

学号	姓名	论文规范性 (10)	问题分析与调研 (30)	方案创新性 (20)	实验结果分析与讨论 (40)	结课论文总成绩 (100)
21301158	李沛阳	7	21	16	33	77

参考文献与论文相关度不大



计算机图形学课程（论文）

基于高级光照技术的湖上小岛场景优化与分析

Optimization and Analysis of Island Scene on Lake Based on Advanced Lighting Technology

学 院： 软件学院

专 业： 软件工程

学生姓名： 李沛阳

学 号： 21301158

指导教师： 吴雨婷

北京交通大学

2024 年 6 月

摘要

本文在实验二的基础上探讨了利用 OpenGL 进行三维湖上小岛场景的建模与渲染技术，重点应用了高级光照技术进行优化。为了解决场景渲染中的光照优化问题，本文利用 PBR 模型，通过环境光遮蔽、辐射度贴图以及基于 Cook-Torrance 模型的光照计算等方法，实现了更加逼真的光照效果。实验部分包括 PBR 光照模型的实现及其在场景中的应用，并对其效果进行了详细分析。最后的实验结果显示，在不同光照条件下，PBR 模型能够更准确地模拟光照和材质的交互，提高了三维场景的视觉效果。尽管 PBR 模型提升了真实感，但其计算复杂度也增加，导致一定的性能损耗。所以还存在一定的优化问题有待解决。

关键词：高级光照技术；PBR 模型；环境光遮蔽；辐射度贴图；Cook-Torrance 模型

1 引言

计算机图形学是计算机科学的重要领域，涉及图像生成和处理的各个方面。三维图形学是其中的重要分支，被广泛应用于游戏、虚拟现实和电影等领域。随着计算机图形学和虚拟现实技术的快速发展，人们对于逼真、交互性强的三维场景的需求日益增加。本章旨在介绍项目研究展开前的准备工作，包括研究背景与意义、相关 国内外研究现状。

本项目来自本人所上课程——计算机图形学的实验项目。在三维图形渲染领域，光照是影响场景视觉真实感的重要因素之一。传统的渲染技术难以准确模拟材质的光照反射特性，尤其是在湖面等反射效果复杂的场景中，常常显得生硬和不自然。因此，利用基于物理的渲染（PBR）模型以及高级光照技术进行场景优化，成为当前图形学研究的热点之一。本文旨在通过实现高级光照技术的优化，特别是基于 PBR 模型的光照计算，来提升三维湖上小岛场景的视觉效果和真实感。

在图形学与计算机视觉领域，PBR 模型和高级光照技术已经被广泛应用于游戏开发、虚拟现实和电影特效等领域。例如，Disney 和 Pixar 等公司在电影制作中大量使用 PBR 模型，以提高场景和角色的视觉真实感和逼真度。在实时图形渲染方面，Unity 和 Unreal Engine 等游戏引擎已经集成了 PBR 渲染管线，使得开发者能够轻松应用这些先进的光照技术。



图 1-1 PBR 渲染的《无敌破坏王》

2 相关工作介绍

高级光照技术的研究涵盖了从基础光照模型到复杂的基于物理的渲染（PBR）技术。近年来，PBR 技术的发展使得更加逼真的光照效果得以实现。PBR 通过物理参数模拟现实世界中的光照和材质交互，显著提升了图形的真实感。常用的 PBR 模型包括基于 Cook-Torrance 反射模型的光照计算，能够更加准确地模拟表面光照特性。

3 方法描述

3.1 场景构思

本次实验的场景设想为一个美丽而逼真的湖上小岛，通过光照、材质和纹理的综合应用，营造出一个具有沉浸感和互动性的三维环境。场景的主要元素包括：

小岛：不规则地形，覆盖草地。

灯塔：红白相间设计，成为场景中的视觉焦点。

木房：使用棕色和灰色的木材纹理，展现古朴自然的感觉。

大巴：停在岛上的空地上，颜色以深蓝和白色为主，表面有灰尘和泥土痕迹。

天空与白云：采用蓝色渐变天空和多样形状的白云，增加层次感。

树木：种类多样，树叶颜色丰富。

3.2 PBR 光照模型

满足以下条件的光照模型才能称之为 PBR 光照模型：

基于微平面模型（Be based on the microfacet surface model）。

能量守恒（Be energy conserving）。

使用基于物理的 BRDF（Use a physically based BRDF）。

3.2.1 微平面（Microfacet）

大多数 PBR 技术都是基于微平面理论。在此理论下，认为在微观上所有材质表面都是由很多朝向不一的微小平面组成，有的材质表面光滑一些，有的粗糙一些。

当光线射入这些微平面后，通常会产生镜面反射。对于越粗糙的表面，由于其朝向更无序，反射的光线更杂乱，反之，平滑的微平面，反射的光线更平齐。

我们可以基于一个平面的粗糙度来计算出某个向量的方向与微平面平均取向方向一致的概率。这个向量便是位于光线向量 l 和视线向量 v 之间的中间向量，被称为半角向量（Halfway Vector）。

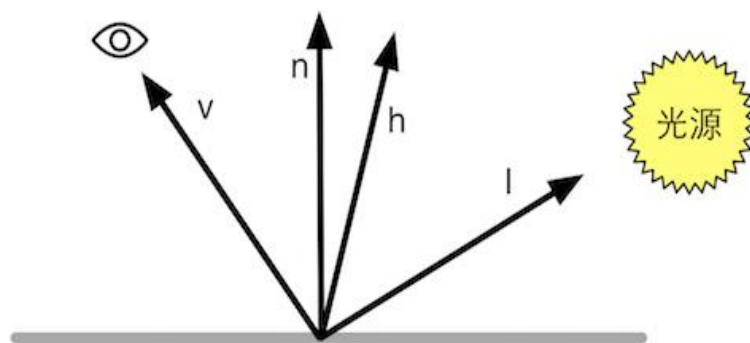


图 3-2-1 微平面

半角向量 h 是视线 v 和入射光 l 的中间单位向量。

半角向量计算公式如下：

$$h = \frac{l + v}{\|l + v\|}$$

3.2.2 能量守恒 (Energy Conservation)

在微平面理论中，采用近似的能量守恒：出射光的总能量不超过入射光的总能量（自发光材质除外）。

镜面反射（specular）和漫反射（diffuse）的区别：

一束光照到材质表面上，通常会分成**反射**（reflection）部分和**折射**（refraction）部分。反射部分直接从表面反射出去，而不进入物体内部，由此产生了镜面反射光。折射部分会进入物体内部，被吸收或者散射产生漫反射。

折射进物体内部的光如果没有被立即吸收，将会持续前进，与物体内部的微粒产生碰撞，每次碰撞有一部分能量损耗转化成热能，直至光线能量全部消耗。有些折射光线在跟微粒发生若干次碰撞之后，从物体表面射出，便会形成漫反射光。

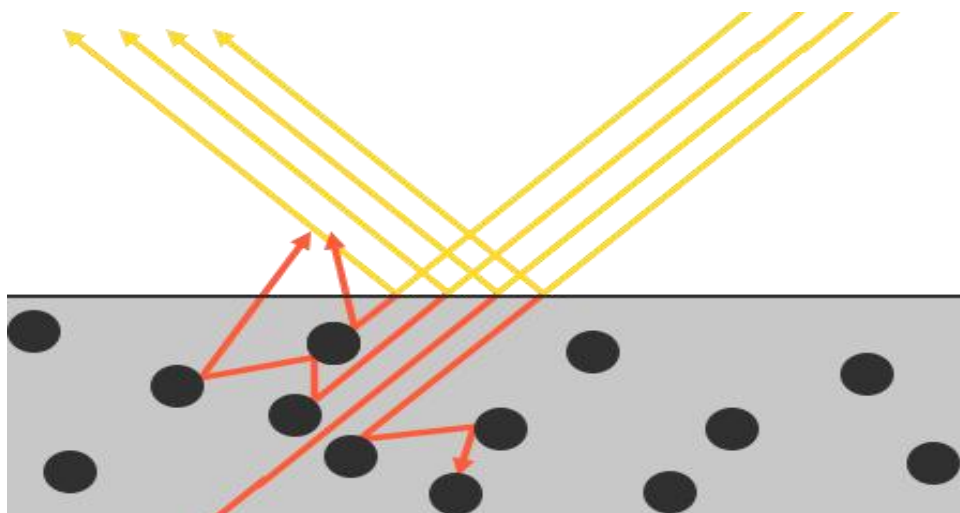


图 3-2-2 镜面反射与漫反射

照射在平面的光被分成镜面反射和折射光，折射光在跟物体微粒发生若干次碰撞之后，有可能发射出表面，成为漫反射。

通常情况下，PBR 会简化折射光，将平面上所有折射光都视为被完全吸收而不会散开。而有一些被称为次表面散射 (Subsurface Scattering) 技术的着色器技术会计算折射光散开后的模拟，它们可以显著提升一些材质（如皮肤、大理石或蜡质）的视觉效果，不过性能也会随着下降。

金属 (Metallic) 材质会立即吸收所有折射光，故而金属只有镜面反射，而没有折射光引起的漫反射。

回到能量守恒话题。反射光与折射光它们二者之间是互斥的，被表面反射出去的光无法再被材质吸收。故而，进入材质内部的折射光就是入射光减去反射光后余下的能量。

根据上面的能量守恒关系，可以先计算镜面反射部分，此部分等于入射光线被反射的能量所占的百分比。而折射部分可以由镜面反射部分计算得出。

3.2.3 反射方程 (Reflectance Equation)

渲染方程 (Render Equation) 是用来模拟光的视觉效果最好的模型。而 PBR 的渲染方程是用以抽象地描述 PBR 光照计算过程的特化版本的渲染方程，被称为反射方程。

PBR 的反射方程可抽象成下面的形式：

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

渲染方程式中 L 代表某个点 p 的辐射率，而无限小的入射光的立体角 ω_o 可以看作

入射光方向向量 ω_i 将用来衡量入射光与平面法线夹角对能量的影响的 $\cos \theta$ 分量移出辐射率方程，作为反射方程的单独项 $n \cdot \omega_i$ 。

反射方程计算了点 p 在所有视线方向 ω_o 上被反射出来的辐射率的 $L_o(p, \omega_o)$ 总和。换言之： L_o 计算的是在 ω_o 方向的眼睛观察到的 p 点的总辐照度。

3.2.4 Cook-Torrance 反射方程 (Cook-Torrance reflectance equation)

$$L_o(p, \omega_o) = \int_{\Omega} \left(k_d \frac{c}{\pi} + \frac{DFG}{4(\omega_o \cdot n)(\omega_i \cdot n)} \right) L_i(p, \omega_i) n \cdot \omega_i d\omega_i$$

这个方程完整地定义了一个基于物理的渲染模型，也就是我们一般所说的基于物理的渲染（PBR）。

PBR 光照模型的核心在于使用基于物理的参数进行光照计算。主要涉及以下几个方面：

环境光遮蔽：使用预计算的环境光遮蔽贴图，增强物体表面的层次感。

辐射度贴图：使用 HDR 辐射度贴图，模拟真实的环境光反射。

基于 Cook-Torrance 模型的光照计算：使用粗糙度、金属度等物理参数，计算表面光照。

4. 实验设置

4.1 初始化窗口和 OpenGL 上下文

使用 GLFW 创建窗口并设置 OpenGL 上下文，初始化 GLAD 来加载 OpenGL 函数指针。

4.2 设置回调函数

设置帧缓冲大小回调函数 `framebuffer_size_callback`，在窗口大小改变时调整视口。

4.3 加载和配置着色器

加载并编译顶点着色器和片段着色器，链接为着色器程序，创建用于渲染天空盒的着色器。

4.4 加载模型和纹理

使用自定义函数 `loadTexture` 加载纹理，加载各种 3D 模型（如狗、巴士、房屋等）。

4.5 设置光照属性

设置光源的环境光、漫射光和镜面光属性，调整光源方向和视角位置。

4.6 实现 PBR 光照模型

4.6.1 加载 PBR 纹理

包括环境光遮蔽贴图、辐射度贴图、金属度和粗糙度贴图。使用 `SOIL` 库加载纹理，并返回生成的 `OpenGL` 纹理 ID。`LoadTexture` 函数接收一个图像文件路径，加载图像，生成纹理并返回纹理 ID。

4.6.2 修改片段着色器

编写片段着色器来基于 Cook-Torrance 模型计算光照。这需要考虑环境光遮蔽、辐射度、金属度和粗糙度等参数。计算光照时使用了几何和分布函数来模拟物理上真实的光照效果。着色器加载了 PBR 纹理并使用这些纹理计算每个片段的颜色。

4.6.3 设置光照参数

最后在应用程序中设置光照参数并绑定纹理。

4.7 渲染循环

在主渲染循环中，计算每帧时间间隔以确保一致的渲染速度，处理用户输入，清除颜色缓冲和深度缓冲，更新投影矩阵和视图矩阵，设置光源和材质属性，依次渲染各种 3D 模型和天空盒。

4.8 交换缓冲和轮询事件

交换前后缓冲以显示渲染结果，轮询并处理用户输入事件。

4.9 终止程序

在渲染循环结束后，终止 `GLFW` 并释放所有资源。

5 实验结果与分析

实验成功地在湖上小岛的场景中应用了PBR光照模型，展示了显著提升的光照效果。用户可以通过键盘和鼠标控制相机视角，观察场景中的不同部分。窗口大小改变时，视口会自动调整。所有模型和纹理加载成功并正确显示。



图 5-1 PBR 处理后

5.1 光照效果

PBR 光照模型显著提升了场景的真实感，特别是在光滑表面和金属表面的光照效果上更加逼真。

5.2 性能分析

由于 PBR 光照模型计算复杂，对性能有一定影响。未来可以考虑通过优化代码结构和使用延迟渲染技术来提升性能。

6 结论：

通过本次实验，我们在现有三维图形场景的基础上应用了 PBR 光照模型，显著提升了光照效果的真实感。实验结果表明，PBR 技术在提升图形逼真度方面有很大优势，但也对性能提出了更高要求。未来工作可以集中在性能优化和更复杂的光照模型上，以进一步提升渲染效果和效率。

参考文献

- [1] 孙家广, 胡事民. 计算机图形学基础教程. 第 2 版. 北京. 清华大学出版社. 2005. 45-100
- [2] 徐文鹏, 王玉琨, 刘永和, 向中林, 强晓焕. 计算机图形学基础 (OpenGL 版). 第 2 版. 北京. 清华大学出版社. 2014. 18-120
- [3] 黄华, 张磊. 现代计算机图形学基础. 第 1 版. 北京. 清华大学出版社. 2020. 20-205