

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)
21301032	邓人嘉	9	28	18	37	92

北京交通大学

计算机图形学期末课程论文

基于物理的渲染技术的分析与实现

Analysis and Implementation of Physically Based Rendering Techniques

学 院： 软件学院

专 业： 软件工程

学生姓名： 邓人嘉

学 号： 21301032

北京交通大学

2024 年 6 月

中文摘要

摘要：基于物理的渲染（Physically Based Rendering, PBR）是一种通过模拟光线与物体表面相互作用的物理过程来生成高度真实感图像的技术。本文首先介绍了 PBR 的研究背景和发展历史，阐述了传统光照模型和 PBR 技术的区别。随后，详细介绍了 PBR 基础理论中的微平面理论、能量守恒和双向反射分布函数（BRDF），主要分析了 Cook-Torrance BRDF 模型。本文在实时渲染环境下实现了金属度和粗糙度两类 PBR 材质，通过实验分析了这两种材质在不同参数下的光照表现。实验结果证实了 PBR 材质在提高渲染真实度方面的优越性。

关键词：基于物理的渲染，PBR 材质，实时渲染，双向反射分布函数

目 录

中文摘要	1
目 录	2
1 引言	3
1.1 研究背景	3
1.2 相关工作	3
1.3 本文工作内容	4
2 PBR 基础理论	5
2.1 微平面理论	5
2.2 能量守恒	5
2.3 双向反射分布函数	6
3 PBR 材质实现	8
3.1 金属度材质的实现	8
3.2 粗糙度材质的实现	8
3.3 Cook-Torrance 反射率方程	9
4 实验	10
4.1 金属度实验	10
4.2 粗糙度实验	11
5 总结	13
参考文献	14

1 引言

1.1 研究背景

基于物理的渲染（Physically Based Rendering, PBR）是一种通过模拟光线与物体表面相互作用的物理过程来生成高度真实感图像的技术^[1]。PBR 的出现和发展极大地提高了图像的视觉质量。

在 PBR 出现前，渲染技术主要依赖于经验模型和简单的光照计算，包括 Phong 反射模型^[2]、Blinn-Phong 反射模型^[3]以及 Gouraud 和 Lambertian 光照模型^{[4][5]}。尽管这些模型在计算复杂度上较低，并且能够生成基本的光照效果，但它们并不能准确地模拟现实世界中光线与材质的相互作用。

PBR 被提出后^[1]，经过迅速发展，已经在离线渲染领域被广泛运用，比如在电影、动画中，显著提高了电影和动画特效的真实性。PBR 使得实时渲染也突破了传统的塑料感，带来了更丰富的物理材质，也一定程度上提高了实时渲染场景下的真实性，比如游戏。但是出于运行性能的考虑，PBR 在实时渲染领域的渲染效果相对于离线渲染仍然有一定距离。

1.2 相关工作

传统的 PBR 技术。 PBR 首次由马特·法尔提出^[1]。PBR 技术通常需要满足微平面理论和能量守恒^{[6][7][8]}。双向反射分布函数（BRDF）是对光照反射模型的数学建模，PBR 一般需要使用基于物理的 BRDF，其中 Cook-Torrance BRDF^[6]被广泛使用。迪士尼提出的基于迪士尼原则的 BRDF^[9]也受到很多关注。PBR 在虚幻 4 游戏引擎中被运用后^[10]，在游戏行业内也产生了巨大的影响力^{[11][12]}。

与人工智能（AI）结合的 PBR 技术。随着人工智能技术的兴起，越来越多的研究者开始关注人工智能与计算机图形学的交叉研究。在最近的研究中，StableMaterials^[10]结合半监督学习和潜在扩散模型（LDM），用于生成逼真的 PBR 材质。EASDS^[13]结合了 3D 形变模型（3DMM）和生成对抗网络（GANs），提出了自动生成高质量多样 PBR 面部纹理的新方法。

1.3 本文工作内容

本文详细介绍了 PBR 基础理论中的比较重要的微平面理论、能量守恒和双向反射分布函数，并在实时渲染环境下实现了金属度、粗糙度两类 PBR 材质，最后对这两类 PBR 材质进行了实验。

2 PBR 基础理论

PBR 不像 Lambert、Phong 等算法那样是一个特定的算法，PBR 上是一类算法或者技术的统称。因此 PBR 的理论也是非常多的，本章主要介绍 PBR 基础理论中最常见的微平面理论、能量守恒和双向反射分布函数（BRDF）。

2.1 微平面理论

微平面理论^[6]指的是物体表面上的一点是由很多朝向各异且光学平的微小表面组成。所有 PBR 技术都是基于微平面理论的。从现实的物理物理来看，在微观尺度下，没有任何平面是完全光滑的，正是这种物理特性，造成了物体观感上的不同。因此，微平面理论也是 PBR 的底层理论。

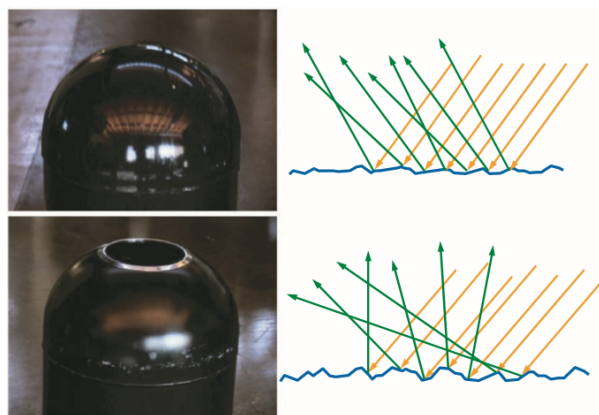


图 2-1: 微平面理论示意图

如图2-1所示，如果法线的分布较为集中一致时，那么可以认为微平面的法线都和垂直方向挨得很近，反射的光将会形成镜面效果，类似金属反光。但是如果法线分布的方向较为松散平均，那么就可以认为微平面的法线都和垂直方向成角较大，那么，光反射的方向比较分散，不会产生高光。

2.2 能量守恒

能量守恒要求一个表面反射的光能不会超过入射的光能。如图2-2所示，入射光的一部分能量通过折射被物体吸收，另一部分作为反射光传播，因此，反射光的能量必然会小于入射光的能量。

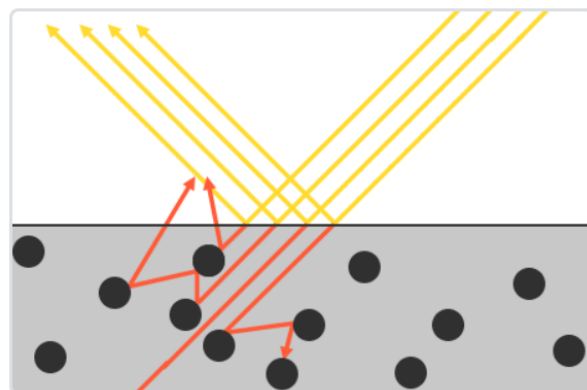


图 2-2: 能量守恒示意图

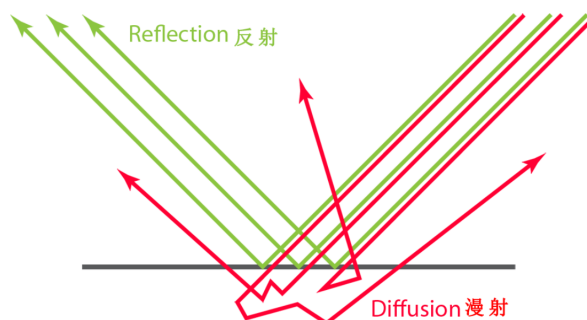


图 2-3: 反射与漫射示意图

如图2-3所示，当光线碰撞到物体表面时，会分离成反射部分和折射部分。反射部分是被表面直接反射的光线，即镜面反射光照。而折射部分是进入物体内部并在内部多次散射后再从表面出射的光线，即漫反射光照。

光线在物体表面的反射和折射比例由菲涅耳效应（Fresnel Effect）决定。菲涅耳效应描述了不同入射角下反射率和折射率的变化，当光线从一种介质进入另一种介质时，其反射率 $F(\theta)$ 可以通过以下公式计算：

$$F(\theta) = F_0 + (1 - F_0) \cdot (1 - \cos \theta)^5 \quad (2-1)$$

其中 F_0 是垂直入射时的反射率（通常对于非金属材料， F_0 约为 0.04，对于金属材料， F_0 则与其本身的光学特性有关）。 θ 是入射光线与表面法线之间的夹角。

2.3 双向反射分布函数

双向反射分布函数（BRDF）定义了光线从一个方向入射到表面并从另一个方向反射出来的比例。BRDF 通过入射光方向 ω_i 、出射光方向 ω_o 、平面法线 n 和微平面粗糙程度 α 这四个参数计算出反射比例。

现代几乎所有实时渲染管线都使用 Cook-Torrance BRDF^[6]，它将所有反射光分成两

部分：漫反射和镜面反射。其公式为：

$$f_r = k_d f_{\text{lambert}} + k_s f_{\text{cook-torrance}} \quad (2-2)$$

k_d 是入射光线中被折射部分的能量所占的比率, 而 k_s 是是被反射部分的比率。BRDF 的左侧表示的是漫反射部分, 右侧是镜面反射部分。

漫反射项 f_{lambert} 表示为:

$$f_{\text{lambert}} = \frac{C}{\pi} \quad (2-3)$$

其中, C 表示表面的颜色值, 除以 π 进行标准化。

Cook-Torrance BRDF 的镜面反射部分包含三个主要组成部分: 法线分布函数 (Normal Distribution Function, D)、菲涅耳项 (Fresnel Term, F) 和几何项 (Geometry Function, G)。其公式为:

$$f_{\text{cook-torrance}} = \frac{DFG}{4(\omega_o \cdot n)(\omega_i \cdot n)} \quad (2-4)$$

法线分布函数 D 估算在受到表面粗糙度的影响下, 朝向方向与半程向量一致的微平面的数量。常用的分布函数包括 GGX 分布。

菲涅耳项 F 描述了光线入射角度对反射率的影响, 通常由式2-1近似得到。

几何项 G 描述了微表面之间的相互遮挡和阴影效应, 常用的几何遮蔽函数包括 SchlickGGX 几何函数。

3 PBR 材质实现

在实时渲染中，PBR 通常关注材质着色。本文在实时渲染环境下实现了金属度、粗糙度两种材质。

3.1 金属度材质的实现

金属度 `metallic` 取值范围为 $[0, 1]$ 。金属度材质影响表面的反射属性，主要通过调整菲涅耳项（ F ）来实现。此式子已在2-1中提到。

$$F(\theta) = F_0 + (1 - F_0) \cdot (1 - \cos \theta)^5 \quad (3-1)$$

其中 $F(\theta)$ 是在入射角 θ 下的菲涅耳反射率， F_0 是在法线方向的反射率，对于金属材质， F_0 通常等于材质的反射颜色，对于非金属材料， F_0 通常是一个固定值（如 0.04）， θ 是视角方向与半程向量之间的夹角。

混合金属和非金属反射率：

$$F_0 = \text{mix}(\vec{F}_0^{\text{non-metal}}, \vec{F}_0^{\text{metal}}, \text{metallic}) \quad (3-2)$$

其中，`metallic` 是材质的金属度属性。`mix` 用于在非金属反射率 $\vec{F}_0^{\text{non-metal}}$ 和金属反射率 \vec{F}_0^{metal} 之间进行线性插值，公式是：

$$\text{mix}(a, b, t) = a \cdot (1 - t) + b \cdot t \quad (3-3)$$

3.2 粗糙度材质的实现

粗糙度 `roughness` 的取值范围为 $[0, 1]$ 。粗糙度材质影响法线分布函数（ D ）和几何函数（ G ）。

法线分布函数（ D ）公式：

$$D_{\text{GGX}}(n, h, \alpha) = \frac{\alpha^2}{\pi((n \cdot h)^2(\alpha^2 - 1) + 1)^2} \quad (3-4)$$

其中 n 是表面法线， h 是半程向量， $h = \frac{\omega_o + \omega_i}{|\omega_o + \omega_i|}$ ， $\alpha = \text{roughness}^2$ 。

几何函数（G）公式：

$$G_{\text{Smith}}(n, \omega_o, \omega_i, \alpha) = G_{\text{SchlickGGX}}(n, \omega_o, \alpha) \cdot G_{\text{SchlickGGX}}(n, \omega_i, \alpha) \quad (3-5)$$

其中 $G_{\text{SchlickGGX}}$ 的公式为：

$$G_{\text{SchlickGGX}}(n, \omega, \alpha) = \frac{n \cdot \omega}{(n \cdot \omega)(1 - k) + k} \quad (3-6)$$

$$k = \frac{(\alpha + 1)^2}{8} \quad (3-7)$$

3.3 Cook-Torrance 反射率方程

到此 Cook-Torrance BRDF 也就是式子2-4要求的均已完成。于是把 Cook-Torrance BRDF 放入最终的反射率方程中去：

$$L_o(p, \omega_o) = \int_{\Omega} \left(k_d \frac{c}{\pi} + k_s \frac{DFG}{4(\omega_o \cdot n)(\omega_i \cdot n)} \right) L_i(p, \omega_i)(n \cdot \omega_i) d\omega_i \quad (3-8)$$

这个方程完整地描述了一个基于物理的渲染模型（PBR）。

4 实验

4.1 金属度实验

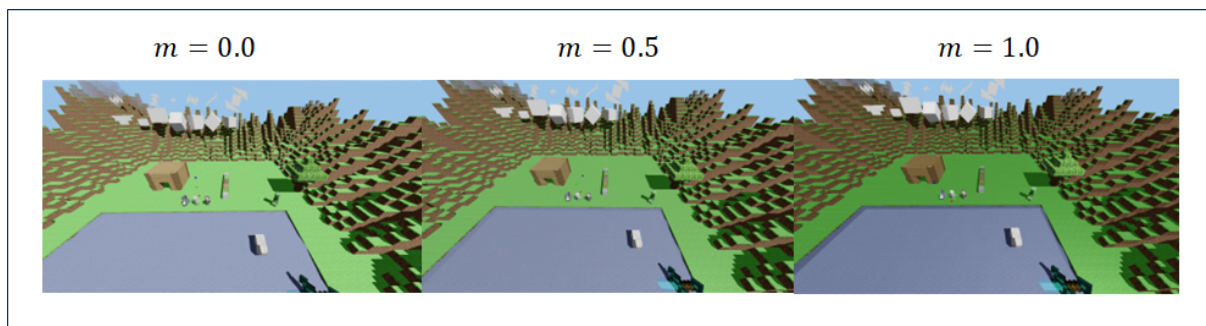


图 4-1: 金属度不同时光照表现

如图4-1所示，在固定粗糙度的情况下，当金属度 $m = 0.0$ 时，画面亮度较高，而且物品表面有塑料感，显得不真实。

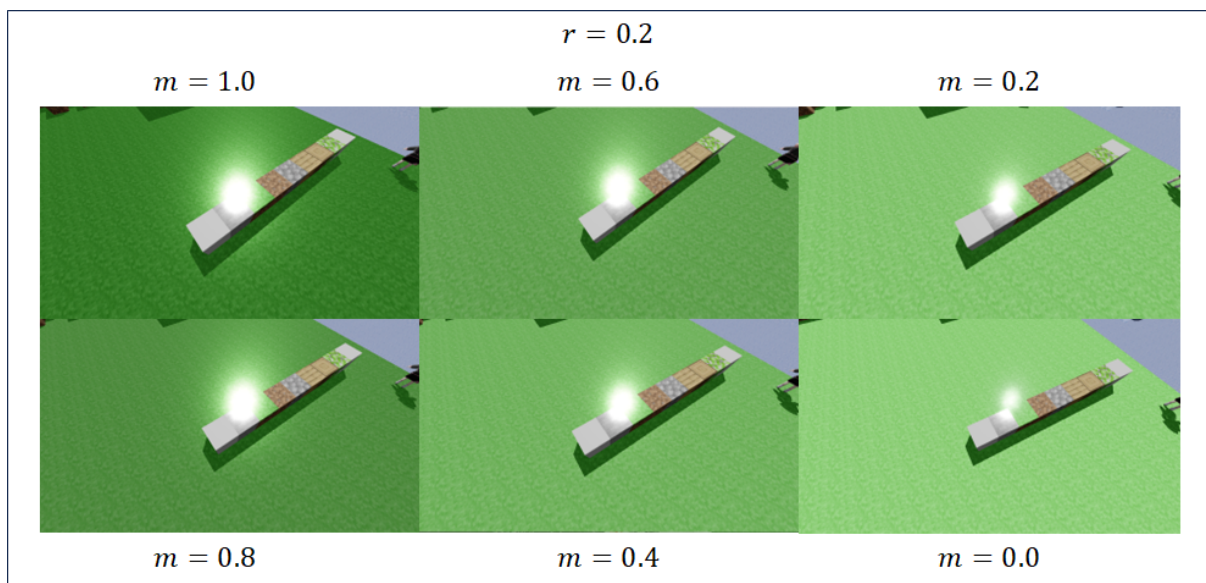


图 4-2: 金属度不同时的整体光照表现

在接下来的实验中，每次实验中草地的粗糙度 r 的值是不变的，对草地的金属度 m 取 1.0、0.8、0.6、0.4、0.2、0.0 六种取值并进行比较。石头作为对照物体，粗糙度和金属度都是完全不变的。

如图4-2所示，在固定草地的粗糙度为 $r = 0.2$ 的情况下，随着金属度的减小，太阳光在草地上的镜面反射面积也在慢慢减小，但由于粗糙度 $r = 0.2$ 比较小，所以即使金属度 $m = 0.0$ ，依然会有较强的反射光。

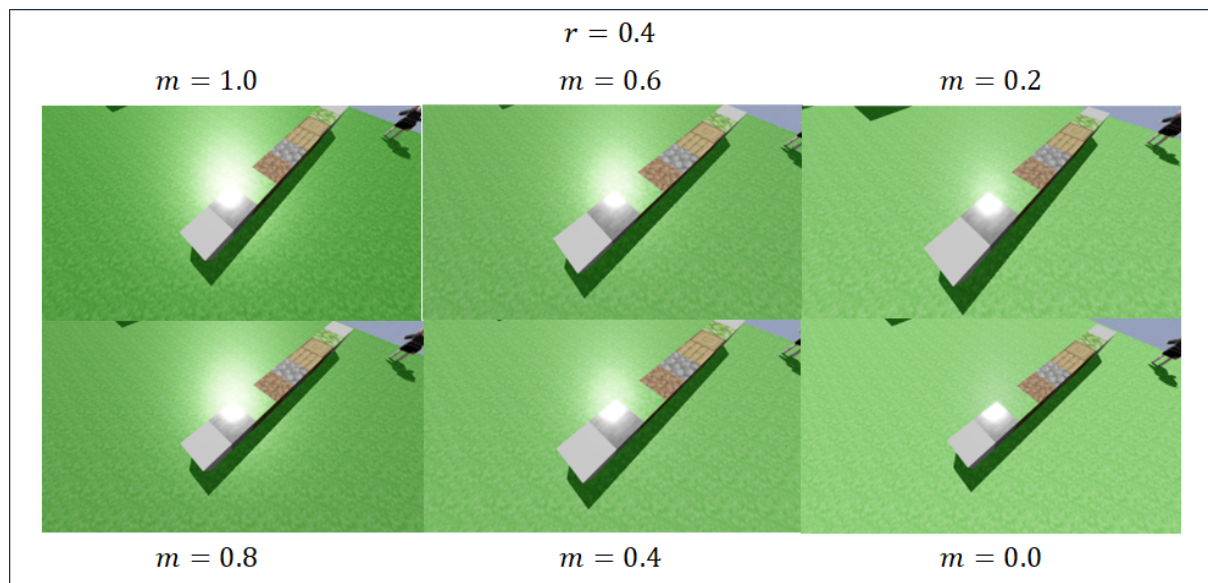


图 4-3: 金属度不同时的石头与草地的光照表现

如图4-3所示, 在固定草地的粗糙度 $r = 0.4$ 的情况下, 草地的漫反射效应非常明显。当草地的金属度 m 为 0.8 或 1.0 时, 其亮度与石头的亮度一致。但是当草地的金属度 $m < 0.8$ 时, 石头的亮度显著高于草地。当草地金属度 $m = 0$ 时, 几乎没有反射光了。不同物体在不同材质参数下, 是能够得到各自最好的渲染结果的, 能够增强物体真实性。

4.2 粗糙度实验

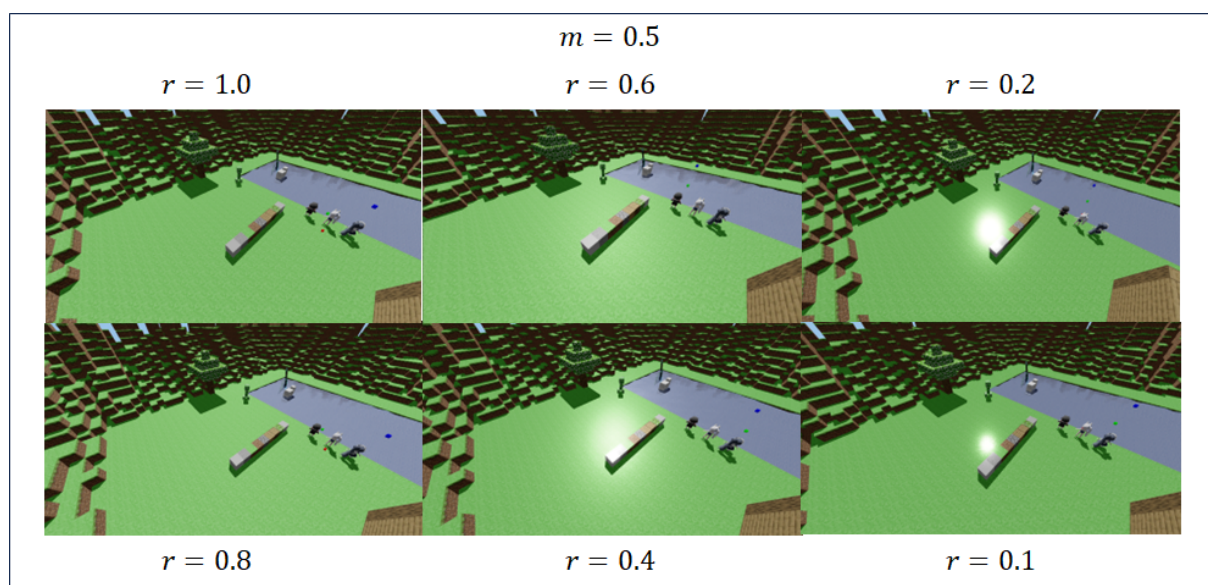


图 4-4: 粗糙度不同时的地面光照表现

如图4-4所示, 在这个实验中, 我们设置所有物体的金属度 $m = 0.5$, 调整 r 的值对比光照效果。随着 r 的降低, 反射光逐渐从漫反射转变为镜面反射, 画面的亮度也在降

低。可以观察到当 $r=0.6$ 时，光照是最自然的，场景是最真实的。

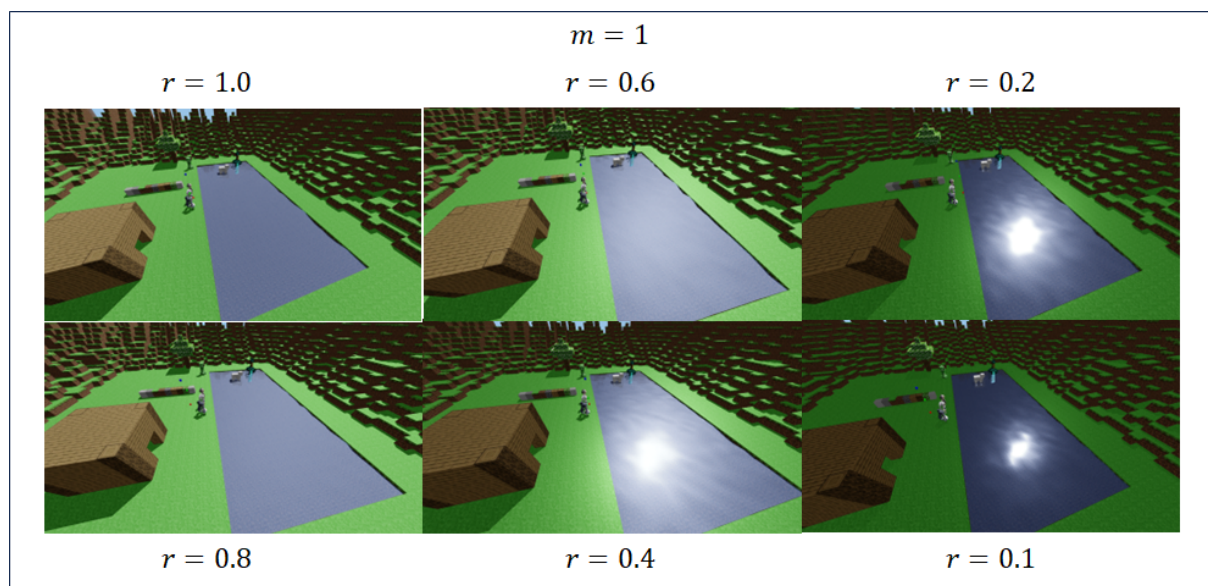


图 4-5: 粗糙度不同时的地面光照表现

如图4-5所示，测试了 PBR 在水面上的效果。固定了金属度为最大值 $m = 1$ 。 r 的值取 0.1、0.2、0.4、0.6、0.5、1.0 六种进行实验。可以观察到 $r \geq 0.6$ 时，主要是漫反射，光照比较温和，画面具有很强的真实性。 $r = 0.4$ 时，镜面反射和漫反射同时存在，水面效果也非常真实。 $r \leq 0.2$ 时，主要是镜面反射。

5 总结

本文介绍了基于物理的渲染（PBR）的研究背景、相关工作，并对其基础理论中的微平面理论、能量守恒和双向反射分布函数进行了阐释。利用 Cook-Torrance BRDF 实现了金属度、粗糙度两种 PBR 材质，并通过多次实验分析了不同参数值下的光照表现。实验结果表明，在合适的 PBR 材质参数下，渲染环境的真实性会显著增强。

参考文献

- [1] PHARR M, JAKOB W, HUMPHREYS G. Physically based rendering: From theory to implementation[M]. MIT Press, 2023.
- [2] PHONG B T. Illumination for computer generated pictures[G]//Seminal graphics: pioneering efforts that shaped the field. 1998: 95-101.
- [3] BLINN J F. Models of light reflection for computer synthesized pictures[C]//Proceedings of the 4th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. 1977: 192-198.
- [4] GOURAUD H. Continuous shading of curved surfaces[G]//Seminal Graphics: Pioneering efforts that shaped the field. 1998: 87-93.
- [5] OREN M, NAYAR S K. Generalization of Lambert's reflectance model[C]//Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques. 1994: 239-246.
- [6] COOK R L, TORRANCE K E. A reflectance model for computer graphics[J]. ACM Transactions on Graphics (ToG), 1982, 1(1): 7-24.
- [7] TORRANCE K E, SPARROW E M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces [J]. Josa, 1967, 57(9): 1105-1114.
- [8] WALTER B, MARSCHNER S R, LI H, et al. Microfacet models for refraction through rough surfaces[C]//Proceedings of the 18th Eurographics conference on Rendering Techniques. 2007: 195-206.
- [9] BURLEY B, STUDIOS W D A. Physically-based shading at disney[C]//Acm Siggraph: vol. 2012. 2012: 1-7.
- [10] VECCHIO G. StableMaterials: Enhancing Diversity in Material Generation via Semi-Supervised Learning[Z]. 2024. arXiv: [2406.09293](#).
- [11] PRANCKEVIČIUS A, DUDE R. Physically based shading in Unity[C]//Proceedings of the Game Developer' s Conference. 2014: 17.
- [12] LAGARDE S, DE ROUSIERS C. Moving frostbite to physically based rendering 3.0[J]. SIG-GRAPH Course: Physically Based Shading in Theory and Practice, 2014, 3.
- [13] WANG C, HUANG J, ZHANG R, et al. Text-Driven Diverse Facial Texture Generation via Progressive Latent-Space Refinement[Z]. 2024. arXiv: [2404.09540](#).