



▲

赞同 479

🚀

分享

浅谈PBR：从光学原理到基于物理的渲染

 wangchi

关注他

▲ 你关注的 冬天默默 赞同

正在前不久，计算机图形学的学术界与工业界一年一度的顶级盛会SIGGRAPH 2018在加拿大温哥华举行。这次盛会重磅的新闻之一就是NVIDIA发布了一系列支持光线追踪技术的显卡。光线追踪是计算机图形学离线渲染的核心技术，顾名思义，他通过对光线进行追踪，使用遵循基本物理规律（physically plausible）的模型，去计算光线在场景中传输过程能量的变化过程，从而用来生成具有高度真实感的图像。从现在最先进的技术来看，使用光线追踪技术完全可以生成人眼真假难辨的图片。

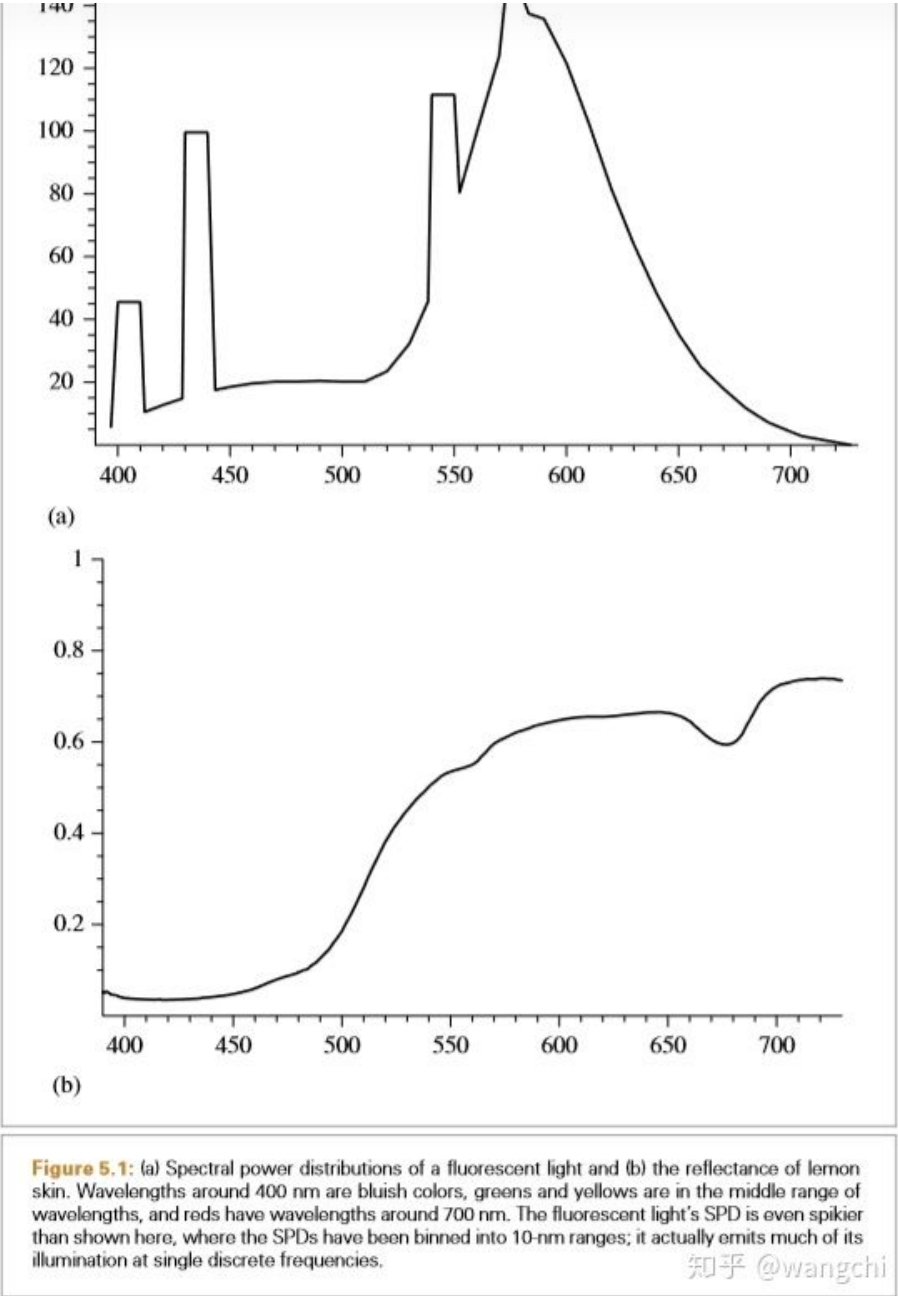
NVIDIA的新技术的发布，极大的拉近了实时渲染和离线渲染的鸿沟，随着光线追踪技术的支持，实时渲染的发展轨迹，必然是将离线渲染技术往实时渲染里引入。本人在在校期间一直痴迷于离线渲染技术，对基于物理渲染的理论和研究现状略知一二，在此和大家分享。本文从基于物理的角度出发，介绍在离线渲染领域，如何更快速、更准确的获得渲染结果。

1. Let's talk about optics.

基于物理的渲染中的理是物理中的光学，所以，一切要从光开始说起。

光的本质是电磁波，是一种振动方向与其传播方向相垂直的横波（波动光学渲染依据），同时具有粒子特性（光子追踪的依据）。光在传播的过程中，遇到介面会发生反射与折射的现象（BRDF依据），遇到粒子会发生散射（瑞利散射、米散射）的现象（天空光渲染、体积光依据），对于这一过程，可以理解为物质将光的能量吸收，并向其他方向发射出去。

波长是电磁波的属性，人眼可以感受到的电磁波范围约为400nm-700nm。光谱（Spectrum）可以对光在此一定范围内的能量进行度量，光谱的分布情况（谱密度分布SPD），决定了光的颜色，下图a和b分别为荧光灯和柠檬的颜色（截图自PBRT section 5）。



荧光灯和柠檬的谱密度分布

那么，在计算机中，我们一般是使用下面的方法将光谱转化成颜色：（1）SPD表达，比如用30个变量表示光在400-700nm每隔10nm的能量，（2）将SPD转化成XYZ颜色坐标系中的颜色（x,y,z）（3）将（x,y,z）转化成常见的sRGB坐标系中（r, g, b）;（4）gamma校正并进行tone mapping。转换成XYZ颜色的好处是，XYZ颜色与显示设备无关，因此常用来做各种颜色空间转换的中间媒介

下图展示了经典的Cornell Box场景在410, 450, 500, 550, 600, 650以及700nm波长处的强度图像（来自cgg.mff.cuni.cz/ART/gal...）



不同波长下的Cornell Box

那么，物体是如何被照射产生颜色呢，其实也是和光谱密切相关，粗略的说，如果一束白光照射到物体上，如果物体把从红光到绿光波段（550nm-700nm）的能量吸收了，那么物体就呈现出蓝色了，这也引出另一个问题，就是在做基于物理的渲染的时候，需要注意光源的谱密度分布，因为，

使用光谱信息的最主要的原因，在现实世界中，很多物体与光发生作用的时候与波长有关，比如，最典型的例子，就是金属的折射系数（index of refraction）会随着波长的变化而变化。这里插一句，一般认为非金属的折射系数不随着波长的变化而变化，在一般情况下，这是成立的，但是对于某些非金属，确实存在有变化的案例，比如二氧化锆（ZrO2）。还有一个使用光谱的原因，就是可以模拟出色散（三棱镜产生彩虹色）、荧光（能量在不同波长上的转移）等效应。

目前绝大多数的渲染，都使用RGB三个值来进行，这相当于在400-700nm中只采样了三个点去近似整个SPD。由于计算性能受限，这也是无奈之举。不过，若干年后，当光线跟踪飞入寻常百姓家的时候，光谱渲染，可能就成为那时的次时代技术了。

在图形学中，我们一般使用下面几个物理量去度量光的能量：

- (1) 辐射通量（Flux），即单时间的辐射能量，单位J/s, or 瓦特 W
- (2) 辐照度（Irradiance）,到达单面的辐射通量
- (3) 辐射度（Radiance），考察表面 A的一部射的能，表示单立体角 ω 内单投影面 A的辐射通量，一般用L表示。

在光线追踪的过程中，一般使用辐射度去对光进行度量，使用辐射度的原因，是因为，通过对辐射度在不同域上进行积分，可以获得辐照度、强度（Intensity）、辐射通量等各个量。

2. The way to PBR

在本人看来，PBR应该包括基于物理的全局光照算法加上光学(光照+反射)模型（light transportaion simulation + physically based lighting and reflectance model）

2.1 光线传输仿真算法（light transportaion simulation）

在现实世界中，光从光源出发，直接、经过多次物体碰撞最终进入人眼or相机。而在渲染的过程中，我们希望从虚拟相机发射一束光，追踪其在场景中的“随机”碰撞的过程。有的光线无法到达光源，那么这束光路就没有被照亮（and 这次计算就浪费了）；而有的光线可以到达光源，那么沿途各个碰撞点的物体就被照亮了。

所以，光线传输算法的本质，是希望“构建一条从相机到光源的路径”；而构建的过程，本质上是在3D空间中进行路径的“采样”；而提高算法效率的核心在于提高“采样”效率。

上面说到，光从光源出发，在传输的过程中，可能直接到达观测点、可能经过单次反射后到达观测点（直接光照）、也可能经过多次散射以后到达观测点（间接光照）。现下的实时渲染技术，可以模拟前两种情形，但是从渲染管线的层面，由于需要进行大量的光线-物体相交测试，因而无法处理多次散射的情形。

基于物理的光线传输仿真算法需要对渲染方程进行正确的求解。那我们先从反射方程说起，

反射方程：

$$L_o(\mathbf{x}, \omega_o) = L_e(\mathbf{x}, \omega_o) + \int_{H(\mathbf{x})} L_i(\mathbf{x}, \omega_i) \cdot f_r(\mathbf{x}, \omega_i \rightarrow \omega_o) \cdot \cos \theta_i \, d\omega_i$$

反射方程

反射方程对在物体“局部”（物体上某一点）的光学反射过程进行描述，就是说在物体上的x点 ω_o 方向反射的光 L_o ，等于物体在x点向 ω_o 方向自发光的强度（ L_e ），加上，所有入射到x点的入射光 L_i 经过反射后，反射到 ω_o 方向的光（公式后面的积分）

我们将上面公式中的 L_i 进行替换，可以将局部反射扩展到全局的光线传输：

$$+ \int_{H(\mathbf{x})} L_o(\mathbf{r}(\mathbf{x}, \omega_i), -\omega_i) \cdot f_r(\mathbf{x}, \omega_i \rightarrow \omega_o) \cdot \cos \theta \, d\omega_i$$

知乎 @wangchi

同时去除Lo的下标，可以得到渲染方程：

$$L(\mathbf{x}, \omega_o) = L_e(\mathbf{x}, \omega_o) + \int_{H(\mathbf{x})} L(\mathbf{r}(\mathbf{x}, \omega_i), -\omega_i) f_r(\mathbf{x}, \omega_i \rightarrow \omega_o) \cos \theta \, d\omega_i$$


知乎 @wangchi

渲染方程

渲染方程也可以使用类似的思路去理解。反射方程和渲染方程看起来很像，不同之处在于Li和Lo不在出现在公式中，而一个未知量L出现在了公式的两端。

两者很像，然而两者具有不同的意义。我在多处课程中看到将反射方程和渲染方程混为一谈，其实是不正确的。反射方程对局部的反射进行了描述，而渲染方程是对整个场景中光能量的分布进行描述，这一点很重要，去除Lo的下标，让L出现在公式两端，是后续许多光线传输算法数学推导的基础。下图对渲染方程进行了简单的示意：

$$L = L_e + T \circ L$$

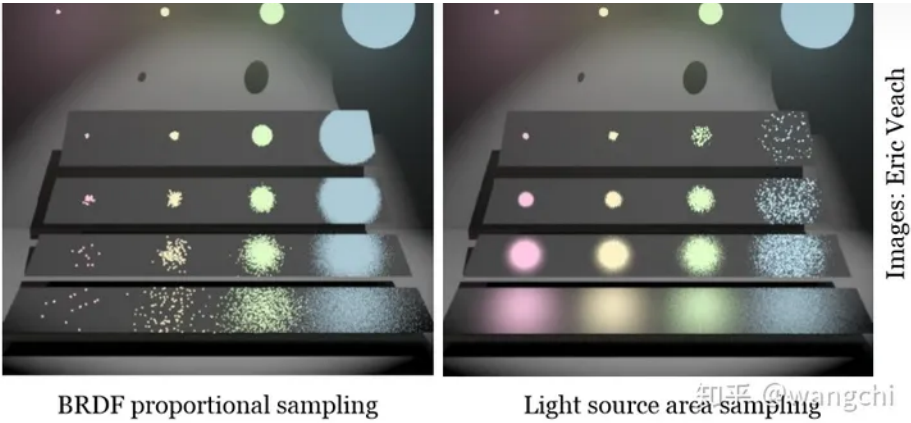


知乎 @wangchi

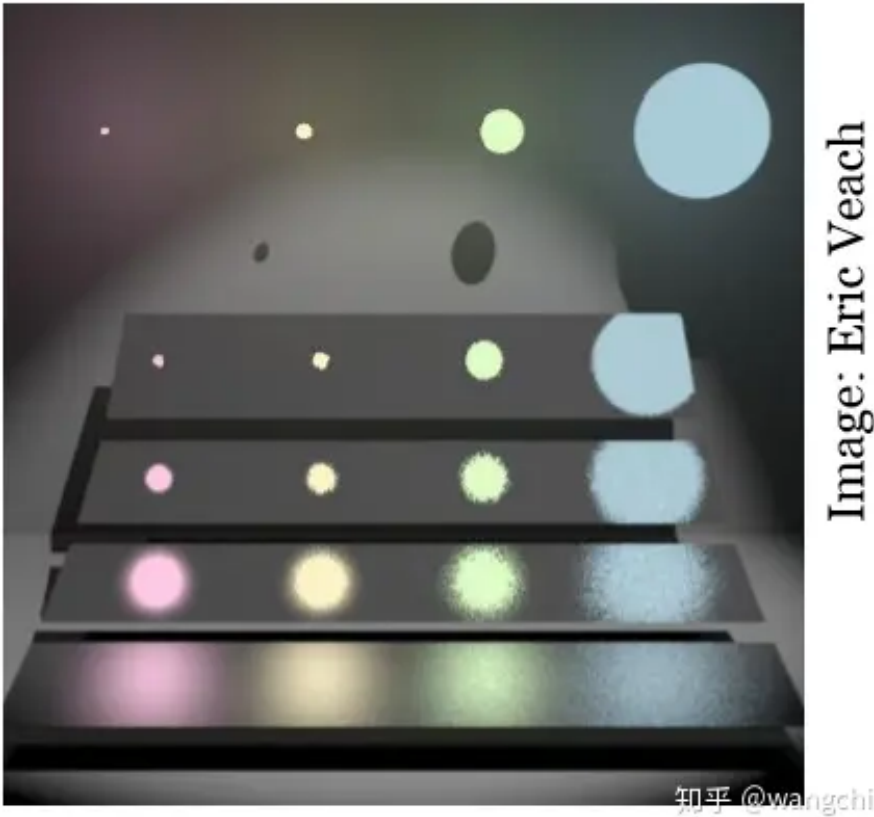
渲染方程示意

前面说到在离线渲染领域，对渲染方程求解的本质，是需要通过采样去构建一条从相机到光源的光路。对于构建这样的光路，可以从相机出发，也可以从光源出发，这就催生了渲染中的双向追踪技术 (bi-directional technique)，典型的双向追踪技术包括，双向路径追踪 (bi-directional path tracing) 和光子图(photon mapping)算法等等。构建光路的过程中可能存在很多困难，比如，光源很小，从相机发出的光线经过Random Walk (随机碰撞) 很难找到光源怎么办？（极端的情况，对于常用的点光源，光线通过Random Walk找到光源的概率为0），这时候，从光源发出光，去找相机可能会更高效；再比如，如果从相机发出光线，光线遇到光滑表面，产生镜像的反射方向，则这条反射方向，和相机发出的光线重合的概率，也为0；所以在离线渲染中，如何更有效的采样光路，是提高效率的关键，因为如果采样不当，不仅仅是渲染时间缓慢，更有可能只能得到全黑的图像。这中间涉及的经典方法，包括，重要性采样，多种重要性采样等等；近年来，越来越多的工作，将离线渲染和机器学习结合了起来，让机器记住能通往光源的区域，重点再此区域进行采样。

下图分别展示了，对BRDF进行采样、对光源进行采样，以及使用多重重要性采样的结果。



BRDF和光源采样的结果



多重重要性采样结果

综上，关于光线传输问题，其难点在于，

- (1) 渲染方程的求解，需要在统计的层面保证渲染方程求解的正确性，即离散化的数值期望等于渲染方程的积分值；
- (2) 光路的高效的采样。

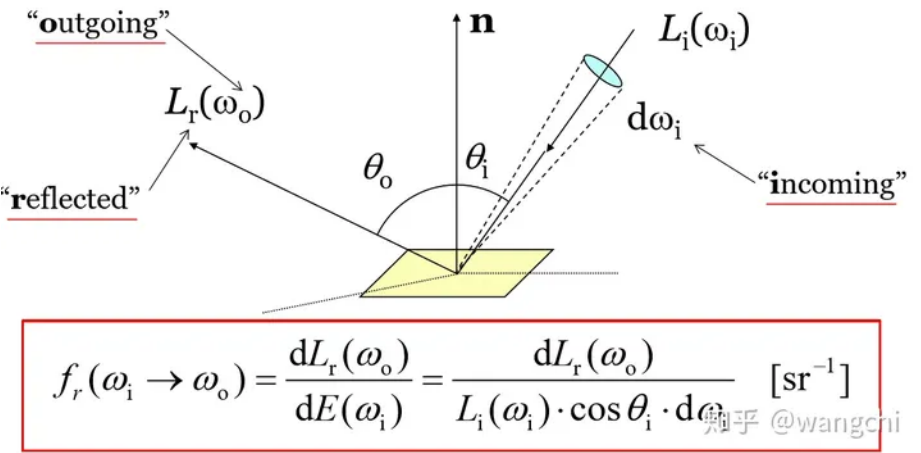
2.2. 基于物理的光学模型

这里主要包括光源的模型（light model）和光照反射模型(reflectance model).

光照模型可以说的不多，点光源、面光源都很熟悉，也没啥技术含量，现在从科研的角度来说，大多数集中于对天空光（skylight）的建模。因为太阳光经过大气层到达地面的过程中，会遇到大气分子（氧气、氮气）、以及气溶胶的散射，他的散射根据粒子的尺度可以使用瑞利公式、和米散射公式去计算，再加上太阳光在不同时刻的高度角方位角不同，所以比较复杂。目前最新的天空光模型是我导师12年在SIGGRAPH上发表Hosek-Wilkie模型，该模型早已开源，且可以通过预计算的方式生成贴图。

（散射）、BSSDF（次表面散射，用于模拟皮肤等），其中BSDF=BTDF+BRDF。图形学沿用了这些概念用于渲染中。

BRDF定义如下，他是反射光的辐射度 L_o 和入射光入射到表面产生的辐照度 E_i 的比值，他的取值范围是0到无穷大（不是0到1！！）。



BRDF是物体的本质属性，BRDF有两个重要的性质：

(1) energy conservation, 即能量守恒，他要求反射光能量之和不能大于入射光，这一点很好理解，否则，经过传输，光能量大于光源，这显然是不真实的。

(2) Helmholtz reciprocity, 即交换性，他要求，交换入射角和反射角的方向之后，BRDF的数值不变；他的重要性常被忽略，但是，他却是光线追踪理论的根基，否则，从相机发出光线经过某条路径后到达光源算出的能量，和从光源出发经过同一条路径到达相机的能量的计算结果就不同了。

对于能量守恒，可以使用半球方向反照率 ρ_{dh} ，或方向半球反照率 ρ_{hd} 去考察，只要数值小于等于1，那就满足能量守恒。（半球方向反照率和方向半球反照率数值相等的原因，是因为BRDF交换性的特性。）

$$\rho_{dh}(\omega_i) = \int_{H^2(n)} f_r(p, \omega_o, \omega_i) \cos \theta_o d\omega_o$$
$$\rho_{hd}(\omega_o) = \int_{H^2(n)} f_r(p, \omega_o, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i$$

方向半球反照率和半球方向反照率

在物理学中，有很多种方法对BRDF进行建模，比如基尔霍夫法、衍射法、微扰法等等，以及图形学中最常用微面元法（Micro-facet based BRDF）。

基于微面元法常见的BRDF公式如下：

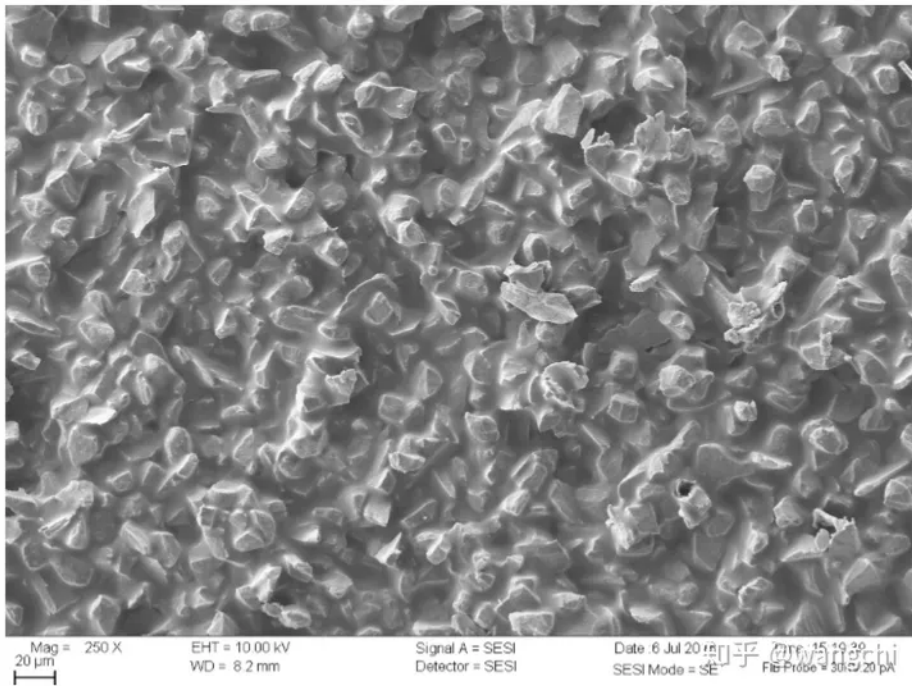
$$f = \frac{F(\theta_i) G(\omega_i, \omega_r) D(\theta_h)}{4 \cos(\theta_i) \cos(\theta_r)}$$

基于微面元的BRDF公式

他的假设如下，假设物体的宏观表面由很多的微面（micro-facet）构成，每一个微面绝对光滑，每一个微面上发生镜面反射。注意的是，如果每个微面并不假设为绝对光滑，那么BRDF的公式就

解。

下图是本人在布拉格期间使用扫描式电子显微镜(SEM)拍摄的砂纸(1200 grain)的微观结构照片，可以看出实际物体的微观结构是非常复杂的。



上述基于微面元的BRDF公式中，F为菲涅尔项，G为几何遮蔽因子，D为微面元法向分布概率密度函数，可以这样理解，

- (1) F为菲涅尔项，他是材质本身的光学属性的反应，即最大有多少能量可以被反射；
- (2) D法向分布，它表示，粗糙表面有多少比例的法向量可以让入射光以镜面反射的方式，反射到指定的方向；
- (3) G几何遮蔽因子，表示，对于一个指定的微面，有多少光被相邻微面遮挡从而无法进入该表面，又有多少反射光被相邻微面遮挡，无法从指定方向反射出去；
- (4) 分母中的4，是转换变量的雅克比行列式的数值，两个cos可以理解为光照射到表面后，面积改变从而带来强度的改变。

需要注意的是：

- (1) 上面公式仅仅对光在表面上的单次反射进行了建模，忽略了多次散射；这会导致一个问题，即，如果表面比较粗糙，那么多次散射会非常强烈，由于公式忽略了多次散射，这将使得渲染的物体看起来很暗。而实际上光在表面上经过多次散射之后才离开表面。有些BRDF公式，在上述公式后面，再加上一个漫反射项，用于对多次反射能量的补偿，这里需要注意的是，加了补偿项之后，需要检查公式的能量守恒。此外，Eric Heitz在16年的SIGGRAPH的论文已经证明，BRDF漫反射项，并不以漫反射的形式进行分布，本人在在校期间也通过暴力求解的方式进行过验证，有些情况下，漫反射项仍然呈现出强烈的前向散射的特点。
- (2) 其次，在计算非金属和金属的时候，F项的计算有明显的不同；对于非金属，其折射系数可以认为在可见光波段不变，因此可以认为对入射光的谱密度分布进行整体的衰减；而对于金属来说，其折射系数在可见光波段会发生变化，因此，光在金属材质表面反射后，在各个波段的衰减是不一样的。对于RGB渲染来说，对于非金属材质，我们直接对入射光的RGB进行整体衰减就可以；但是对于金属材质，则比较复杂。个人认为对于RGB渲染，更好的做法是，还是利用光谱渲染的原理（只不过仅仅使用三个波段），在计算过程中，应该用RGB三个波段的辐射度信息去计算，而不是RGB数值（因为RGB通常被局限在0-255之间）。比如，灯光发出的光强在RGB波段为(1000,1500,1200)，光线遇到某金属，该在RGB波段因为折射系数不同造成的衰减率为(0.2,0.3,0.4)，那么反射光的光强为(200,450,480)，然后，经过gamma校正、tone mapping 和 颜色转换（光谱->XYZ->RGB），最终得到的反射后的颜色。

3. PBR的一些研究现状

(1) 关于全局光照

这部分，仅有大致的了解，所以简单说一下。对于全局光照，最经典的算法莫过于Path Tracing算法了，此算法自1986年提出，后来众多学者在此基础上做了很多优化，使其迄今仍然处于参考级的地位。在国外学习期间，实验室的老师和多个企业有着密切的联系，因此，也打听了许多，据了解，包括Disney的RenderMan、Weta Digital（阿凡达等众多大片的特效制作公司）的Manuka Renderer、实验室导师Jaroslav创办的Corona Renderer均使用路径追踪算法作为主要的渲染器。

当然，关于全局光照，还有Photon Mapping, Progressive Photon Mapping, VCM("Light Transport Simulation with Vertex Connection and Merging"), Metropolis ("Robust Light Transport Simulation via Metropolized Bidirectional Estimators")等等。

关于Volumetric rendering or Participate media rendering(体渲染)，传统的包括RayMatching等等，比较先进的算法包括UPBP("Unifying points, beams, and paths in volumetric light transport simulation")等等。

上面也说到，近年来，越来越多的工作，将离线渲染和机器学习结合了起来，包括使用EM算法("On-line Learning of Parametric Mixture Models in Light Transport Simulation")，高斯混合模型(GMM, "Product Importance Sampling for Light Transport Path Guiding")、贝叶斯算法("Bayesian online regression for adaptive direct illumination sampling")等等。同时，对原始Path tracing算法的研究也没有停止，包括研究如何在光线传输中使用俄罗斯转盘(Russian Roulette)和分支策略，提高采样效率等等("Adjoint-Driven Russian Roulette and Splitting in Light Transport Simulation")。

(2) 关于反射模型

对于BRDF，个人了解的比较清楚一些，这里就列出一些经典的论文，然后再谈谈其研究发展趋势来。

经典论文：

【1】Cook R. L., Torrance K. E. A Reflectance Model for Computer Graphics[J]. ACM Transactions on Graphics, 1982, 1(1): 7-24.

【2】Torrance K. E., Sparrow E. M. Theory for Off-Specular Reflection from Roughened Surfaces[J]. J. Opt. Soc. Am., 1967, 57(9): 1105-1114.

【3】Walter B., Marschner S. R., Li H., Torrance K. E. Microfacet Models for Refraction through Rough Surfaces[C].In: Proceedings of the 18th Eurographics Conference on Rendering Techniques. : Eurographics Association, 2007.195-206.

【4】Heitz E. Understanding the Masking-Shadowing Function in Microfacet-Based BRDFs[J]. Journal of Computer Graphics Techniques, 2014, 3(2): 48-107.

近年来，关于BRDF的研究最显著的几个发展方向大致如下：

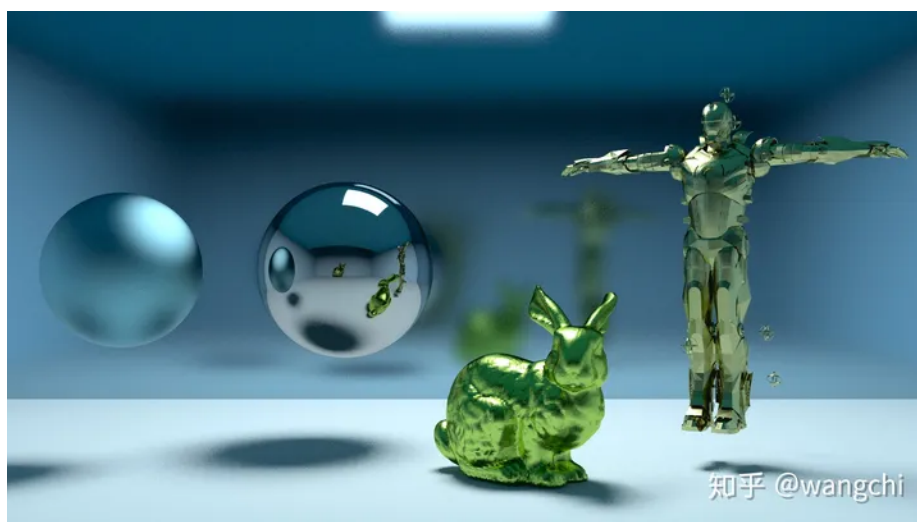
(1) 围绕BRDF基本理论，在原有模型的基础上提高模型的精度，如，上面的参文【4】Eric Heitz对微面元BRDF遮蔽与阴影因子进行了深入的探讨；他在16年SIGGRAPH发表在单层表面上

Ribardiere在17年的EG上提出了使用student-t分布，这一分布，将GGX分布和Beckmann分布及进行了理论上的统一；等等。

(2) 将波动光学效应，引入BRDF建模中。可见光的波长在400-700nm范围，上面贴出的砂纸的微粒尺度大概在1500nm左右，如果微粒的尺度进一步缩小到和波长级数相当的时候，光的波动效应会影响其反射特性。17年SIGGRAPH有四篇反射模型的论文，其中三篇均是考虑到光衍射、干涉效应；前不久的18年的会议也有一篇使用波动光学对反射建模的论文。本人在校期间，对使用偏振光渲染进行了一点点的摸索，使用偏振光线追踪研究了偏振效应对多层涂层BRDF的影响进行了一点点的研究，结论发现，对于较为光滑的双层非金属表面，如有清漆涂层的宝石，在某些区域，偏振效应可以带来23%的精度的提高。

(3) 在日常生活中，大部分的物体是带有涂层，比如桌面、汽车外壳等等。而我们常用的微面元BRDF公式仅仅对单层表面的反射进行了建模。一个常见的想法，是将两种BRDF模型进行叠加去模拟多层BRDF。但是，严格意义来说，这样是不准确的。因为，多层表面BRDF建模的难点在于估计层与层之间的光学过程，这个过程可能包括，多次散射、全反射等等。但是18年确是多层涂层BRDF论文爆发的一年，SIGGRAPH出现了三篇对多层涂层BRDF研究的论文，

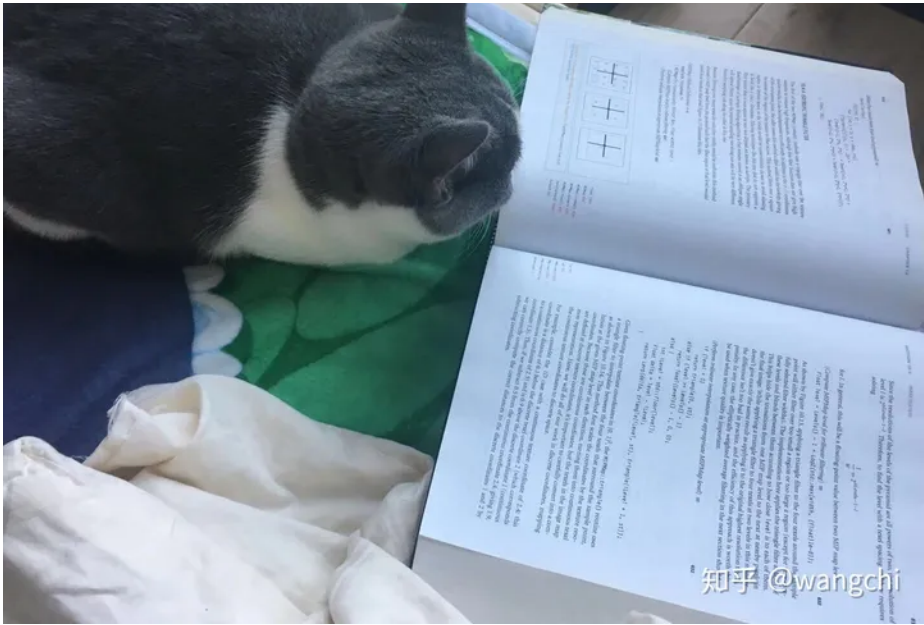
最后，奉上本人实现的离线渲染引擎的图片



最最后，本人在国外学习期间参与的离线渲染引擎“ART”（The Advanced Rendering Toolkit）于2018.9.18日开源发布，它应该是世界上首款支持偏振效应、荧光效应的渲染引擎，欢迎试用 cgg.mff.cuni.cz/ART/about/

一家之言，欢迎拍砖！

同事的猫都在看pbrt了 @Blademaster



编辑于 2019-07-14 11:01

渲染 计算机图形学



发布一条带图评论吧

31 条评论

默认 最新



一针见血

作者-》捷克?



2020-03-30

回复 1



Vigour

感谢分享，很多点都讲的很透彻

2018-10-30

回复 1



梁懿

太硬核了...

2018-10-30

回复 1



Magic

想请教一个简单小问题，对于面光源强度的定义pbrt场景文件中color L三个值，分别对应的是三个波长吗？具体是哪三个波长呢？我在书里没有找到呢

2023-05-29

回复 喜欢



Magic

分别对应的是哪三个波长处的辐亮度呢？请问我理解的是否有问题

2023-05-29

回复 喜欢



baker

为什么要弄波动光学的渲染器，支持波动光学的brdf材质现实世界多吗，这对最终渲染质量有多大影响

2020-06-30

回复 喜欢

糟糕段子手

2019-07-06

回复

喜欢

 wangchi 作者

谢谢 😊

2019-07-06

回复

喜欢

 库洛洛·鲁西鲁

太硬核看不懂。直觉是感觉绕远了，且渲染不出真实。多角度相机不好吗。

2019-06-19

回复

喜欢

 路人甲

猫看的什么书呢

2019-02-23

回复

喜欢

 DDDD

布儒斯特起偏角支持不，偏振模色散支持不，坏笑~

2019-02-18

回复

喜欢

 wangchi 作者

第一个费涅尔公式自动支持，第二个不支持，哈哈哈

2019-02-19

回复

喜欢

 Blademaster

王博威武

2019-01-01

回复

喜欢

点击查看全部评论 >

推荐阅读



PBR（物理渲染技术）在实时渲染中的概念与限制

坤牧



【基于物理书】（二）

毛星云