Color emittance = material.emittance;

  // Pick a random direction from here and keep going.
  Ray newRay;
  newRay.origin = ray.pointWhereObjWasHit;

  // This is NOT a cosine-weighted distribution!
  newRay.direction = RandomUnitVectorInHemisphereOf(ray.normalWhereObjWasHit);

  // Probability of the newRay
  const float p = 1 / (2 * PI);

  // Compute the BRDF for this ray (assuming Lambertian reflection)
  float cos_theta = DotProduct(newRay.direction, ray.normalWhereObjWasHit);
  Color BRDF = material.reflectance / PI;

  // Recursively trace reflected light sources.
  Color incoming = TracePath(newRay, depth + 1);

  // Apply the Rendering Equation here.
  return emittance + (BRDF * incoming * cos_theta / p);
}

void Render(Image finalImage, count numSamples) {
  foreach (pixel in finalImage) {
    foreach (i in numSamples) {
      Ray r = camera.generateRay(pixel);
      pixel.color += TracePath(r, 0);
    }
    pixel.color /= numSamples;  // Average samples.
  }
}
```

图片引用自 https://en.wikipedia.org/wiki/Path_tracing

上面的方法在 CPU 上很好实现。但是在 GPU 上有困难。首先，OpenGL 的传统的 vert + frag shader 似乎不适合完成这个任务。其次，过程中存在递归，而递归在 GPU 中是不兼容的。

普通的光线追踪运算瓶颈在求交上。一般可使用 BVH 等数据结构加速。但是，BVH 在 traverse 的过程中也可能存在递归，同样需要处理。

2. 任务分析

然而，本次实验任务与一般的光线追踪任务不同。本次实验任务的场景很简单。只有两个球和一个房间，后者最多 12 个三角形面。这个场景包含的 primitive 数量远小于普通场景，因此完全不必构建 BVH 等求交加速结构（BVH 也完全没有办法达到加速效果），仅需暴力判断即可。

考虑本次任务的运算瓶颈，目前的瓶颈就仅存在于 foreach pixel 上了。最好的办法是使用一个通用的并行运算结构，输入数据以后每个 pixel 分配给一个线程，单独求交。

OpenGL 自 4.3 起支持 Compute Shader。这是一个通用运算 shader，支持输入 buffer 后按照类似 cuda 等并行运算结构的方式启动 kernel。这一项功能完美符合任务的要求，因此考虑使用 Compute Shader 作为主力运算单元。

3. Compute Shader

（实现位于 assets/shader/trace.comp）

首先讨论输入和输出。

对于输入，OpenGL 的 Compute Shader 支持 Buffer 形式的数据转移，因此我们将物体数据（墙和球）全部送入 glBuffer，即可被 Compute Shader 调用。

此处的一个难点是，OpenGL 的 struct 内存对齐规则与 CPU 规则不一致，因此需要

严格处理 padding 问题。因此有这样滑稽的 struct 定义：

```
struct Wall {
    glm::vec3 p00;
    float padding1;
    glm::vec3 p01;
    float padding2;
    glm::vec3 p10;
    float padding3;
    glm::vec3 p11;
    float padding4;
    glm::vec3 color;
    float padding5;
    Wall(
        const glm::ve
        const glm::ve
        const glm::ve
            padding1
    )
};
```

```
struct Sphere {
    glm::vec3 center;
    float padding1;
    glm::vec3 color;
    float padding2;
    float radius;
    float padding3[3];
    Sphere(const glm::ve
        padding1 = paddi
        padding3[0] = pa
    }
};
```

除此之外，相机位姿、光照等信息可使用 uniform 送入。
对于输出，使用 Image2D 输出到 OpenGL Texture 即可。
对于并行部分，此并行任务相对简单，无需考虑 shared memory 等问题。对于每个 thread，直接使用 gl_GlobalInvocationID 得到屏幕坐标即可。

到目前，要考虑的仅剩下实现部分。在实现层面，path tracing 除递归外的方法实现与 CPU 一致，包括球、三角形求交、shadow ray resolving 等，此处不再赘述。
一个需要考虑的问题是随机数问题。OpenGL 不原生支持随机数，因此我们需要在每次 launch kernel 时传入一个种子，来做手动伪随机。我们使用了当前已经渲染的帧数来做种子，恰好这个变量需要在 denoising 部分使用。

考虑递归部分。不难注意到，如果我们每次反射时只产生一条光线，那么我们可以直接用循环代替递归，每次更新新的光线即可。类似许多光线追踪方法，我们使用俄罗斯轮盘赌等方法来做简单的加速，并在其中控制 radiance 保证蒙特卡洛估计无偏。

```
for (int bounce = 0; bounce < maxBounces; bounce++) {
    --

    float rrProb = 0.8;
    if (random(screenUV) > rrProb) break;
    throughput /= rrProb;

    ro = hitPos + newDir * 1e-3;
    rd = newDir;
}
```

但是只有一条光线的 trace 结果显然是很 noisy 的。为了 denoise，与许多光线追踪渲染器类似，我们使用了 average over multiple frames 和 average over samples per pixel 的方法。

```
    for (int i = 0; i < spp; ++i) {
        vec2 jitter = vec2(random(screenUV), random(screenUV));
        vec2 newUV = (vec2(pixelCoords) + jitter) / vec2(width, height) * 2.0 - 1.0;
        newUV.x *= float(width) / float(height);
        vec3 newRayDir = normalize(cameraFront + newUV.x * cameraRight * tan(cameraFov
        color += tracePath(cameraPos, newRayDir);
    }

    color /= float(spp);

    vec4 lastRadiance = imageLoad(outputImage, pixelCoords);
    if (rerender != 0) lastRadiance = vec4(0.0);

    color = (lastRadiance.xyz * float(frame) + color) / float(frame + 1);
```

对于每一帧的每一个 pixel，我们采样 spp 次，每次在初始的 ray 上随机给一个 jitter。最终这一帧的结果是多次采样的 average。顺便，我们使用这个方法达到了 anti aliasing 的效果。

在场景固定后，我们 average over multiple frames，每次以一个越来越小的比例对 final color 取加权平均值，最终达到收敛。

我们最终的 Compute Shader 的主要伪代码如下：

```
function computeShaderMain()
    // 与 cuda 等通用并行计算方式类似，得到当前线程要处理的坐标
    pixelCoords = getGlobalInvocationID()
    if pixelCoords out of bounds then return

    // 从屏幕坐标转换到 uv 坐标
    uv = normalizeScreenCoordinates(pixelCoords, width, height)

    // 初始化随机数种子，使用了当前渲染的帧数
    seed = initializeSeed(frame, pixelCoords)

    // 多次采样，每次发射一个抖动光线，并做 path tracing
    color = vec3(0.0)
    for i = 0 to spp - 1 do
        jitter = generateRandomOffset()
        newRayDir = calculateRayDirection(perturbUV(uv, jitter), cameraFront,
cameraRight, cameraUp, cameraFov)
        color += tracePath(cameraPos, newRayDir)
    color /= spp
    // 与上一帧的结果混合，并逐渐收敛
    lastRadiance = loadImage(outputImage, pixelCoords)
    if rerender != 0 then lastRadiance = vec4(0.0)
    color = (lastRadiance.rgb * frame + color) / (frame + 1)
    storeImage(outputImage, pixelCoords, vec4(color, 1.0))
end function

function tracePath(rayOrigin, rayDirection)
    radiance = vec3(0.0)
    throughput = vec3(1.0)
```

```
    // 递归 path tracing。由于 OpenGL 不支持递归，此处使用循环代替，且光线不扩散，只有一次反射
    for bounce = 0 to maxBounces - 1 do
        // anyhit
        hit, t, hitNormal, hitColor = intersectScene(rayOrigin, rayDirection)
        if not hit then break

        // closesthit
        radiance += calculateDirectLighting(rayOrigin, rayDirection, hitNormal, hitColor)

        // 更新光线方向，采样新的方向
        rayDirection = sampleNewDirection(hitNormal)

        // RR，随机终止路径
        if terminatePathRandomly() then break

        // 此处给 throughput 补偿，使得估计无偏
        throughput *= updateThroughput(hitColor, rayDirection)

        // 更新光线起点
        rayOrigin += rayDirection * epsilon
    return radiance
end function
```

4. 其他实现

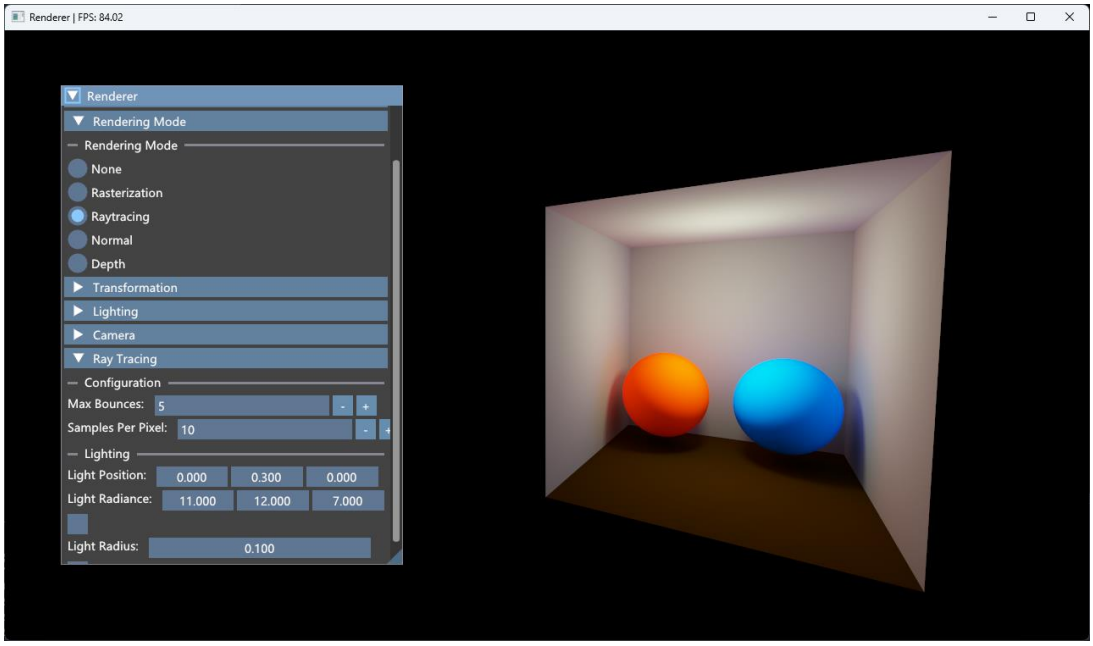
在 CPU 层面，构建 Scene 类用于物体添加和光源管理。向其中添加五面墙（空一面用于进光）和两个球体。相关代码可在 src/ray_tracer/scene.cpp 中查看。

针对 radiance resolving 的过程，实验没有要求严格的构建反射、折射材质，因此使用 color 近似 diffuse material，使用球型光源（因此包含 light radius 变量）。没有保证严格的数值与真实物理量的一一对应关系。

在 GPU 层面，最终使用一个很简单的一一对应 shader 将 path tracing 结果写入屏幕。过程中使用 tone mapping 做颜色映射。OpenGL 自动处理 gamma correction。

整个 trace 过程可以达到很高的效率，在 1080P，Max. Bounces = 5，SPP = 4 的情况下，在 RTX3050 上运行，可以达到 120fps。此时 GPU 占用约为 50%，猜测有一大部分开销来自于 Device - Host 的数据交换。在 SPP = 10 的情况下，GPU 占用可接近 100%，此时可以达到 ~30fps。但此时 SPP 已经完全冗余。

5. Demo



实验总结：

本次实验成功实现了一个光线追踪渲染器，并构建了包含两个球体和房间的 3D 场景。通过使用光线与球体、平面的交点计算，以及基于法线的光照计算，生成了真实感的阴影和光影效果。实验中，通过调整光源位置和观察点，观察了场景的不同渲染结果，进一步理解了光线追踪的灵活性和真实感表现力。本次实验学习了 OpenGL Compute Shader 的使用方法，对 GPU 通用计算有了更深刻的理解。