

硕 士 研 究 生 读 书 报 告



题目 利用轻量级光子映射进行高效的焦散处理

作者姓名 任萍

作者学号 21860446

指导教师 李启雷

学科专业 计算机技术

所在学院 工程师学院

提交日期 二○ 18 年 12 月

Efficient Caustic Rendering with Lightweight Photon Mapping

A Dissertation Submitted to

Zhejiang University

in partial fulfillment of the requirements for

the degree of

Master of Engineering

Major Subject: Software Engineering

Advisor: Li Qilei

By

Ren Ping

Zhejiang University, P.R. China

2018

**摘要**

对复杂照明效果进行稳健高效的渲染是一项具有挑战的任务，虽然像顶点连接和合并这样的算法可以做到强有力地渲染，达到稳健高效的效果，但是它们在简单路径跟踪器上的开销太大。目前的渲染方案中，焦散渲染通常要求用户使用专门的算法并需要用户手动调整参数。但是，即便使用精心选择的参数，光子映射仍然可以追踪大数量的光子，造成要么路径追踪可以做到很好地采样，要么根本失效。

为了达到坚固，轻巧的焦散渲染，本文提出了一种用于识别和聚焦光子路径的计算技术。在渲染解决方案中应用此技术，可以使得发射的光子被自动引导到光子作用的区域，使方差显著减小，达到了更大的光子密度且具有更少的光路选择和光子数量。

**关键词**：光线追踪

Abstract

Robust and efficient rendering of complex lighting effects remains a challenging task. While algorithms like vertex connection and merging can render such effects robustly, their significant overhead over a simple path tracer is not necessary. In current rendering solutions, caustics often require the user to enable a specialized algorithm and hand-tune its parameters. But even with carefully chosen parameters, photon mapping may still trace many photons that the path tracer could sample well enough, or, even worse, that are not visible at all.

Our goal is robust caustics rendering, we propose a technique to identify and focus computation on the photon paths that offer significant variance reduction over samples from a path tracer. Our method achieves better photon densities with fewer light paths (and thus photons) than emission guiding approaches based on visual importance.

**Keywords：** Ray tracing

**1 引言**

真实世界场景中的照明产生广泛的视觉效果。例如，直接照明和平滑的间接照明均遵循摄像机的光传输路径跟踪算法。通过跟踪来自光源的路径，可以更有效地渲染强烈、集中的间接照明，尤其是焦散，换句话说，对于每种照明效果，都有一种方差更小的路径采样技术可以比其他技术更好地采样 ，应用于不同的场景具有不同的效果，即没有一种最优的基于全局的采样技术。多重重要性采样（MIS: Multiple Importance Sampling）组合多种采样技术的双向算法，这种算法性能稳健，不会因特定照明效果的存在，从而受到干扰导致性能急剧下降，但这种稳健性通常是以不能达到令人满意的性能为代价的：大多数场景并不具备渲染图像中所有可能的照明效果，并且采样技术的额外开销巨大，因此，路径跟踪目前是大多数生产渲染器中的默认选择方法。

我们提出了一种在一个常见设置中提高效率的方法：需要光跟踪或光子映射来捕获细小但重要的焦散效应。路径跟踪器可以有效地渲染大部分图像，但是在外部场景中，焦散时为了获得足够的光子密度，需要跟踪和存储许多光子，因此光子映射成本非常昂贵，为了解决这个问题，Jensen 针对全局和焦散光子映射提出了光子的启发式分类，并使用所谓的投影图来引导焦散光子朝着被启发式地认为足够“镜面反射”以产生焦散效应的方向投影，通过正确的参数设置，该算法可以产生有效的渲染，但代价是用户要有很好的技术背景。但是将焦散光子作为镜面对象的启发式识别不适用于复杂的材料模型，更不用说其他因素，如光源大小，因为光源大小确定一个物体是否产生可见焦散。

**2 介绍**

我们的目标是达到稳健，轻量级焦散渲染并且可供一般用户使用。为此，我们提出了一种识别光子路径的技术，该识别路径与路径跟踪器相比具有显著的样本方差改进。该技术基于路径概率，并且避免了对象的固有启发式分类产生的潜在的焦散效应。在结合路径跟踪和光子映射的渲染解决方案中应用此技术时，光子发射被自动引导到光子可以在路径示踪器上提供显著变化的区域，这种策略明显优于仅基于视觉重要性的光子路径传输指导。此外，这种技术还自动为给定场景确定适当数量的光子，并且算法作用在无差异光子映射的简单场景时还可以平滑地退化为纯路径跟踪。

**3 理论**

如前所述，通过将诸如光子映射限制到域的子集，可以提高效率，但是对于简单的路径跟踪器来说，这是最具挑战性的。在本节中，我们提出了一种直观的启发式方法来确定是否应该对“有用的”光子进行采样。

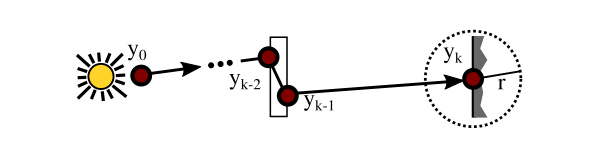


图1 光路传输图

如果从光线到达的可能性比从周围的光子映射半径内的任何地方到达更有可能，那么光路产生的光子是“有用”光子。直观地说，如果路径跟踪器对路径的采样概率明显低于光子映射器，则光子非常“有用”，这产生了我们的有用性测量的第一个版本：

 (1)

 (2)

 (3)

其中，(光子映射)与(路径跟踪器)是原始渲染方程重写为所有光传输路径上的积分：

 (4)

的蒙特卡洛估计器。其中，图像中像素的值由所有路径的空间上的积分给出，是沿路径每个点的差分乘积面积。等式(1)中用于两种技术和的等式(4)的组合蒙特卡罗估计则为:

 (5)

如果对于的所有，这个组合估计器将收敛到正确的结果:

1. 
2. either  or 

第一个条件的结果是样本总是按MIS权重加权，如果来自一种技术的许多样本被显着地加权，则这可能导致总体上比完全禁用该技术更低效的估计。

如果给使用相同技术的光子分配较低的权重，那么会整体降低有效估计器的性能，导致全局失效。在等式(2)中，包含从场景中的任何位置采样点，虽然可以通过相机路径上的密度估计来近似采样点，但我们使用更简单且更有效的方法：我们假设仅在周围的光子映射半径内是均匀且非零的。

 (6)

其中是光子映射半径。现在，将光子映射器对光子进行采样的概率与路径跟踪器采样相同路径的概率相比就可以得到式（7），该路径从围绕的光子映射半径内的任何地方开始，因此，有如下结果：如果光子映射半径小于光源的尺寸，则光子权重高，光源尺寸权重低。

理论上，每当光子映射器具有比路径跟踪器更低的路径方差时，会更大。问题在于，光子映射的效率主要取决于光路的重复计算。因此，在不考虑所使用的光子数量的情况下，不是合理的有用性度量。为了解决这个问题，我们提出了在光路末端产生的光子的有用性的度量：

 (7)

其中是路径跟踪器在采样路径时效率低于光子映射器的仍然存在的最小光子数。基于这个等式，我们将光子分为“有用的”光子。

**4 实施**

我们的方法基于VCM的精简版本，我们将其称为顶点合并（VM）。VM算法结合光路跟踪和光子映射，每个光子都用阴影射线连接到相机。除了第一个顶点外，在每个顶点处执行相机路径估计密度，基于在每个光源发射的光子的MIS加权图像贡献的发射分布，我们将得到的算法称为具有发射引导（VM + EG[eission guiding]）的VM。 我们将这种方法与方程(7)中的启发式结合起来：在更新分布时只考虑有用的光子。 我们将该算法的最终版本称为VM + EG + U. 算法1中给出了伪代码。

算法1 轻量级光子映射：VM + EG（+ U）

|  |
| --- |
| 1: function RENDER\_ITERATION  2: photon\_map=TRACE\_PHOTONS()  3: for all photons  do  4: ADD\_CONTRIB\_LT()  5: .contrib+=contrib\_It  6： =0  7: for all pixel  in image do  8: TRACE\_CAMERA\_PATH()  9: for all vertices  along  do  10: ADD\_CONTRIB\_PT()  11: for all nearby photons  do  12: ADD\_CONTRIB\_PM()  13: .contrib+=contrib\_pm  14: if Equation (12) holds then  15: +=1 |
| 16: if algorithm == “VM+EG” then  17: UPDATE\_EMISSION\_DISTRIB(all\_photons)  18: else if algorithm == “VM+EG+U” then  19: UPDATE\_EMISSION\_DISTRIB(useful\_photons) |

每当光子用于估计像素值时，就累积MIS加权贡献（参见算法1中的第7行和第13行）。 在每次迭代结束时，累积的贡献用于更新采样的图像面积（第16-19行）。 从光子映射或光跟踪中具有超过其亮度的一定百分比的像素的数量决定了在下一次迭代中要跟踪的光路的数量（第6,14-15行）。

我们的核心是构建了初级样本空间中用于对发射进行采样的均匀随机数的直方图，并实现了区域光源和定向光源的发射导向，累积每个光子的有用图像贡献，计算在光源之间分配光路的预算，另外，高斯滤波器用于减少直方图中的噪声。由于我们不会在结果上添加统一密度，因此，光子映射器本身的贡献将是有偏的，但是MIS与无偏径路径跟踪器的组合将消除组合估计器的偏差。

确定每次迭代光子数的常用方法是使用与摄像机路径相同数量的光路，光子的数量就是沿着这些光路的顶点数。如果只有一小部分图像包含焦散，那么当为每个相机路径使用一个光路时，这些区域中的光子密度将变大。因此，我们为每个像素追踪一条光路，这些像素从涉及有用光子的技术中获得重要的MIS加权贡献。为此，我们使用以下等式：

 (8)

上式中，和分别指代对像素的光子映射和光跟踪的MIS加权贡献。像素的估计值表示为，并乘以阈值，我们选择阈值为1%。当时，只要光子映射和光跟踪占估计像素值的1%以上，则不等式为真。我们为这个不等式所保持的每个像素追踪一条光路（见算法1）。

**5 评估和结果**

我们确定有效光路数量的方法显著提高了场景中的效率，只有少量小焦散。它甚至可以完全使光线跟踪失效。我们并未声称我们的启发式算法是最优的。与多个任意选择的常数进行比较，我们使用的启发式算法对于仅具有小焦散和来自路径跟踪器的样本的场景表现出收敛率接近最优。如果路径跟踪器不需要很多样本，可以通过使用更多的光路来提高效率。另一方面，对一些复杂反射的场景需要使用路径跟踪器来解决焦散，这样可以用更少的光子达到更有效地渲染。

本文提出的方法仍然需要两个参数：和像素阈值。后者的含义是：高百分比的阈值是通过仅使用光子来获得最亮的光子焦散得到的。另一方面，参数不太直观，较小的阈值导致较少的光子被认为是有用的，因为我们的有用性度量仅依赖于路径概率，所以最佳选择取决于渲染器的实现细节，例如光子映射半径，而非场景。

**6 限制和未来工作**

本文的方法比较简单，在理论和实际应用这两方面都可以再进一步改进，：方程(7)中提出的启发式方法有三个值得注意的弱点，我们在应用中必须对此进行补偿。首先，必须根据经验选择参数，此外，它受光子映射半径的影响，如果场景之间的半径不相似，那么的选择也可能会由场景决定。其次，我们的方法将光泽表面上的光子被认为是与漫反射表面上的光子一样有用，在应用程序中，我们通过将提议的启发式仅用作二进制来补偿这一点。第三，我们的有用启发式方法几乎与MIS权重非常相似，且存在着一个共有的问题：涉及强间接照明的某些效果的权重不是最佳的,因此，我们的方法将回归几乎所有类型的非焦散间接照明的路径示踪，由于间接照明引起的焦散通常也具有较低的权重。

未来，可以通过丢弃被等式(7)分类为“无用”的光子，进一步减少光子映射的存储器占用。我们的方法可以去除不会产生有用光子的路径，但是在中间路径中反弹，或者由于正则化而产生的光子仍然可能是无用的，但是，虽然丢弃“无用”光子节省了内存，但其代价是涉及大量的MIS重量计算。

**7 结论**

我们提出了一种测量给定光子相对于路径示踪剂的有用性的方法。该有用性仅基于路径概率计算，而不依赖场景的参数，所以它易于在大多数基于重要性的算法上使用。测试表明：引导光源发射到那些导致可见焦散的物体，与引导光子发射的现有方法相比，我们可以获得明显更好的等时、甚至等样本收敛率。该方法与双向路径跟踪一起使用，可有效地渲染光泽漫反射路径和镜面漫反射路径；与顶点连接和合并算法结合使用，可捕获镜面反射漫反射和光泽漫反射光路径。

我们的结果表明，通过与多重要性采样相结合的蒙特卡罗估计可以通过限制更昂贵的采样来显著增加域的子集，这会提供显著的改进。我们相信这个总体思路也可以使许多其他应用受益。

参考文献

[1]Efficient Caustic Rendering with Lightweight Photon Mapping．Pascal Grittmann,

Arsène Pérard-Gayot.Eurographics Symposium on Rendering 2018.Vol. 37(2018),*Number*4.

[2]基于光线跟踪的焦散绘制算法研究[J].王波,许申益.数字技术与应用,2018, 36(3):128-

130

[3]基于光线跟踪的焦散模拟生成算法[J].许申益,蒋聪.长春理工大学学报（自然科学版）,2017,40(1):127-132

[4]光线跟踪绘制中的光路重用技术研究[D].秦昊.浙江大学.2016

[5]光线追踪算法汇总.电子发烧友网.http://m.elecfans.com/article/675957.html

[6]光子映射.学步园.https://www.xuebuyuan.com/1131284.html

[7]MATLAB 抽取随机数 MCMC原理.CSDN.<https://blog.csdn.net/orchidzouqr/article>/de-

tails/60753151

[8]【PathTracing】实时光线追踪和BSSRDF的那些事.COLABUG.https://www.colabug.com

/2312831.html