

照明切割：一种可扩展的照明方法

布鲁斯沃尔特塞巴斯蒂安费尔南德斯亚当卡维塔巴拉迈克尔唐纳德P. 康奈尔大学计算机图形学的格林伯格项

目*

摘要

光切割是一个用于计算真实照明的可伸缩的框架。它处理任意的几何图形、非漫反射材料和来自各种光源的照明，包括点灯、区域灯、HDR环境贴图、太阳/天空模型和间接照明。其核心是一种新的算法，精确逼近照明与强次线性代价。我们展示了如何使一组光可以便宜地近似，而边界的最大近似误差。然后使用二叉光树和感知度量来自适应地将光划分为组，以控制误差vs. 成本权衡。

我们还引入了重建切割，利用空间相干性来加速生成抗锯齿图像的复杂照明。结果证明了五个复杂的场景，并表明光切割可以准确地近似数十万个点光仅使用几百个阴影光线。重建切割可以将阴影光线的数量减少到几十条。

. 3. 7 三维图形学和现实主义——颜色、阴影、阴影和纹理；

关键词：许多灯光，光线追踪，阴影

1 介绍

虽然很多研究集中在用复杂的几何和材料渲染场景上，但有效处理大量光源的研究却较少。在典型的系统中，渲染成本随灯光的数量呈线性增加。现实世界的场景通常包含许多光源，研究表明，人们通常更喜欢拥有更丰富、更真实的灯光的图像。然而，在计算机图形学中，我们经常被迫使用更少的灯光或禁用重要的灯光效果，如阴影，以避免过度的渲染成本。

光切割框架提出了一种新的可扩展的算法来计算从多点灯的照明。它的渲染代价与点灯的数量呈强次线性，同时保持精确解的感知保真度。我们提供了一种快速的方法来近似照明从一组灯，更重要的是，便宜和合理的严格界限的最大误差。我们还提出了一种自动和局部自适应的方法，将光划分为组，以控制成本和误差之间的权衡。这些灯光被组织成一棵光树，以便有效地寻找分区。光切割可以处理非漫射材料和任何可以被光线跟踪的几何图形。

拥有一个可伸缩的算法，使我们能够处理极其大量的光源。这是特别有用的，因为许多其他困难的照明问题可以模拟使用从足够多的点灯的照明(e. g., 图1)。我们

*电子邮件: {bjw, spf, 艺术艺术, kb, 迈克, dpg}@图形. 康奈尔. edu



图1：大屏幕模型：一个办公室由两个头顶区域的灯，两个HDR平板显示器，和间接照明照明。我们的可伸缩框架使用639, 528快速准确地计算点灯的照明。显示器上的图像也是使用我们的方法进行计算：光切割和重建切割。

演示三个例子：来自区域灯光的照明、来自高动态范围（HDR）环境地图或太阳/天空模型的照明，以及间接照明。在灯光切割框架中统一不同类型的照明有额外的好处。例如，来自一个光源的明亮照明可以掩盖近似其他照明的误差，而我们的系统会自动利用这种效果。一种相关的技术，称为重建切割，利用空间相干性来进一步降低渲染成本。它允许在图像上稀疏地计算光切割，并在它们之间智能地进行插值。与大多数插值技术不同，重建切割保留了高频细节，如阴影边界和光泽高光。光切割可以用几百条阴影光线计算出数千盏灯的照明。重建削减可以进一步将其减少到12个左右。本文的其余部分组织如下。我们将在第2节中讨论之前的工作。我们在第3节中介绍了基本的光切割算法，在第4节中给出了我们的实现，在第5节中讨论了不同的照明应用，并在第6节中展示了光切割结果。然后，我们在第7节中描述了重建切割，并在第8节中演示了它们的结果。结论见第9节。附录A给出了对球形灯的优化。

2 以前的工作

大量的工作是在计算照明和来自光源的阴影的(例如，见[Woo等人。1990；哈森弗拉茨等人。2003年]调查)。大多数技术加速了单个灯的处理，但与灯的数量成线性关系。

一些技术已经明确地处理了许多灯光问题。[Ward 1994]根据最大贡献对灯光进行排序，然后按递减的顺序评估它们的可见性，直到出现错误

绑定是满足。我们将在第6节中比较光切割和他的技术。[雪莉等人。1996]将场景分成单元，每个单元将光分成重要和不重要的列表，后者的采样非常稀疏。这种或类似的蒙特卡罗技术可以在有足够好的采样概率函数上很好地执行，但对任意场景稳健有效地计算这些函数仍然是一个有待解决的问题。[帕奎特等人。1998]提出了一种使用类似于我们将使用的光树的分层方法。它们提供了有保证的错误边界和良好的可伸缩性，但不能处理限制了适用性的阴影。[费尔南德斯等人。通过缓存场景中每个光的可见性和拦截器信息来加速许多灯，但如果灯的数量非常大，这就会导致过多的内存需求。[Wald等人。2003]可以有效地处理许多灯光，假设场景是高度遮挡的，只有一小部分子集贡献于每个图像。这个子集是通过一个粒子跟踪预处理来确定的。

来自HDR环境地图的照明（通常来自照片[Debevec 1998]）正在成为现实照明的流行。智能采样技术可以将这些点灯转换为定向点灯进行渲染（e.g., [阿加瓦尔等人。2003; Kollig和Keller 2003]），但通常许多灯仍然需要高质量的结果。

即时光能[Keller 1997]是许多基于光的随机粒子跟踪的全局照明算法之一。它使用许多虚拟点灯来近似于间接照明。可解析的细节与虚拟灯的数量直接相关。这使得它与光切割的完美匹配，而以前它在很大程度上被限制在快速粗糙的间接近似。[Wald等人。在他们的交互系统中使用它，并添加了一些聪明的技术来提高它的分辨率。

光子映射是另一种流行的、基于粒子的间接照明解决方案。它需要半球形的最终收集才能获得良好的结果，通常每次收集需要200到5000条射线[Jensen2001, p. 140]。在复杂的场景中，光切割计算直接和间接照明，使用比标准的半球聚集更少的光线。

层次化和聚类技术被广泛应用于许多领域。图形中著名的例子包括辐射技术（例如，[Hanrahan等。1991; Smits等人。1994; 狮子和Puech1994]）。与光切割不同，这些计算视图无关的解决方案，如果详细，可以非常需要计算和存储。此外，由于它们使用网格来存储数据，因此它们很难出现一些常见的几何缺陷，如重合或相交的多边形。最终的收集阶段通常被用来提高图像质量。[Kok和Jansen 1992]和[Scheel等人的方法。2001; Scheel等人。通过在可能的情况下尝试插值，并且只在必要时拍摄阴影光线，从而加速最终的聚集。虽然在目标上与重建切割非常相似，但他们使用了基于辐射强度链接结构中的数据的启发式方法。

许多以前的技术已经使用了相干性和插值性来降低渲染成本。重建削减的新奇性和力量来自于使用光削减框架。像以前的几种方法一样，重建切割使用定向光来廉价地近似来自复杂光源的照明。[沃尔特等人。将它们用于硬件加速预先计算的全球照明解决方案的演练。[扎尼内蒂等人。称它们为光矢量，并使用它们来近似来自各种光源的照明，包括区域光、天空穹顶和间接光源。

3. 避雷针方法

给定一组点光源S，从w方向上观察到的由它们在表面点x处的直接照明所引起的辐射L为a

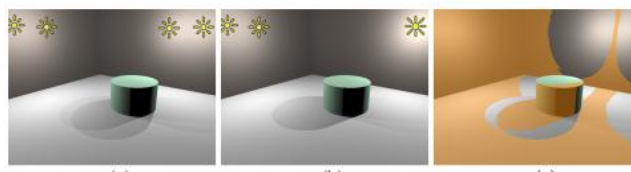


图2：一个带有4个点灯的简单场景。(a) 确切的解决方案。(b) 是由聚集在右边的两个灯而形成的近似解。(c) 橙色区域表示精确解和簇解无法区分的地方。误差通常在灯光附近的能见度差异最大。

每种光的材料、几何形状、可见性和强度项对所有光的总和：

$$L_S(\mathbf{x}, \omega) = \sum_{i \in S} \overbrace{M_i(\mathbf{x}, \omega)}^{\text{material}} \underbrace{G_i(\mathbf{x}) V_i(\mathbf{x}) I_i}_{\substack{\text{geometric} \\ \text{visibility} \\ \text{intensity}}} \quad (1)$$

精确解的代价在光的数量上是线性的，因为各项必须对每个光进行计算。为了创建一个可扩展的次线性方法，我们需要一种方法来近似一组光的贡献，而不需要单独评估每个光。

≤让我们定义一个簇，CS，是一组点光和一个有代表性的光j 2 C。来自一个集群的直接照明可以通过使用代表性光的材料、几何和可见性项来近似的所有光得到：

$$\begin{aligned} L_C(\mathbf{x}, \omega) &= \sum_{i \in C} M_i(\mathbf{x}, \omega) G_i(\mathbf{x}) V_i(\mathbf{x}) I_i \\ &\approx M_j(\mathbf{x}, \omega) G_j(\mathbf{x}) V_j(\mathbf{x}) \sum_{i \in C} I_i \end{aligned} \quad (2)$$

星团强度(IC=∑Ii)可以预先计算并与集群一起存储，使集群近似的成本等于评估单个光的成本（即。我们已经用一束更亮的光取代了这个星系团）。集群误差的数量将取决于整个集群中的材料项、几何项和可见性项的相似程度。图2显示了一个简单的示例。

光树。没有一次将光划分为集群可能会覆盖整个图像，但是为每个点动态地找到一个新的集群划分可能很容易被证明是非常昂贵的。我们使用全局光树来快速计算局部自适应集群分区。光树是一种二叉树，其中的叶子是单独的光，内部节点是包含树中它们下面的光的光簇。穿过树的切割是一组节点，这样从树的根到叶子的每条路径都将只包含切割中的一个节点。因此，每个切割对应于一个有效的光划分到集群。图3显示了一个光树和三种不同的切割。

虽然每一次切割都对应于一个有效的簇划分，但它们在成本和近似照明的质量上差异很大。我们需要一种健壮的和自动化的方法来选择适当的切割来在本地使用。由于图像的切割会有所不同，一些点或像素可能使用特定的集群来降低成本，而另一些则用它的子点替换它以提高精度。这样的转换可能会导致令人反感的图像伪影。为了防止这种情况发生，我们只有在能够保证集群引入的近似误差低于感知可见性阈值时，才使用集群。韦伯定律[布莱克威尔1972]是一个标准的、众所周知的知觉结果，它说，视觉信号中的最小可感知变化大致等于基本信号的固定百分比。在最坏的情况下，人类可以检测到不到1%的变化，尽管在实践中，

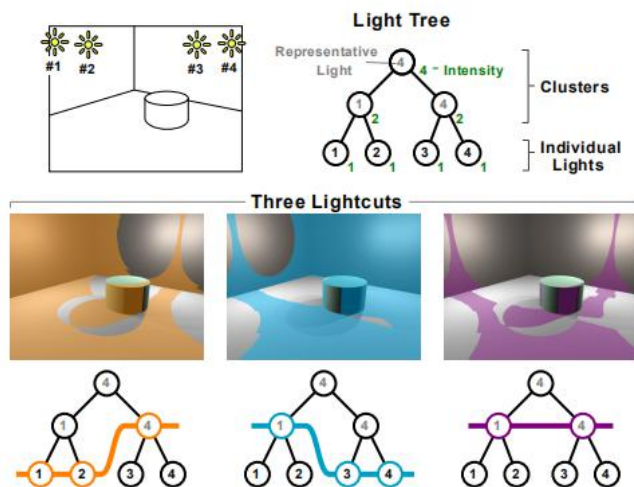


图3: 一棵轻树和三个切割实例。树显示在顶部, 带有每个节点的代表性灯和集群强度。叶子是单独的光, 而上面的节点是逐渐更大的光簇。每个切割都是将不同的灯光划分成簇(橙色的切割与图2相同)。在每个切割的上方, 其误差较小的区域被突出显示。

这个阈值通常更高。根据我们的经验，2%的错误比会导致在各种场景中没有可见的伪影，并被用于我们所有的结果。更改此值可用于改变性能和准确性之间的权衡。

选择避雷针。使用相对误差准则需要估计总辐射，然后我们才能决定一个特定的簇是否可用。为了解决这个困难，我们从一个非常粗的切口开始(e.g., 光树的根)，然后逐步细化它，直到满足我们的误差准则。对于切割中的每个节点，我们同时计算它的簇估计(方程2)和它的误差的上界(第4节)。1). 每个细化步骤都考虑当前切割中误差边界最大的节点。如果它的误差界大于我们的误差比乘以当前的总照明估计，我们将它从切割中删除，替换为光树中的它的两个子项，计算它们的聚类估计和误差界，并更新我们对总辐射的估计。否则，切割符合我们的误差准则，我们就完成了。*我们称之为光切割，光切割。*

为了使这一过程更有效,我们要求一个集群的代表光与其两个子光中的一个相同。这允许我们在计算子元素时重用代表性光的材料、几何项和可见性项。我们使用堆数据结构来更有效地在切割中找到误差率最高的集群节点。如果出现在切割中,单独的灯(即光树叶节点)的计算得很精确,因此有零误差。

我们的相对误差准则高估了非常黑暗区域的误差可见性。例如，一个完全遮挡的点允许零误差，但即使在黑色像素足够小的误差也不可。因此，我们还设置了一个最大的切割大小，如果切割上的节点总数达到这个限制，则停止进一步的细化。我们选择了最大切割尺寸1000，足够大，在我们的结果中很少达到，然后只在黑暗区域，额外的误差不可见。

4实施捷径

我们的实现支持三种类型的点灯：全光灯、定向灯和定向灯。泛光灯在各个方向上均匀地发光

从一个点。定向光以余弦加权半球模式发射，由它们的方向或最大发射方向定义。定向光模拟一个无限远的光源在单一方向上发射。所有的灯都有一个强度 I_i 。

建造光树。光树将灯光一起组合成簇。理想情况下，我们希望最大化它所创建的集群的质量(i. e. 将它们的材料、几何和可见性方面最相似的光结合起来)。我们通过根据空间接近和相似方向分组光来近似。

我们按类型将点灯划分为单独的泛向、面向和方向列表，并为每个列表构建树。但从概念上讲，我们认为它们是一棵大树的一部分。每个星团记录它的两个子光，它的代表光，它的总强度 ic ，一个轴对齐的边界框，和一个方向边界锥。圆锥体只需要定向灯。虽然距离无限远，但在计算其边界盒时，定向灯被视为单位球体上的点。这允许定向灯在建造光树时使用与其他点灯相同的技术，更重要的是，稍后用于限定它们的材料术语米。

相似度量。每棵树都是使用贪婪、自底向上的方法，逐步组合灯和/或集群。在每一步中，我们根据集群大小度量选择将创建最小集群的对 $ic(a_c^2 + c^2(1 - \cos \beta_c)^2)$ ，其中 a_c 是集群边界框和 β 的对角线长度吗 c 是其边界圆锥的半角。常数 c 控制了空间相似性和方向相似性之间的相对比例。方向灯设置为场景边界框的对角线，泛光灯和方向灯设置为零。

一个集群的代表光总是与它的一个儿童相同，并且是根据儿童的相对强度随机选择的。每一种光都是它自己的代表。因此，一束光代表一个星系团的概率与它的强度成正比。这使得方程2中的簇近似在蒙特卡罗意义上是无偏的。然而，一旦被选择，在整个图像上使用相同的代表性光用于该簇。树木的建造，就其本质而言，不能在灯的数量上是次线性的，但通常不是一个显著的成本，因为每张图像只需要做一次（如果灯是静态的，或者更少）。

14 基于群集错误

为了使用光切割方法，我们需要计算相当便宜和严格的簇误差上限（i. e. 方程2的精确版本和近似版本之间的差异）。通过计算簇的材料项、几何项和可见性项的上界，我们可以将这些上界与簇的强度相乘，从而得到精确和近似的簇结果的上界。由于两者都是正的，这也是集群错误的一个上限。他们的绝对差异）。

可见性术语。点光的可见性通常为零或1，但可能是分数的（例如，如果允许半透明曲面）。在任意场景中保守地限制可见性是一个难题，所以我们将对可见性项使用1的平凡上界（i. e. 所有的灯都可能是可见的）。

几何术语。下面列出了我们的三点光类型的几何术语，其中 y_i 是光的位置， f_i 是一个定向光的最大发射方向和到要被阴影的点 x 的方向之间的夹角。

A coordinate system with a horizontal x-axis and a vertical y-axis intersecting at the origin. The x-axis is labeled with (3) at its right end.

Light Type	Omni	Oriented	Directional
$G_i(\mathbf{x}) =$	$\frac{1}{\ \mathbf{y}_i - \mathbf{x}\ ^2}$	$\frac{\max(\cos \phi_i, 0)}{\ \mathbf{y}_i - \mathbf{x}\ ^2}$	1

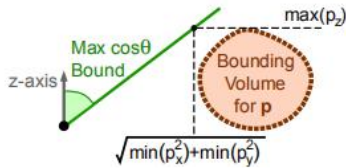


图4：将最小角度（以及最大余弦值）限定为边界体积。参见方程4。

方向光的上界是平凡的，因为它们的几何因子总是1。泛光灯也很容易。我们只是计算点x和簇的边界体积之间的最小距离。由于额外的余弦因子，定向光更加复杂。我们可以使用1的平凡余弦上界，但我们更喜欢一个更紧的界。

让我们从图4所示的简单问题开始。对于任何点 $p = [p_x, p_y, p_z]$ ，设q是从原点到p的向量与z轴之间的夹角。我们想找到在某个边界体积中的所有点上的cosq的上界。对于任何点p，我们都有 $\cos q = \frac{p_z}{\sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}}$ 。为了创建一个上界，我们首先用边界体积内的p_z的最大值替换分子，然后根据分子的符号选择p_x和p_y值来最小化或最大化分母¹：

$$\cos \theta \leq \begin{cases} \frac{\max(p_z)}{\sqrt{\min(p_x^2) + \min(p_y^2) + (\max(p_z))^2}} & \text{if } \max(p_z) \geq 0 \\ \frac{\max(p_z)}{\sqrt{\max(p_x^2) + \max(p_y^2) + (\max(p_z))^2}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

为了将其应用于定向光的边界cosfi，我们转换了这个问题，如图5所示。首先考虑集群中的每一个点对[x, yi]，并通过-yi来转换这两个点。这将所有的光转换为原点，但将点x扩展到与集群边界体积相同大小的体积上（边界体积的形状是相同的，但是倒置的）。第二，应用一个坐标变换来旋转z轴，以匹配簇的方向边界锥的轴。现在我们可以用方程4来计算体积和锥轴之间的最小夹角。如果这个角度位于边界圆锥内，那么我们只能使用1的平凡上界，但如果它位于外面，那么fi必须至少和这个角度减去圆锥的半角一样大。

材料术语。材料项Mi等于BRDF（双向反射率分布函数）乘以向量 $y_i - x$ 和在x处的曲面法线之间的夹角的余弦。我们已经描述了将角度的余弦界限定到一个边界体积（图4），这样就只留下BRDF有界。

我们目前的系统支持三种类型的BRDF组件：扩散或兰伯特，Phong [Phong 1975] 和各向同性病房 [Larson 1992]。在创建一个BRDF时，可以汇总多个组件。一个扩散的BRDF组件只是一个常数（i. e. 不依赖于查看或照明方向），因此是琐碎的绑定。Phong分量随矢量与光和镜面反射方向之间的夹角的余弦值而变化，并提高到某个指数。我们重用已经描述过的余弦边界机制来绑定任何Phong组件。同样的方法可以适用于任何围绕轴对称的类似BRDF组件。

各向同性的Ward BRDF不是对任何轴对称的，因为它是基于半角（即。曲面法线和观看和照明矢量之间的矢量之间的夹角）。

¹注意，如果p_x范围为-2到1，则最大（p_x）= 1和（最大（p_x））²=1，但最小（p）= 0和最大（p）= 4。²²

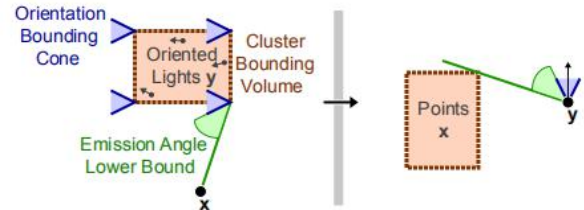


图5：限定发射角度（绿色）的概念转换。

我们还开发了一种相当便宜和紧凑的方法来将最小半角绑定到一个簇上。详情见[Walter 2005]。我们用数值方法测试了我们所有的边界，以确认它们是有效的。

原则上，光切割可以用于任何BRDF，只要有一个好的方法来绑定其在集群上的最大值。Delta组件（例如，镜像）由递归跟踪反射和/或反射光线的标准光线跟踪方法处理。

5个更多的照明应用程序

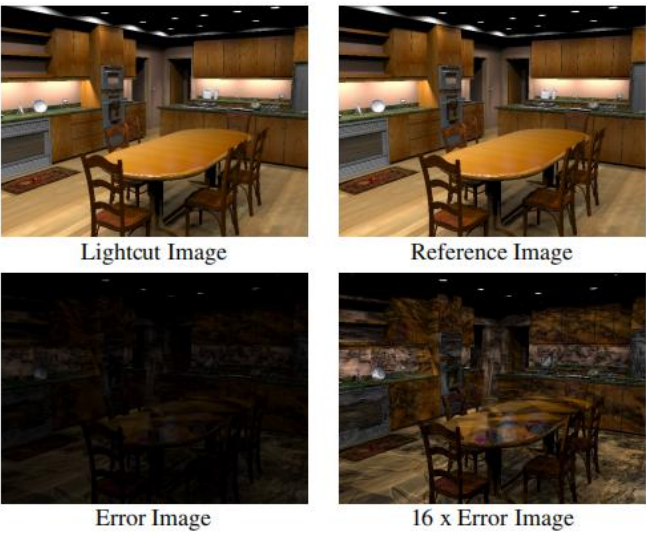
一旦我们有了一个可扩展的解决方案来稳健地近似来自大量点光的照明，我们就可以将它应用于其他难题。这里包括的例子是照明从：区域灯，高动态范围的环境地图，和间接照明。在光切割框架中集成不同的照明类型有许多优点。例如，当误差将被来自另一个组件的强照明所掩盖时，光切割会自动降低一个组件的精度。

区域灯光。来自区域灯光的照明和软阴影很难计算，而且标准技术通常与区域灯光的大小和数量的比例很差。一种常见的方法是使用多个点灯来近似每个区域的光，然而，所需的数量根据本地配置而有很大的不同。靠近区域灯或半暗带的位置需要许多点灯，而其他的则需要很少。许多启发式（e. g.，向下细分到某个固定的实角），但这些可能不能在各地工作，经常需要手动调整参数。在我们的系统中，每一束光都可以转换为保守的大量点。光切割算法将自动和自适应地选择在本地实际使用的样本数量。任何漫射区域的光都可以用其表面的定向光来近似。对于球形灯，在附录A中描述了一种使用泛光灯的甚至更好的方法。

HDR环境地图。高动态范围的环境地图是从现实世界的环境中捕捉照明并将其应用于合成场景的一种流行方法。从它们中计算精确的照明，特别是阴影，可能会非常昂贵。

最常见的方法是将环境映射转换为一组离散的方向灯。一个关键的问题是要使用多少个定向灯。使用太少的原因导致图像伪影，如块状阴影，而使用太多会大大增加渲染成本。例如，[阿加瓦尔等人。建议使用300个方向灯一般足够。根据我们的经验，300个对于孤立的对象就足够了，但是渲染具有显著遮挡和/或狭窄光泽的brdf的完整场景可能需要3000个或更多。光切割方法可以比以前的方法更有效地处理如此大量的光。

间接照明。间接照明（也称为全局照明）由于其图像质量和真实感而是可取的，但对于许多应用来说被认为太昂贵了。许多研究已经进入了增加他们的物理和数学ac-



点灯	平均切割尺寸	平均阴影射线	时间	参考资料
4608	264	259	128s	1096s

图6：厨房场景，直接光线来自72个区域光源。

副师，但也对低成本近似感兴趣

低保真度的权衡，只要它们不引入ob-可投影的图像伪影（例如，[表格和拉莫2004]）。

瞬间辐射分辨率就是这样一种方法。它首先跟踪光粒子因为它们有概率地分散过一个场景。然后是虚拟点灯光在这些散射位置创建，使它们聚集照明模拟了间接照明的效果。有成本vs。在选择虚拟灯的数量时的质量权衡。使用更多的光可以在间接照明中再现更多的细节但也增加了评估这么多灯的成本。先验结果大多局限于几十个或最多数百个vir-永恒的灯(例如，[Keller 1997; Wald等人。2002])。与我们的可伸缩算法上，我们可以使用数千个甚至数百万个虚拟灯在间接照明中重现更多的细节。

先前的即时辐射发射结果仅限于间接扩散

因为使用的虚拟间接灯数量较少。免除

从这个限制，我们的系统也可以包括一些光泽的信息-矩形效应。只有BRDF使用扩散组件将粒子命中转换到虚拟定向点灯，但不同于之前系统中，我们在它们照亮的点上使用完整的BRDF。

当使用即时辐射时，人们需要意识到它的内在性

限制它不能重现某些类型的间接照明

(e.g., 焦散现象); 如果需要使用其他方法，则必须使用其他方法。它

对于短期和/或有光泽的间接效应也有困难

尽管使用更多的虚拟灯会有帮助。粒子追踪是一个

随机过程，因此存在相当大的随机性

虚拟灯光的位置。对任何特定事物的贡献

光主要是噪声，而它只是通过将结果结合起来而产生的

许多灯，我们得到了统计上可靠的信息。没有

噪声抑制技术，这种噪声将高度可见

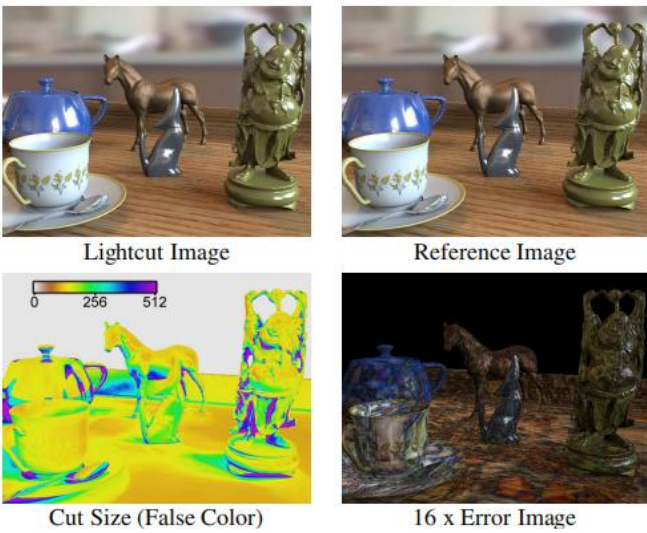
那些照明很容易被一个或几个位置所控制的位置

灯光（例如，凹角或尖锐反射）

噪声抑制通常是通过限制

来自虚拟光的最大贡献。这使结果产生偏差

但比令人反感的噪声人为因素更可取。[Keller 1997]



点灯	平均切割尺寸	平均阴影射线	时间	参考资料
3000	(187) 132	(168) 118	54s	424s

图7：由HDR环境地图照亮的画面场景。括号中是仅包含几何图形的像素上的平均值。

个别间接光的总贡献，MiGiViIi。我们不甘制集群的贡献，因为如果太亮，它们将由正常的光切割细化来处理。这个夹紧阈值可以由用户指定。²或自动确定如下。

我们的自动夹紧限制每个间接光的贡献不超过总结果的固定百分比。由于这个夹紧阈值是由相同的噪声粒子数据计算出来的，所以我们必须注意它不会强调噪声。我们使用了光切割选择/细化过程的误差比参数。g., 如果错误比为2%，则为1%）。在光切割细化过程中，我们会跟踪切割上可能需要夹紧的任何间接节点。根据我们的经验，自动夹紧需要的开销可以忽略不计，至少与手动调整的夹紧阈值一样有效，而且是用户需要担心的一个参数。

6光刻结果

在本节中，我们将演示将我们的光切割实现应用于不同照明的五个场景的结果。所有结果

使用2%的错误比和最大切割大小为1000个节点。所有

本节中的图像分辨率为640x480，每像素有一条眼射线，但由于反射和透明度，这有时需要阴影多个点。计时是一个具有两个3 GHz Xeon处理器的工作站，尽管我们的系统也能够有效地使用多台机器。

错误。光切保守地绑定了每个集群的最大误差，以确保单个集群的细化转换不可见。理论上，来自许多不同集群的错误仍然可以总结为一个大而可见的错误。在实践中，我们并没有发现这是一个问题，原因有二。每个集群的误差界限是最坏情况下的界限；实际的平均集群误差远远小于我们的2%界限。不相关错误的积累也比相关误差慢得多。e. $O(N)$ 对抗 $O(N)$ 。在建树过程中，我们特别随机选择具有代表性的灯，以确保集群错误将是

² $\frac{1}{100}$ 对图像的白点是一个合理的起点。

硬件限制值到最大255和[Wald等人。
有用户指定一个最小的距离使用时，com-
计算出一种间接光的几何因子。后者没有
使用非漫反射brdf，所以我们应用一个夹紧阈值



模型	多边形	点灯数量				每个像素平均数			树 构建	图像 时间
		直接	环境地图	间接的	合计	(d+e+i) 光刻尺寸	阴影射线			
厨房	388552	(72) 4608	5064	50000	59672	(54+244+345) 643	(0.8%) 478	3.4s	290s	
塔布劳	630843	0	3000	10000	13000	(0+112+104) 216	(1.1%) 145	0.9s	79s	
中央车站	1468407	(820) 38400	5064	100000	143464	(73+136+480) 689	(0.33%) 475	9.7s	409s	
寺庙	2124003	0	5064	500000	505064	(0+185+437) 622	(0.07%) 373	44s	225s	
大屏幕	628046	(4) 614528	0	25000	639528	(83+0+222) 305	(0.04%) 228	46s	98s	

图9：我们启用了所有照明组件的5个场景的640x480张图像的光切结果。平均切割尺寸包括如何切割许多都来自于这三个组成部分：直接地图、环境地图和间接地图。每像素的平均阴影光线也显示为灯光总数的百分比。混叠（例如，中央车站的窗口）是由于这里每像素只使用一条眼睛的光线。

统计上不相关。本质上，光切割提供了一个随机误差界，而不是一个绝对误差界；较大的总误差是可能的，但非常不太可能。

如图6所示的厨房模型是基于实际房屋的一部分。它包含72个区域源，每个区域源近似使用64个点灯，总共有4608个点灯。即使是仔细的检查，也会发现光切割结果和精确评估每个点光的参考图像之间没有明显的差异。错误图像几乎显示为黑色。将误差放大16倍表明，正如预期的那样，误差通常在较亮的区域更大，并且由使用集群和细化它之间的转换造成的许多不连续组成。光切割图像花费128秒，平均切割大小为每像素264和259条阴影光线，而参考图像花费更长的时间，为1096秒，平均每像素3198条阴影光线。阴影光线不会拍摄到材质或几何项为零的灯光。

图7中的场景模型在一个木制托盘上有几个具有不同光泽材料的物体，并通过捕获的HDR环境地图（来自[Debevec 1998]的厨房地图，与我们的厨房模型无关）进行照明。我们使用了[阿加瓦尔等人的技术。将此地图转换为3000个方向灯进行渲染。同样，在参考图像和光切割图像之间也没有明显的差异。一个可视化图显示了每个像素的切割大小（i. e. 光切割器上的节点数）。切割尺寸与渲染成本密切相关，在高遮挡区域往往最大。

可扩展性。随着点灯数量的增加，光切割的规模从根本上更好（i. e. 平盲vs. 线性）比以前的技术。为了证明这一点，我们通过改变数量来改变厨房中的点灯和上述场景例子的数量每个区域创建的点灯的灯光和方向灯

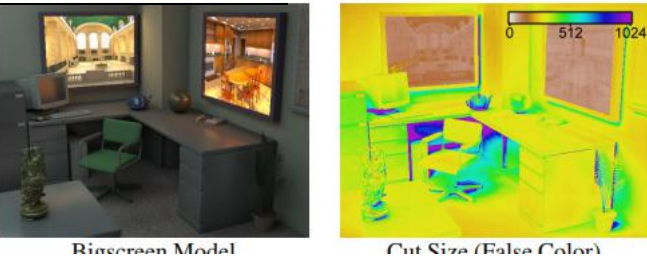
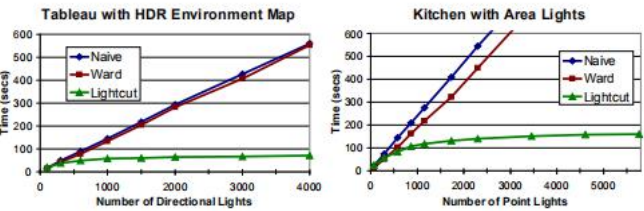
分别从环境地图中提取。图像时间vs. 图8中显示了光切割和朴素（参考）解决方案的点灯的数量。我们还与[Ward 1994]进行了比较，我们认为它在通用性、鲁棒性和处理数千盏灯的能力方面是替代方法中的最佳选择。

Ward的技术计算所有假设完全可见的光的潜在贡献，按递减顺序排序，然后逐步评估它们的能见度，直到剩余的潜在贡献低于评估灯总数的一小部分（在我们的比较中为10%）。因为阴影射线（i. e. 可见性测试）通常是主要的成本，减少它们通常超过了补偿这类成本（厨房也是如此，几乎是画面）。然而，成本仍然表现为如图所示的线性关系。假设我们有1000盏灯，其未被遮挡的贡献将大致相等。我们必须检查至少800盏灯的能见度，以满足10%的总误差限制³，并且这个数字随灯光呈线性增长。这个案例是沃德技术的致命弱点，或者是任何提供绝对错误界限的技术。光切割优越的可扩展性意味着它的优势随着灯数量的增加而迅速增长。

混合照明。我们可以使用这种可伸缩性来在场景中计算更丰富和更复杂的照明，如图9所示。中央车站是纽约著名地标性建筑的典范

城市和包括220个泛光灯分布在主大厅的天花板附近和600个吊灯的球形灯在侧走廊。真正的建筑实际上有更多的灯。寺庙是埃及寺庙的模型，是我们最复杂的几何在2. 100万三角形。这样的几何复杂性

³对未测试灯的可见性使用最佳值0.5。



随着点灯数量的增加。图10：大屏幕模型。统计数据见图9。

会导致混叠问题，因为我们每像素只使用一条眼睛射线。下一节将介绍重建切割，使我们能够以降低成本进行抗锯齿。大屏幕模型（图10）显示了一个办公室，由两个头顶区域的灯（每个64个点）和两个大型HDR显示器显示我们的其他场景的图像。这些显示器的分辨率为640x480，通过将每个像素转换为一个点光来模拟。

我们已经添加了一个来自[Preetham等人的太阳/天空模型。它就像一个HDR环境地图，到厨房、中央车站和寺庙。太阳转换成64个方向光，天空转换成5000个方向光，均匀地分布在方向球面上。我们还使用即时辐射度方法为所有模型增加了间接照明。在厨房和中央车站的模型中，只有一小部分来自太阳/天空的粒子通过窗户进入室内；许多间接的灯最终出现在建筑物的外部。使用我们的可伸缩算法，我们可以通过产生更多的间接光来进行补偿。寺庙使用最间接的灯光，因为它的模型覆盖了最大的面积。

使用光切割时，灯光的数量与图像成本并不密切相关。相反，图像成本的最强预测器是光源的遮挡程度。因此，厨房，特别是中央车站是最昂贵的，因为他们的光源被高度遮挡，特别是太阳/天空。虽然寺庙和大屏幕有更多的点灯和几何形状，但它们更便宜，因为它们的能见度更低。

阴影射线是光照的主要成本，消耗大约总时间的50%，尽管这是我们代码中最优化的部分（用C语言编写，而其余的是Java）。计算错误界限会消耗另外20%，其中10%是着色。各种较小的操作，包括树的遍历、维护最大堆、更新估计值等。消耗剩下的。树的建立开始对最多的灯很重要，但有比我们简单的贪婪方法快的方法。

绑定紧密性。从集群中廉价地绑定最大贡献和错误的能力对于我们的可伸缩性是必不可少的。使用更严格（可能更昂贵）的边界可能会减少平均切割规模，并有可能降低总体成本。在图11中，我们展示了如果我们几何项和材料项的乘积有精确的边界，将会产生的切割尺寸吉米。这是我们所能希望在没有能见度限制的情况下达到的最好的效果。总的来说，我们的边界表现得很好。间接光由于其更广泛的分散而更难绑定，但我们的边界仍然表现良好。显著的进一步收益可能需要有效的保守的可见性界限。这在许多特定的情况下都是可能的（例如，见[Cohen-Or等人]。），但这一个普遍未解决的问题。

模型	照度	点灯	平均切割尺寸	
			光切割	精确的Gi Mi绑定
厨房	直接+	4608	264	261
	间接	54608	643	497
塔布劳	Env地图+	3000	132	120
	间接	13000	216	153
寺庙	太阳天空	5064	294	287

图11：更紧密的边界对光切割尺寸的影响程度。

7重建削减

重建切割是一种利用空间相干性来降低平均阴影成本的新技术。其想法是在图像上计算稀疏的光切。g.，在图像块的角落），然后适当地插值它们的照明信息，以阴影图像的其余部分。虽然光切割允许

从数千个或数百万个点灯中计算出可扩展的精确照明，它们通常仍然需要在每个阴影点上拍摄数百条阴影光线。通过采用稍微那么保守的方法，重建切割能够利用照明平滑度大大降低阴影成本。

最简单的方法是简单地插值来自稀疏光切割（e.g.，高洛德阴影），但这将导致令人反感的模糊高频图像特征，如阴影边界和光泽高光。这一基本思想的许多扩展已经被提出，以保留特定类型的特征（例如，[Ward和赫克伯特1992]插值辐射度以保持弥散纹理和[Kivnek等人]。使用多方向系数来保持低频光泽度），但我们希望保留所有的特征，包括尖锐的阴影边界。

为了计算某个点的重建切割，我们首先需要一组附近的样本。已经计算和处理光切割的位置，便于插值）。然后，我们对全局光树执行一个自顶向下的遍历。如果所有的样本都同意一个节点被封闭，那么我们立即丢弃它。如果一个节点的照明在样本中非常相似，那么我们使用假设灯廉价地插值它。这些是特殊的定向灯，旨在模拟样本中记录的集群的聚集行为。否则，我们默认为光切割风格的行为；细化树，直到误差足够小，并使用方程2中的簇近似，包括拍摄阴影射线。

插值或丢弃节点，特别是在树中位置较高时，可以提供极大的成本节约。然而，当样本跨越阴影边界或其他尖锐特征时，我们将为受影响的节点恢复到更健壮但更昂贵的方法。因为重建切割有效地包括了可见性扑杀，所以它们比光切割受到高遮挡场景的影响更小。

样品一个样本k是通过首先计算一个点x的光切割来创建的 k 和查看方向 w^k 。这将包括计算辐射估计数 L_n^k 在每个光树节点n上的光切割使用方程2。对于切割上方的每个节点，我们都进行了定义 L_n^k 作为切割上所有后代的辐射估计的总和。同样，总辐射估计 L_1^k 是切割中所有节点的总和。

为了将光切割转换为示例，我们创建了假设或方向点灯（方向为 d_n^k 和强度 γ ）为每个节点上或以上的切割。 k_n 它们的方向模拟了来自相应星簇或光的入射光的平均方向，它们的照明精确地再现了亮度估计 L_n^k 在样本点。骗子的灯从不被遮挡，因此使用起来相对便宜（i.e.可见性项和几何项都等于1）。

对于切割上的节点，冒名者方向 d_n^k 和它的代表之光是一样的。对于切口上方的节点， d_n^k 是其后代在切割上的方向的平均值，由它们各自的辐射估计数加权。利用这个方向，我们可以评估骗子的物质项 M_n^k 其强度 γ_n^k 我们还计算了第二个强度 G_n^k 基于总辐射估计，并用于计算相对阈值（即。节点相对于总照度的相对大小）。

(5)

(6)

偶尔我们需要一个样本的光切割下面的一个节点的定向光。这些是根据需要创建的，并在切割上使用与它们的祖先相同的方向，但顶替者的强度随着节点的簇强度之间的比率而减少 ic 以及它的祖先的祖先。

$$\gamma_n^k = L_n^k(x^k, \omega^k) / M_n^k(x^k, \omega^k)$$
$$\Gamma_n^k = L_1^k(x^k, \omega^k) / M_n^k(x^k, \omega^k)$$

确切的样本大小取决于光切割，但24KB是典型的。

样本在光切割上或以上的每个节点上存储32个字节

包括7个浮点值(1个为 G_n^k 和d，各有3个 γ_n^k 和 γ)，如果存在其子数据的偏移。我们将图像分解成块，这样在任何时候只保留一小部分样本。

计算重建剪切。给定一组样本，我们想用它们来快速估计方程1。重建切割使用自上而下的全局光树遍历。在访问的每个节点上，我们计算最小和最大的冒名者

锡利斯 γ_n^k 在样本k和一个阈值 t_n 上，光切割误差比(e.g., 2%)乘以G的最小值 G_n^k 在样本上。然后，我们从中选择第一个适用的规则：

1. **丢弃。** γ_n^k 如果 $\max(\gamma) = 0$ ，那么该节点在所有样本上的亮度都为零，并且假设这里的亮度也为零。
2. **插值。** γ_n^k 如果 $\max(\gamma) - \min(\gamma) < t_n$ 和 $\min(\gamma) > 0$ ，则我们计算d的加权平均值 G_n^k 和 γ_n^k 创建一个插值的假设或定向光。然后，这个节点的估计值等于插值方向乘以插值强度的材料项。
3. **群集评估。** γ_n^k 如果 $\max(\gamma) < t_n$ 或如果我们是在一个叶节点(即，然后我们用方程2估计亮度。这包括，如果材料和几何项不是零，则向代表光拍摄阴影光线。
4. **改进。**否则，我们递归树，并对这个节点的两个子节点执行相同的测试。

虽然上述规则涵盖了大多数情况，但需要一些改进以防止偶尔的工件(e.g., 在光滑材料上)。

首先，我们不允许在光滑的高光部分内进行插值。扩散BRDF的最大可能值为 $1/p$ 。当计算插值假设者的材料项时，如果其BRDF值大于 $1/p$ ，则方向必须位于材料的光泽瓣内，我们不允许对该节点进行插值。其次，只允许对至少一个样本光照点或低于的节点进行群集评估。所有样本光切割下面的节点不使用插值，因为它们没有很好的信息来插值。第三，如果集群计算的结果比预期的要大得多，那么我们将递归地计算它的子项。

图像块。首先将图像分割为不共享样本信息的16x16像素块。这使得存储需求保持在较低的水平，并允许易于并行处理。为了处理每个块，我们首先将其划分为4x4像素的块，但可能会根据以下测试进一步划分。

为了计算一个块，我们在它的角落计算样本，通过其像素拍摄眼睛射线，并测试得到的点是否与角落样本匹配。如果使用抗混叠，每个像素将会有多个眼睛射线。如果一组眼睛射线都击中了相同类型的材料，并且表面法线相差不超过某个角度(例如，30度)，则可以对它们进行匹配。我们还使用锥体测试来检测可能的局部阴影条件，需要块细分(e.g., 见图12)。对于每条眼睛射线，我们构造一个从交点开始，以局部表面法线为中心。如果任何其他眼射线的交点位于这个锥内，那么该块不能通过锥测试。锥测试使用真实几何法线，不受凹凸贴图或插值法线等阴影效果的影响。

如果眼射线不匹配，并且块大于一个像素，那么我们将块分成四个较小的块，然后再试一次。如果块是像素大小的，我们放宽要求，省略锥体测试，只要求每个眼睛射线匹配至少两个附近的样本。如果仍然没有足够的匹配样本，那么我们在眼睛处计算一个新的样本。

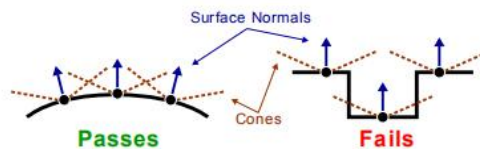


图12：块状锥体试验。（右）失败，因为上面的两个点位于下点的锥体内。（左）通过，因为没有点位于由其他点定义的圆锥内。

在块细分后，我们使用重建切割计算每一个剩余的眼睛射线的颜色。对于大于像素的块，我们使用四个角作为附近样本的集合，并在插值时使用图像空间双线性插值权重。在像素大小的块内的眼睛射线使用它们的匹配样本集和插值权重与表面点和样本点之间的平方的世界空间逆距离成比例。

8重建剪切结果

在本节中，我们将介绍一些将重建切割技术应用于我们的场景的结果。结果图像和统计数据如图13所示。这些结果是自适应抗锯齿的[画家和斯隆1989]使用每像素5到50条眼射线。稀疏样本的计算使用与第6节相同参数的光切割。大部分的阴影都是使用在样本之间进行智能插值的重建切割来完成的。

通过利用空间相干性，重建切割可以使用比光切割更少的阴影光线来遮蔽点。虽然光切割需要几百条阴影光线，但在我们的结果中，重建切割平均使用少于14条。事实上，我们的大多数阴影射线被用于计算稀疏样本(光切割)，即使有15-25倍以上的重建切割。这使得我们能够生成更高质量的图像，成本比单独使用光切割低得多。对于相同大小的图像，结果与第6节相比，质量更高，成本相似或更低。此外，对于较大的图像，渲染成本的增长比像素数要慢。

样本在自适应大小的图像块的角处计算(大小在4x4到1x1像素之间)，需要时偶尔在一个像素内计算(红色显示为1x1+)。如寺庙图像所示，所有图像中的大部分像素都位于4x4块内。即使每像素需要多个眼射线，平均每像素也需要少于一个样本。我们可以允许更大的区块(e.g., 但是，让样本在已经稀疏的地方更加稀疏，好处更少，而且可能会适得其反，因为重建切割成本与附近样本的相似性密切相关。

由于重建切割的准确性依赖于是否有跨越局部照明条件的附近样本，因此在样本之间有可能遗漏小的特征。虽然这种情况偶尔也会发生，但也很少有问题。例如，在一些地方，插值平滑了寺庙柱子上的凹槽，但错误很小，我们发现人们很难注意到它们。块细化规则的未来改进可以修复这些错误。

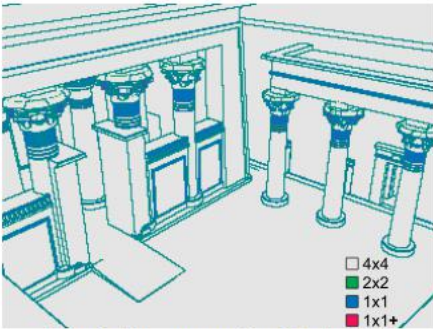
一个大都市解决方案及其与我们的结果放大(5倍)差异如图14所示。大都市[Veach和Guibas 1997]被认为是最好和最快的通用蒙特卡洛解决者。它的计算时间是我们的13倍，而且仍然包含一些可见的噪声。主要的区别是噪音在大都市的解决方案和一些角落变暗在我们的



Kitchen



Tableau



Temple (Reconstruction Block Size)



模型	点灯	每个像素平均数		每个像素的平均阴影射线		每次重建的平均时间		图像时间	
		眼射线	样品	样品	侦察削减	阴影射线	插值	1280x960	640x480
厨房	59672	5.4	0.29	143	50	9.1	14.4	672s	257s
塔布劳	13000	5.4	0.23	50	41	10.6	17.8	298s	111s
中央车站	143464	6.9	0.46	225	93	13.3	11.5	1177s	454s
寺庙	505064	5.5	0.25	91	52	9.4	6.0	511s	189s
大屏幕	639528	5.3	0.25	64	24	4.6	15.0	260s	98s

图13：我们场景的1280x960图像（有注明的除外）的重建切割结果。图像自适应使用每像素5到50条眼线。样本（图9中的光切割）是稀疏计算的，大多数阴影是使用重建切割来智能插值来计算的。重建切割比切割便宜得多，需要的阴影光线也少得多。大屏幕图像如图1所示。

结果后者是由于瞬时光度不能再现非常短的间接照明效应。

9结论

我们已经提出了光切割作为一个新的可扩展的照明统一框架。核心组件是一个强次线性算法，用于使用感知误差度量和保守的每个簇误差边界来计算来自数千个或数百万个点光的照明。我们已经证明，它可以大大减少阴影射线的数量，从而减少计算各种光源的照明所需的成本，包括区域光、HDR环境地图、太阳/天空模型和间接照明。此外，它可以处理非常复杂的场景与详细的几何形状和光滑的材料。我们还提出了重建切割，进一步的速度阴影利用相干性在照明。

有许多方法可以改进和消除这项工作



Maternalic Solution



5 x Difference

图14：与寺庙的都市形象对比。

照料例如，扩展到额外的照明类型（例如，不由即时辐射处理的间接组件），集成更多类型的光源，包括非漫射光源和聚光灯，开发更多BRDF类型的边界，更正式的分析光切割随机误差，进一步细化重建切割规则以利用更多的一致性，并增加保守的可见性边界以进一步加速光切割。

确认信息

非常感谢模特们：耶利米·费尔班克斯（厨房），威尔·斯托克斯（大屏）、莫雷诺·皮科洛托、亚瑟明·科洛卢、安妮·布里格斯、达娜·盖特曼（中央车站）、维罗妮卡·桑德斯特、帕特里克·莱达以及布里斯托大学（太阳穴）的图形组。这项工作得到了美国国家科学基金会拨款ACI-0205438和英特尔公司的支持。本文所表达的观点是作者的观点，并不反映官方政策或官方政策
美国空军，国防部，或美国空军的过渡。S. 政府

参考文献

- 阿加瓦尔。，RAMAMOORTHY, R ., 归属, s. ., 和詹森, h. W. 2003. 环境地图的结构化重要性抽样。 *ACM图形交易* 22, 3 (7月), 605-612。
- 布莱克威尔, h. R . 1972. 亮度差阈值。在 *《感觉生理学手册》* 中, 第1卷。VII/4: 视觉心理物理学。SpringerVerlag, 78 - 101。
- 科恩或d. , 克里萨瑟, y. L ., 西尔瓦, c. T. , 和杜兰德, f. 2003. 对演练应用程序的可见性进行了调查。 *IEEE可视化和计算机图形学交易* 9, 3, 412-431。
- 德贝维克, p. 1998. 将合成对象渲染成真实的场景：连接传统的和基于图像的图形与全局照明和高动态范围的摄影。在签名图的会议记录98, 计算机图形学会议记录, 年度会议系列, 189-198。
- 费尔南德斯. , 巴拉, k. , 和格林伯格, d. P. 2002. 直接照明加速的局部照明环境。在 *渲染技术2002: 第13届欧洲图形渲染研讨会*, 7-14。
- 汉拉汉, p. , SALZMAN, D . 和辅助, l. 1991. 一种快速的分层辐射传递算法。 *《计算机图形学》* (第91章), 第1卷。25, 197 - 206。
- 哈森弗拉茨, jm. . -, 拉皮尔, 米. , HOLZSCHUCH, N ., 和银狮, f. 2003. 对实时软阴影算法的调查。在 *欧洲图形, 欧洲图形, 欧洲图形。最先进的报告。*
- 延森, h. W. 2001. *使用光子映射的真实图像合成*。A. K. 彼得斯有限公司。
- 凯勒。1997. 瞬时辐射度。在 *签名图97, 计算机图形学记录, 年度会议系列, 49-56。*
- 曼谷, A. J . F. 和詹森, f. W. 1992. 包括漫反射在内的光线追踪中区域光源的自适应采样。 *计算机图形学论坛 (欧洲图形学 '92) 11, 3日 (9月), 289-298。*
- KOLLIG, T. , 和凯勒, A. 2003. 通过高动态范围的图像进行高效的照明。在 *欧洲图形渲染研讨会: 第14届欧洲图形渲染研讨会, 45-51。*
- 基瓦'NEK, J ., GAUTRON, P. , 帕塔奈克, s. , 还有一次尝试, k. 2005. 辐射高速缓存, 以实现高效的全局照明计算。 *IEEE网站上的可视化和计算机图形学学报。*
- 拉尔森, g. J . W. 1992. 各向异性反射的测量和建模。 *《计算机图形学》* (第92章), 第1卷。26, 265 - 272。
- 画家, j. , 和斯隆, k. 1989. 通过自适应渐进细化的抗锯齿光线追踪。在 *计算机图形学 (第89章), 第1卷。23, 281 - 288。*
- 佩凯特, e. , POULIN, P. , 和, g. 1998. 用于快速渲染具有多种灯光的场景的灯光层次结构。 *计算机图形学论坛* 17, 3, 63-74。
- 方, b. T. 1975. 为电脑生成的图片提供相应的照明。 *通勤*。ACM 18、6、311-317。
- 艾瑟姆, A. J ., 雪莉, p. S ., 和打, b. E . 1999. 一个实用的日光分析模型。在签名图的会议记录99, 计算机图形学会议记录, 年度会议系列, 91-100。
- 切尔, A. , STAMMINGER, M ., 和赛德尔, hp. . -2001. 节俭的最后聚集。在 *渲染技术2001: 第12届欧洲图形渲染研讨会, 1-12。*
- 切尔, A. , STAMMINGER, M ., 和塞德尔, h. 2002. 基于网格的最终聚集在复杂的集群场景。 *计算机图形学论坛* 21、3、547-556。

- 雪莉, p. , 王, c. , 和齐默尔曼, k. 1996. 蒙特卡罗技术的直接照明计算。 *ACM图形交易* 15, 1 (1月), 1-36。
- SILLION, F. X ., 和PUECH, C. 1994. *辐射好奇号和全球照明*。摩根考夫曼出版公司。
- SMITS, B ., 阿尔沃, j. , 和格林伯格, d. 1994. 一种针对复杂环境下辐射强度的聚类算法。在 *签名图94的会议记录中, 年度会议系列, 435-442。*
- TABELLION, E ., 和拉莫莱特, A. 2004. 一种用于计算机生成薄膜的近似全局照明系统。 *ACM图形交易* 23, 3 (8月), 469-476。
- VEACH. , 和GUIBAS, L. J . 1997. 大都会轻型运输。在签名图97, 计算机图形学记录, 年度会议系列, 65-76。
- 沃尔德, 我. , KOLLIG, T. , BENTHIN, C . 凯勒, A. , 和斯劳萨利克, p. 2002. 交互式全局照明使用快速光线跟踪。在 *渲染技术2002: 第13届欧洲图形渲染研讨会, 15-24。*
- 沃尔德, 我. , BENTHIN, C ., 和斯劳萨利克, p. 2003. 在复杂和高度封闭的环境中进行交互式全局照明。在 *欧洲图形渲染研讨会: 第14届欧洲图形渲染研讨会, 74-81。*
- 沃尔特, b. , ALPPAY, G ., 拉格勒斯, e. P. F. , 费尔南德斯. , 和格林伯格, d. P. 1997. 为非漫射演练安装虚拟灯。在 *签名图97, 计算机图形学记录, 年度会议系列, 45-48。*
- 沃尔特, b. 2005. 关于BRDF病房的笔记。技术报告PCG-0506, 康奈尔大学计算机图形学项目, 4月。
- 病房, g. J . 和赫克伯特, p. 1992. 辐照度梯度。在 *第三届欧洲图形渲染研讨会上, 85-98。*
- 病房, g. 1994. 用于光线跟踪的自适应阴影测试。在 *计算机图形学中的逼真渲染 (第二届欧洲图形渲染研讨会论文集), 施普林格-verrag, 纽约, 11-20。*
- 吴, A. , POULIN, P. , 和第四个, A. 1990. 对阴影算法的调查。 *IEEE计算机图形与应用程序* 10, 6 (11月), 13 - 32。
- ZANINETTI, J ., 男孩, p. , 和, b. 1999. 一种区域光源和日光的自适应方法。 *计算机图形学论坛* 18日、3日 (9月), 139-150年。

球形灯

任何漫射区域的光都可以使用其表面的定向光进行模拟。对于球形灯，我们开发了一种更好的技术，使用泛光灯（这更匹配远场发射）。将泛光灯放置在球面表面会错误地使它的轮廓显得过于明亮。同样地，球体体积内的均匀分布也会出现相反的问题。然而，通过选择球体内正确的体积分布，我们可以正确地匹配一个球形光的发射。

$$d(x) = \frac{1}{\pi R^2} \quad (7)$$

归一化点分布d (x) 定义在一个半径为R的球体内，其中r²(x) 是距离球体中心的平方距离。这种分布的美妙之处在于，当从球外的任何位置观察时，它在球的视觉角上呈现出均匀的分布，这正是我们所需要的性质。我们还需要一种方法来根据这个分布来生成随机点。给定三个均匀分布的随机数，x1, x2, x3, 在[0, 1] 范围内，我们可以计算以原点为中心的球体的正确分布的点：

$$\begin{aligned} x &= R\sqrt{\xi_1} \cos(2\pi\xi_2) \\ y &= R\sqrt{\xi_1} \sin(2\pi\xi_2) \\ z &= \sqrt{R^2 - x^2 - y^2} \sin(\pi(\xi_3 - 1/2)) \end{aligned} \quad (8)$$

由球形灯产生的泛光灯的行为与普通的泛光灯完全相同，除了在计算它们的可见性因素时，它们只能被球体外的几何形状遮挡(i. e. 它们的阴影射线终止在球体的表面)。