

# Global Illumination Rendering

李懿轩 PB18020710

# Abstract

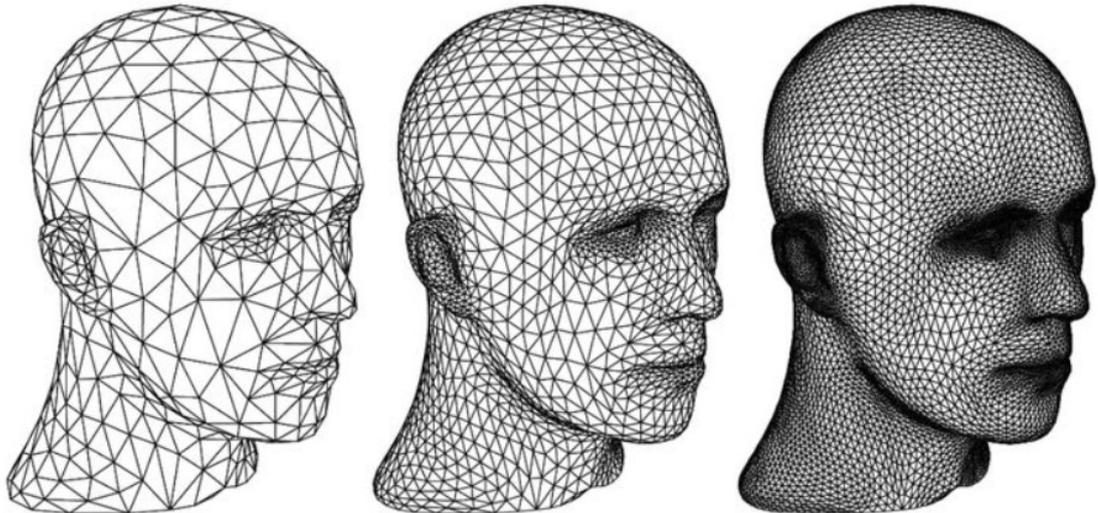
Rendering is the process of generating a photorealistic image from a 2D or 3D geometry model. Global illumination is a method of rendering, which takes into account both direct illumination and indirect illumination. Global illumination has many methods, including ray tracing, path tracing, photon mapping, PBGI and so on. This article is a short review of the history of Global illumination.

# 1 introduction

计算机图形学 (computer graphics) 很难有严格的定义, 因为它和很多学科都有交叉。我认为, 传统的计算机图形学可以认为是用计算机来绘制图片的学科。

传统的计算机图形学可以分为三大方面: 几何建模 (geometry modeling)、渲染 (rendering)、动画 (animation)。其中, rendering 是传统的计算机图形学的核心。

geometry modeling 即建立真实物体的几何模型, 如下图所示。



rendering 即给几何模型加上光照, 如下图所示



animation 即把图片变成视频。

geometry modeling 需要几何的知识。modeling 需要光学的知识。animation 需要连续介质力学、生物力学的知识。

最新的计算机图形学已经不在局限于 geometry modeling、rendering、animation 这三个方面, 而是和 3D 打印、**machine learning**、**Computer vision**、digital image processing、Human-Computer Interaction、VR 等都有交叉。

本文的主要篇幅会用在 rendering 中的 global illumination 上。

## 2 rendering equation

rendering 的核心为 1986 年被 David Immel 和 James Kajiya 提出的 rendering equation[1][2]

$$L(x, \omega_o) = L_e(x, \omega_o) + \int_{\Omega_{2\pi}} L_i(x, \omega_i) \rho(x, \omega_i, \omega_o) (\omega_i \cdot n) d\omega_i$$

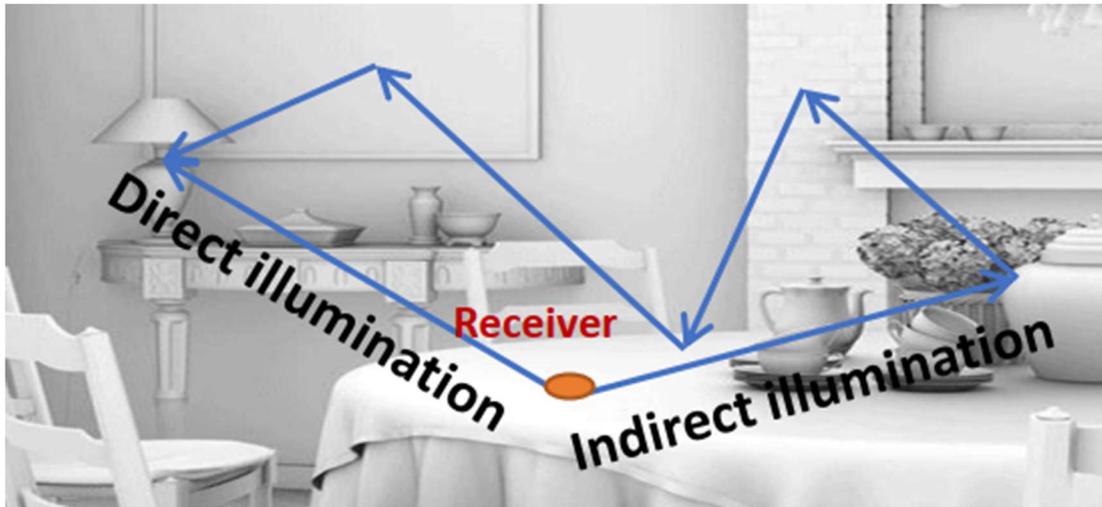
其中：

$L(x, \omega_o)$  的物理意义是 x 点、从  $\omega_o$  方向看过去，L（辐射率）是多少

$L_e(x, \omega_o)$  代表 x 点自己发的光

$\int_{\Omega_{2\pi}} L_i(x, \omega_i) \rho(x, \omega_i, \omega_o) (\omega_i \cdot n) d\omega_i$  代表 x 点反射的光，包括直

接光照和间接光照两部分，如下图所示



$\rho(x, \omega_i, \omega_o)$

代表材质函数，即 BRDF。

由于方程有迭代且有积分，方程没有解析解。

求解 rendering equation 通常用 2 种方法：蒙特卡洛、有限元。前者包括 PT, BDPT, MLT, PM。后者包括 Radiosity, PBGI。

### 3 difficulties of rendering

**complex scene:** 大规模的建筑增加了 visibility 的计算量。例如，在一个房间（比如厨房）不能看到另一个房间（比如卧室）的情况。

**complex materials:** 不同的材料的 BRDF 是不一样的。有漫反射、镜面反射之分。皮肤还需要考虑黑色素的散射。茶壶还需要考虑茶壶表面的细节。

**path:** 如果场景中全都是完美的镜面反射，蒙特卡洛方法难以收敛。

**real-time vs offline:** 电子游戏中需要使用 real-time rendering，而 real-time 远远比 offline 难。

**surface vs volume:** volume 比 surface 更难。volume 需要用 radiative transport eq 而 surface 需要用 rendering eq。例如，只有一个玻璃杯时，只需要用 surface rendering。若玻璃杯里装着红酒，就必须考虑红酒对光的散射，此时红酒称为 participating media。

**light transport:** 核心是找到从光源到 camera 的【所有】可能 path。难点是有多种情况，例如 DD（电话和衣服）、SS（两面镜子）、DS（玻璃杯和桌面）、SDS（游泳池、手表）、subsurface scattering（葡萄、阿丽塔的眼球）

# 4 global illumination

全局光照可以定义为: direct illumination+ indirect illumination。[3][4]而局部光照只考虑 direct illumination 以及光和物体表面的相互作用。

在下文中, 我将按照历史的顺序, 依次介绍几种基础的全局光照方法。

## 4.1 ray tracing

活跃时间: 1980-今

优点: unbiased、simple parameters、physically-based

缺点: 在 light transport 上收敛速度慢或者很难收敛, 特别是对 volume rendering, 即有 participating media 的情况

ray tracing 是 tracing the path of light 并且 simulating the effects of its encounters with virtual objects 的方法。它是一种基于蒙特卡洛模拟的方法。

ray tracing 可以分为基础期和发展期。

基础期:

1980, whited ray trace 被发明, 它只适用于镜面, 即完美的反射、折射。

1984, distributed ray tracing 被发明, 它可以用来计算漫反射, 原理是发射多条光线, 缺点是计算量大。

1986, path tracing 被发明, 它同样可以用来计算漫反射, 但它只从 camera 端发射 1 条光线, 光线的方向为概率比较高的方向, 概率用 BRDF 计算。

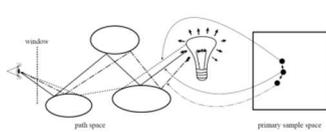
1993, bidirectional path tracing 被发明, 它从 light 端、camera 端都发射光线, 其中涉及多重重要性采样 multiple importance sampling, MIS。

1997, metropolis light transport 被发明。当间接光照非常多时, bidirectional path tracing 的噪声非常大。而 metropolis light transport 先用 path tracing 找到一套路径, 再从这条路径上找其它路径, 再决定接不接受找到的其它路径。

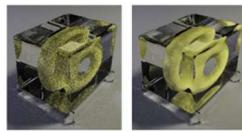
发展期:

发展期有 2 种思路, 一种是更好的采样, 另一种是充分利用连贯性。建立在第一种思路上的方法有: Monte Carlo based methods、Path guiding、Next event estimation、Regularization。建立在第二种思路上的方法有: Gradient domain rendering。

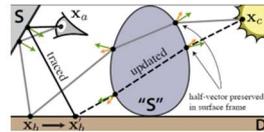
Monte Carlo based methods 中主要的几种如下图所示。



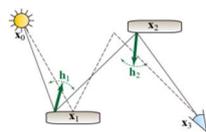
PSSMLT [Kelemen et al. 2002]



ERPT [Cline et al. 2005]



MEMLT [Jakob et al. 2012]



HSLT [Kaplanayan 2014]



Improved HSLT [Hanica et al. 2015]



Specular Manifold Sampling [Zeltner et al. 2020]

ray tracing 目前被广泛用于电影中。

## 4.2 radiosity

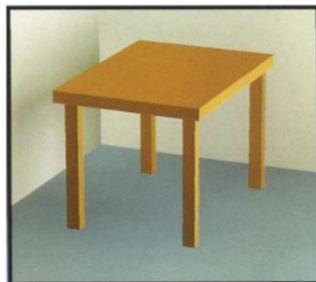
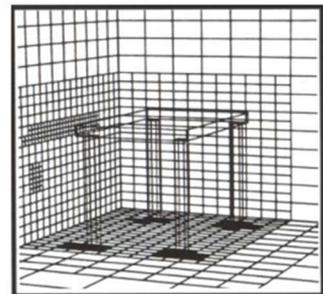
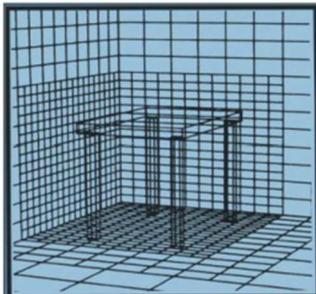
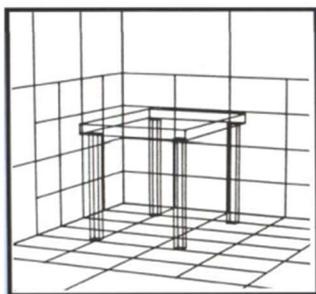
活跃时间：1985-1990

缺点：

- 1 只能计算 LDE，即光源和 camera 之间只有漫反射
- 2 计算边缘的效果差。例如 hard-edged shadows

辐射度方法（radiosity）是一种基于有限元的方法，它的基本步骤是[5]

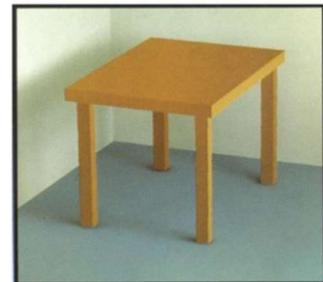
- 1 把场景划分为很小的面元
- 2 计算面元接收和发出的光能
- 3 逐次递归,直到面元的光能不再变化
- 4 模拟漫反射表面的间接光照和软阴影



Coarse patch solution  
(145 patches)



Improved solution  
(1021 subpatches)



Adaptive subdivision  
(1306 subpatches)

### 4.3 photon mapping

活跃时间：1996-今

优点：

- 1 Photon map is reused between different pixels
- 2 焦散、SDS、volume 算得很好

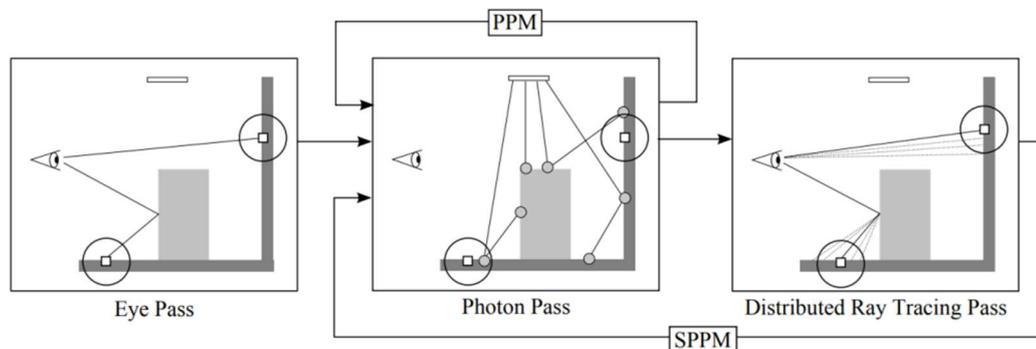
缺点：Biased

photon mapping 可以分为 PPM、SPPM

PPM 的基本步骤是：[6]

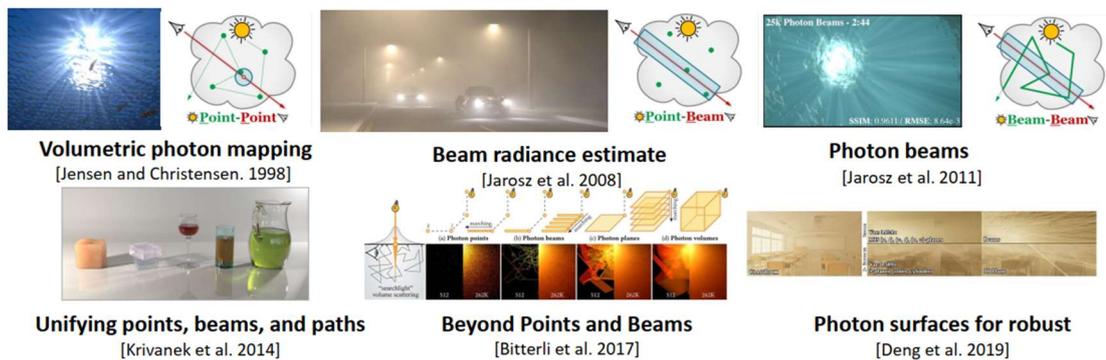
- 1 从光源发射光子
- 2 在物体表面，把光子存储起来
- 3 从 camera 发射光线
- 4 用光子密度来算全局光照

PPM 和 SPPM 的区别如下图：



[Hachisuka and Jensen 2009]

除了 PPM、SPPM, 还有一种叫 VCM 的方法。VCM 通过 MIS 结合了 BDPT、photon mapping 的优点。例如，用 photon mapping 算镜面，用 BDPT 算漫反射。对于 volume rendering, 方法如下图



#### 4.4 PBGI point-based global illumination

活跃时间：2008-2015

优点

1 Practical Global Illumination

2 Noise free

3 Controllable

缺点

1 biased

2 Too many parameters

3 Expensive memory cost

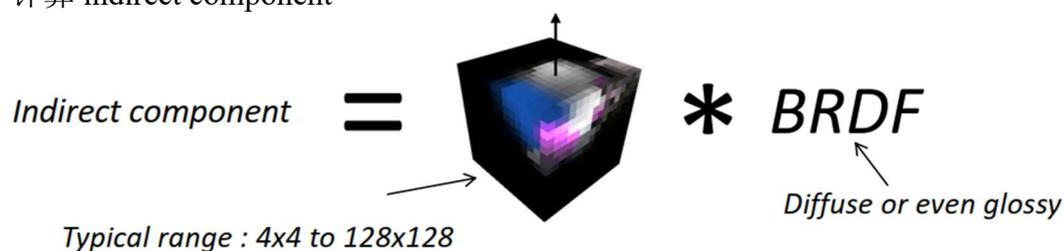
步骤

1 Discretize: 把场景离散化为很多点，这些点包括直接光照

2 Hierarchical: 把这些点组织成层次结构

3 Adaptive rasterization for visibility

4 计算 indirect component



2010年前，在电影中，PBGI比path tracing更常用。

2010年后，在电影中，path tracing逐渐取代PBGI。

原因是PBGI需要的人力成本比path tracing高，而path tracing需要的硬件成本比PBGI高。而随着硬件性能的提升，path tracing便取代了PBGI。

在目前的电子游戏的实时渲染中，还无法做到完全用path tracing。未来，path tracing+denoise、deep learning、高质量的采样是三种可能的解决方法。

## 4.5 many-lights

活跃时间：2005-2013

优点

- 1 所有类型的照明都可以用同一种方法收集
- 2 低噪声
- 3 更容易控制 quality

缺点

- 1 实时模拟中，稳定性差
- 2 Biased
- 3 不能算焦散

步骤

- 1 场景中不存在光子，存在虚拟的点光源
- 2 计算虚拟点光源对 L 的贡献

## References

1. Immel, David S.; Cohen, Michael F.; Greenberg, Donald P. (1986), "A radiosity method for non-diffuse environments" (PDF), SIGGRAPH 1986: 133, doi:10.1145/15922.15901, ISBN 978-0-89791-196-2
2. Kajiya, James T. (1986), "The rendering equation" (PDF), SIGGRAPH 1986: 143–150, doi:10.1145/15922.15902, ISBN 978-0-89791-196-2
3. "Realtime Global Illumination techniques collection | extremeistan". extremeistan.wordpress.com. Retrieved 2016-05-14.
4. Philip Dutre; Philippe Bekaert; Kavita Bala (August 30, 2006). Advanced Global Illumination, Second Edition. ISBN 978-1568813073.
5. Dudka, Kamil. "RRV - Radiosity Renderer and Visualizer". dudka.cz. Retrieved 1 February 2013.
6. Jarosz, Wojciech (September 2008). "Chapter 7: The Photon Mapping Method". Efficient Monte Carlo Methods for Light Transport in Scattering Media (PhD thesis). University of California, San Diego. p. 119 – via Dartmouth.

## 心得体会

刘老师您好，我是 2018 级物理学院的一名学生。

我从小就很喜欢动漫、电子游戏（貌似大多数男生都会喜欢这两者的）。

选这门课之前，我对计算机图形学的了解约等于 0。

学了这门课之后，尽管对老师们的专业知识我还是了解甚少，但至少我知道什么是 geometry modeling、rendering、animation、Human-Computer Interaction 了。

我对王贝贝老师的《全局光照方法——20 年回顾》印象特别深刻，因此我的图书报告以 rendering 为题。

本文的大部分内容也都是我从王贝贝老师那里学到的。

感谢刘老师，王老师，以及本门课的所有其他老师，谢谢你们教我知识！

### 对本课程的建议

希望下次开课时，每次课程结束后就能把录像上传，这样学生们就能及时地看到今天的录像，对今天的知识查缺补漏。

谢谢老师！