

Lab-2



图形绘制技术

Graphic Rendering Technology

Lab2-材质模型

2023 春季学期

目录

1 经验模型	3
1.1 课堂回顾	3
1.2 实验任务	3
2 基于物理的模型	4
2.1 课堂回顾	4
2.2 实验任务	6
3 说明	6
3.1 作业提交	6
3.2 评分	7
3.3 其他	7

Abstract

该文档是南京大学计算机系 2023 春季学期《图形绘制技术》课程实验 2 的实验手册。

Lab2 的内容主要是回顾课程中重点提及的材质模型：经验模型、微表面模型。理解并实现经典模型的 BRDF。

各位同学如果在实验过程中有任何疑问或想法，包括但不限于

- 实验框架的出现的 Bug
- 手册中叙述不完善的部分
- 对实验安排的建议
- 更好的框架设计

主讲老师：过洁 Email : guojie@nju.edu.cn

欢迎联系助教，帮助我们完善课程的实验部分。TAs :

- 陈振宇 QQ : 895761580 Email : chenzy@smail.nju.edu.cn
- 袁军平 QQ : 1924188282 Email : 191250189@smail.nju.edu.cn
- 周辰熙 QQ : 1305845549 Email : 191250210@smail.nju.edu.cn
- 王宸 QQ : 1401520906 Email : chenwang@smail.nju.edu.cn

同时，课程的框架代码以及实验文档也会不断更新改进，请同学们关注助教发布的相关信息。

1. 经验模型

1.1 课堂回顾

1.1.1 Phong 光照模型

Phong 光照模型属于基于经验的材质模型。当一束光击中物体表面时，该模型假设反射光的能量由漫反射项（Diffuse）、高光项（Specular）和环境光项（Ambient）组成。

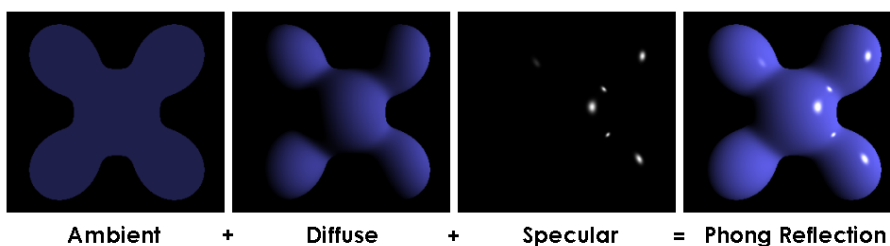


图 1: Phong 模型

通常的计算公式如下：

$$\begin{aligned}
 L &= L_a + L_d + L_s \\
 &= k_a I_a + k_d \frac{I}{r^2} \mathbf{n} \cdot \mathbf{l} + k_s \frac{I}{r^2} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{l}_r)^p
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中，

- $\mathbf{n}, \mathbf{l}, \mathbf{l}_r, \mathbf{v}$: 分别是物体表面法线方向，光照方向（从物体表面看向光源），光照反射方向，视点观察方向（从物体表面看向眼睛）
- L, L_a, L_d, L_s : 分别是光从 \mathbf{l} 入射到 \mathbf{v} 出射的能量，环境光的贡献，漫反射的贡献，高光的贡献
- I, I_a : 分别是光源的强度和环境光的强度
- r : 光源到物体表面的距离
- k_a, k_d, k_s : 分别是三部分贡献的系数
- p : 高光衰减系数

1.2 实验任务

1. 补全 Phong 光照模型的代码，即FunctionLayer/Material/BxDF/Phong.h文件中PhongReflection类中的f()方法；

2. 对比不同 k_d, k_s, p 参数对表面绘制结果的影响;
3. 请回答: 什么情况下, 原始的 Phong 模型 (公式1) 会产生错误的结果?

2. 基于物理的模型

2.1 课堂回顾

2.1.1 微表面模型

微表面模型将表面材质看成由无数同种的微小表面组成的集合。其中, 微小表面如何排列 (每个微小表面分别朝向什么方向) 由法线分布函数描述。而微小表面既可以是镜面 (只有完美镜面反射), 对应 Torrance-Sparrow 模型, 也可以是粗糙的面 (只有漫反射), 对应 Oren-Nayar 模型。

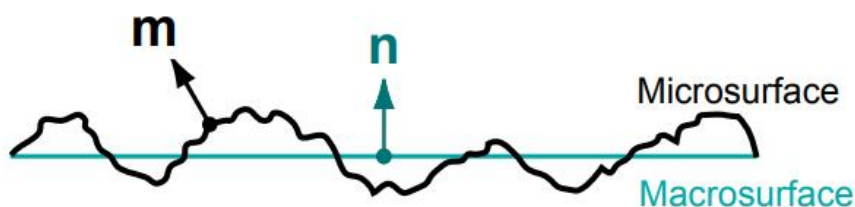


图 2: microfacet 模型

2.1.2 Oren-Nayar 模型

该模型假设微表面只有漫反射发生, 其 BRDF 的基本形式是:

$$f_r(\omega_o, \omega_i) = \frac{\rho}{\pi} (A + B \max(0, \cos(\phi_i - \phi_o)) \sin \alpha \tan \beta) \quad (2)$$

$$A = 1 - \frac{\sigma^2}{2(\sigma^2 + 0.33)}, B = \frac{0.45\sigma^2}{\sigma^2 + 0.09}, \alpha = \max(\theta_o, \theta_i), \beta = \min(\theta_o, \theta_i) \quad (3)$$

其中, σ 为粗糙度系数, ϕ, θ 为向量在球坐标系下在坐标 (θ 是向量与 y 轴的夹角)。

值得注意的是, 课堂中局部坐标系的 z 轴朝上, 而作业框架中是以 y 轴朝上实现的。

2.1.3 Torrance-Sparrow 模型

该模型假设微表面只有镜面反射发生, 其 BRDF 的基本形式是:

$$f_r(p, \omega_o, \omega_i) = \frac{D(\omega_h)G(\omega_o, \omega_i)F_r(\omega_o)}{4(\mathbf{n} \cdot \omega_o)(\mathbf{n} \cdot \omega_i)} \quad (4)$$

其中, p 表示光线击中的物体表面, n 为该表面的宏观法线方向, ω_o, ω_i 分别表示光线出射方向 (out) 和入射方向 (in), ω_h 或者写为 m 为微观表面法线 (也是光线入射出射方向的半程向量), D 为材质表面的法线分布函数, G 为材质表面的几何衰减项, F_r 为菲涅尔反射项。

另外有许多法线分布函数 (Normal Distribution Function, NDF) 的数学模型, 其中最常见两种模型是: Beckmann-Spizzichino 模型 (简称 Beckmann 模型) 和 Trowbridge-Reitz 模型 (更常见的名称是 GGX 模型)。其各向同性的函数形式分别是:

$$D_b(\omega_h) = \frac{e^{-\frac{\tan^2 \theta}{\alpha^2}}}{\pi \alpha^2 \cos^4 \theta} \quad (5)$$

$$D_{tr}(\omega_h) = \frac{\alpha^2}{\pi \cos^4 \theta (\alpha^2 + \tan^2 \theta)^2} \quad (6)$$

其中, 参数 α 决定了函数分布的幅度, 由表面的粗糙度决定; θ 为微观法线与宏观法线的夹角。

对于微观表面上光能量的几何衰减可以由微观几何遮挡 (Shadowing and masking) 来表示。

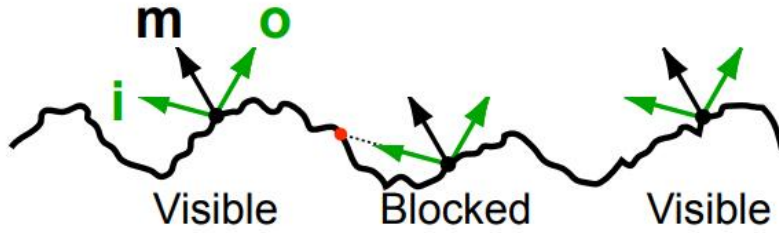


图 3: 微观几何遮挡

Smith 等人提出入射光线和出射光线在微观几何上的遮挡关系可以近似认为是独立的, 即:

$$G(\omega_i, \omega_o) \approx G_1(\omega_i)G_1(\omega_o) \quad (7)$$

其中 G_1 与法线分布函数相关, 因此, 对于 Beckmann 模型和 GGX 模型, 其几何遮挡函数 G_1 是确定的, 分别是:

$$G_1^b(\omega) \approx \begin{cases} \frac{3.535a+2.181a^2}{1+2.276a+2.577a^2}, & a < 1.6 \\ 1, & otherwise \end{cases} \quad (8)$$

$$G_1^{tr}(\omega) = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \alpha^2 \tan^2 \theta_v}} \quad (9)$$

其中 $a = \frac{1}{\alpha \tan \theta_v}$, θ_v 是光线方向与宏观法线的夹角。

此外，菲涅尔项体现物体表面的菲涅尔效应，在不考虑偏振现象时，菲涅尔方程可以近似为：

$$F_r = R_0 + (1 - R_0)(1 - \cos \theta)^5 \quad (10)$$

被称为 Schlick 近似，其中 R_0 与具体的材质有关，指在反射角为 0 时的菲涅尔系数； θ 是入射方向与法线的夹角。

通常情况下，导体（Conductor）和电介质（Dielectric）材质具有不同的菲涅尔效应，其对应的菲涅尔方程也不同，而在 Schlick 近似下， R_0 的计算方式不同，分别为：

$$R_0^{conductor} = \frac{(\eta - 1)^2 + \eta_k^2}{(\eta + 1)^2 + \eta_k^2} \quad (11)$$

$$R_0^{dielectric} = \frac{(\eta - 1)^2}{(\eta + 1)^2} \quad (12)$$

其中， η 为材质的折射率，真空的折射率假设为 1，而 η_k 为导体折射率的虚部（也叫消光系数，当光通过介质时，总有一部分能量被吸收，而电介质吸收的能量很小可以忽略不计，而导体吸收的能量往往占比较多，通常使用复数的虚部表示）。

2.2 实验任务

1. 实现 Oren-Nayar 模型；
2. 实现 Conductor 材质各向同性的微表面模型，可以选择实现 Beckmann 模型和 GGX 模型或者课堂中提到的任意两种模型（对应不同的 NDF、G）；
3. (选做) 实现 Dielectric 材质各向同性的微表面模型，可以选择实现 Beckmann 模型和 GGX 模型或者课堂中提到的任意两种模型（对应不同的 NDF、G）。

3. 说明

3.1 作业提交

在教学立方提交 pdf 格式实验报告和关键源码，包括以下内容：

- 各个材质模型的实现
- 实现结果的展示与分析
- 对实验的建议和吐槽

3.2 评分

1. Phong 模型：5 分，三个任务分别对应 2、2、1；
2. Oren-Nayar 模型：4 分；
3. Conductor 材质各向同性的微表面模型：两种模型，每种 NDF 2 分，G 2 分，BRDF 4 分，总共 12 分 ($2*2+2*2+4$)；
4. 报告：4 分，包含运行结果截图、分析等，逻辑清晰。

3.3 其他

3.3.1 场景与代码说明

本次实验的默认场景在 `examples/lab2-test/` 目录下，分别对应 Phong 材质、Oren-Nayar 材质、Conductor 材质和 Dielectric 材质。

如若实现 GGX 和 Beckmann 以外的模型，需要仿照已有的 GGX 或 Beckmann NDF 的代码，实现虚类 `class NDF`，并添加对应 json 解析的逻辑。

3.3.2 扩展

本次作业的默认渲染结果只包含直接光照的结果，即光线在场景中最多弹射一次，因此，对于材质的细节并不能完全展示，如 Dielectric 材质的透射现象无法模拟。若对此感兴趣，可继续实现各个 BSDF 类中对应的 `sample()` 方法，正确获取下次弹射光线的采样方向和概率，同时将 json 文件中的 "integrator" 积分器类型换成 "path"，并添加最大光线深度 "maxDepth"，例如：

```
1 "integrator" : {  
2   "type" : "path",  
3   "maxDepth": 5  
4 },
```