

基于分治采样的实时复杂光源照明

姚春晖^{1,2,3,4}, 王斌^{1,3,4}, 雍俊海^{1,3,4}

¹(清华大学软件学院, 北京 100084)

²(清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

³(信息系统安全教育国家重点实验室, 北京 100084)

⁴(清华信息科学与技术国家实验室, 北京 100084)

Real-Time Illumination of Complex Lights Using Divided Sampling

YAO Chunhui^{1,2,3,4}, WANG Bin^{1,3,4}, YONG Jun-Hai^{1,3,4}

¹(School of Software, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

²(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

³(Key Laboratory for Information System Security, Ministry of Education of China, Beijing 100084, China)

⁴(Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Beijing 100084, China)

Abstract: Existing methods for real-time illumination of complex lights, either require long time pre-computation, or only focus on some special types of illumination. Because computing different kinds of illumination requires different sampling strategies, this paper introduces a novel efficient framework for rendering illumination of complex light sources, in which the pre-computation is not necessary. We divide the rendering equation into three parts: high-frequency term, low-frequency term and occlusion term. Each term is computed by a proper sampling strategy. High-frequency term is solved by importance sampling the BRDF, while low-frequency term is computed by importance sampling the light sources. Occlusion term is computed with depth information in screen-space, and the required number of samples is greatly reduced by interleaved sampling. Our framework is easy to implement on GPU and can solve many real-time rendering problems. We take real-time environment-map-lighting as an example for demonstrating applications of this framework. The results show that our technique can handle complete light effects with higher quality than previous works.

Key words: real-time rendering; importance sampling; complex light sources; environment mapping

摘 要: 现有渲染复杂光源光照的技术大多需要一个长时间的预处理阶段, 一些不需要预处理的技术往往只专注某一类型的光照效果。为了解决不同类型光照计算需要不同类型采样策略的问题, 本文介绍一个新的、不需预计算的高效渲染复杂光源光照的框架。通过对渲染方程进行分治采样, 统一的光照计算被分解为高频反射、低频反射以及遮挡阴影三项。每一项采用不同的采样策略计算, 以使各部分都能在较短的时间内得到高质量的渲染结果。高频反射项根据材质 BRDF 的特性进行重要性采样。低频反射项是以光源亮度作为采样权重对光源进行预采样计算得到的。遮挡项的结果由屏幕空间的深度信息采样计算得到。由于遮挡阴影的低频特性, 间隔采样技术可以在

保持视觉效果的同时大大减少每个像素的采样数量。此渲染框架易于在 GPU 上实现,且可以解决很多实时渲染问题。本文展示了如何应用此框架实时渲染环境映射下的光照。实验结果以及对比表明该技术能够处理完整的复杂光照效果,且达到比现有技术更高的渲染质量。

关键词: 实时渲染, 重要性采样, 复杂光源, 环境映射

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

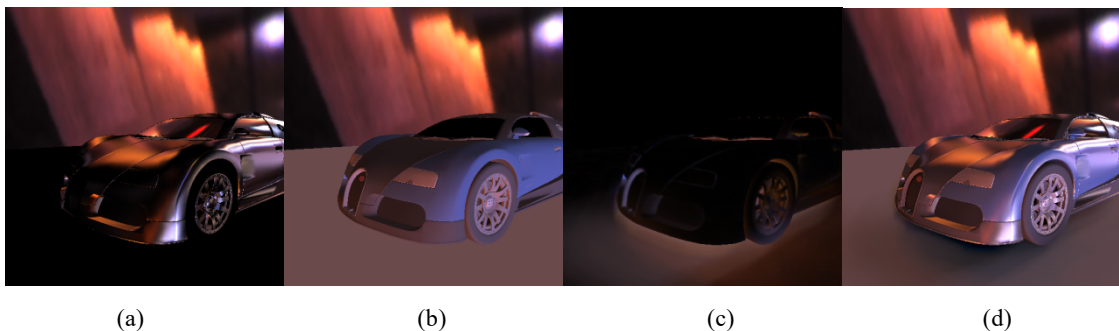


图 1.使用分治的采样策略,分别采样计算:(a) 高频反射、(b) 低频反射、(c) 遮挡,保证了高效高质地渲染各个部分的光照效果。(d)最终结果=(a)+(b)-(c)。整个渲染过程完全无需预计算,且达到 30Hz 到 60Hz 的实时渲染速度。

1 简介

简单类型的光源模型,如点光源、方向光源等,由于其光照计算十分简单高效,被应用在很多实时渲染工作中,但是它们无法真实地还原现实生活中的光源,产生令人信服的渲染效果。使用面光源、环境光、间接光等复杂光源模型作为场景光照的输入,能够得到逼真的渲染效果,但是其照明计算过程十分耗时。为达到实时效率,当前大多数关于复杂光照渲染的工作存在很多限制,如只能处理低频的光照^[1],忽略可见性^[2],或者只能处理静态场景^[3]。有些技术去除了这些限制,但需要较长的渲染时间,只能进行离线渲染或低频率的交互渲染^[4,5]。精确高效地渲染复杂光照下的场景,是当前真实感图形学中一个十分重要而富有挑战的课题。

处理复杂光源光照的一个常用的方法是将单个复杂光源采样为很多个简单光源,使用这些简单光源照明的综合结果来近似真正复杂光源的光照,例如将基于图像的环境光源采样为多个方向光源^[6]。这种采样方式可以将复杂的光照问题转化为简单的光照计算来处理。为了得到良好的渲染结果,采样的数目必须足够多,由此产生的问题是大量的采点计算会占用很长的处理时间。一些改进的技术,如重要性采样^[7]和间隔采样^[6],可以很显著地降低需要的采样数目。但是这些采样的方法都存在一些适用范围的限制,很难找到一个对所有光照效果通用的高效采样方法。

此问题产生的根本原因是原有方法都试图用同一组采样集来整体计算渲染方程的结果,而实际上渲染方程中不同因子的变化特性适合不同的采样策略。本文介绍一个新的基于分治采样的高效渲染复杂光源光照的框架。主要的思想是将统一的光照计算分为不同的部分,如高频反射、低频反射以及遮挡阴影等,根据它们的特性采用不同的采样策略,以求每一部分都能在较短的时间内得到高质量的渲染结果,最后将各个部分的结果组合成为最终的输出图像。

该框架是从分析真实感渲染的数学基础渲染方程入手,得到的一个适合于高效渲染的分治采样框架。因此很多基于渲染方程的渲染方法都可以通过本文提出的这个框架改进其采样质量和效率。本文将介绍如何应用此框架处理环境映射下直接光照的实时渲染问题。文中展示的方法实现简单,并且不需要任何预计算。实

际上,本文方法还可以用于其他很多实时渲染问题。如当前流行的用于处理间接光照的即时辐射度技术^[18,19],都可以应用本方法分治采样虚拟点光源 (Virtual Point Lights, VPLs),从而提高渲染效率和质量。

2 相关工作

2.1 实时复杂光照渲染

复杂光照渲染技术大多使用图像表示的复杂光源。Blinn 和 Newell^[7]提出环境映射的方法,将无限远的环境光照存储为图像,并用它来处理镜面反射。这种基于图像的光源表示被后来的技术广泛采用,并扩展到为任意类型反射表面提供照明。对环境映射进行简单采样的最大问题在于其计算量十分庞大,很难实现实时渲染。为了减少渲染时的计算量,预计算光传输技术 (PRT) 使用球面谐波函数^[1]或其他基函数^[8,9]表示光照和几何信息。这种基函数表示可以在渲染时快速计算环境映射光照和阴影,但是其缺点是需要长时间的预处理。另一类方法使用很多采样技术将基于图像的环境光采样为许多个方向光,使用这些方向光的照明结果近似原始结果^[5,10,11]。这些方法的预计算时间较少,并且可以较好地保持光源的高频特性,但是不适用于处理高频的 BRDF 材质反射。为处理高频的光滑材质反射,一些技术^[12,13,14]通过过滤环境映射的图像和预处理 BRDF 来快速计算物体表面的高频反射,但是需要一个预计算过程。Colbert 和 Krivanek^[15]提出无需预计算的针对 BRDF 进行重要性采样的方法,但是问题是难以处理低频反射,因为低频反射在各个输入方向上的权重变化不大,很难进行有效的重要性采样。本文方法分解了高频与低频反射,通过将光源采样为多个简单方向光计算低频反射,同时使用环境光图像过滤来处理高频反射,结合两者的优点,实现了无预计算的完整光照效果的实时渲染。

2.2 可见性判断

光在传播过程中可能由于其他物体的遮挡而无法照射后面的物体。真实地模拟物体光照必须判断输入光对于当前点是否可见,但是这种可见性判断需要查询场景的整体信息,因而难以在实时渲染中高效地实现。对于简单的光源,处理可见性的技术一般称为阴影生产技术。一些软阴影技术^[15,16]可以模拟较小的单一亮度的面光源产生的阴影。然而这些技术无法处理本文关注的更加复杂光源的阴影,如环境映射光。由于复杂光源的可见性计算十分复杂,一些技术^[2,19]放弃了可见性的判断,以达到实时渲染的目的,显然这种省略无法得到正确的结果。PRT 技术^[1,8,9]可以渲染环境映射光的阴影,他们的缺点是需要长时间的预计算。一些工作^[4,15,18]将复杂光源的可见性用多个 Shadow Mapping 采样计算。但是要得到高质量的阴影采样数目必须很多,因此这些技术中可见性判断是性能的瓶颈。

在离线渲染中,环境遮挡技术^[20]模拟了常量环境光下的阴影,可以得到很好的视觉效果。基于此技术,一些实时方法^[21,22]在屏幕空间采样来近似计算环境遮挡,通过抖动采样或间隔采样加上图像过滤的方式,实现了很高效率的渲染。最近 Ritschel 等^[23]改进了这些屏幕空间环境遮挡技术,通过在采样过程中加入光照亮度实现了方向性遮挡的计算,很好地还原了复杂光源的阴影。但是由于其光照和阴影是同时采样的,无法在模糊阴影的同时保持高频的直接光照。在本文中可见性的计算方法通过光照和遮挡的分别采样克服了文献^[23]中方法存在的问题。

2.3 分解光照计算

对光照计算进行分解,并使用不同技术进行计算是渲染技术中的常用方法。由于直接光照可以由简单的方法计算,很多技术^[18,19]只专注于实时渲染间接光照,它们得到的间接光照结果再加上传统技术得到的直接光照合成最终结果。Jensen^[24]将光照按照处理技术不同分为直接光照、镜面反射、间接光照和焦散四个部分,并使用光线追踪和光子映射分别计算前两个部分和后两个部分。基于 PRT 的技术^[1,8,9]将 BRDF 与光照通过投影到一组基函数上进行分离,使得场景和光源信息可以分别计算。和这些方法不同,本文方法以采样方式作为分解标准,并且将遮挡从光照中分离出来。环境遮挡^[20,21,22]同样将遮挡项分离出来,其遮挡项是以乘积的方式与光照结合,因此它只能处理各项同性的光照产生的阴影。与此相比,本文方法采用加和的方式分离光照与遮挡,因而能够处理各项异性光照产生的阴影。

3 算法原理

3.1 分治采样计算渲染方程

根据光照计算的渲染方程^[26], 物体上某一点 \vec{x} 在出射方向 $\vec{\omega}_o$ 上的出射辐射率 L 等于在物体表面一点对上半球各个入射方向 $\vec{\omega}$ 上光照的积分:

$$L(\vec{x}, \vec{\omega}_o) = \int_{\Omega} E(\vec{x}, \vec{\omega}) f_r(\vec{x}, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}) V(\vec{x}, \vec{\omega}) d\vec{\omega} \quad (1)$$

其中 E 是入射光强 (带有余弦权重的入射辐射率), f_r 是物体的 BRDF 反射函数, V 是可见性函数 (0 或 1)。大多数现有方法都通过对 N 个方向的蒙特卡洛采样近似地求解该积分, 即

$$L(\vec{x}, \vec{\omega}_o) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{E(\vec{x}, \vec{\omega}_i) f_r(\vec{x}, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) V(\vec{x}, \vec{\omega}_i)}{p(\vec{\omega}_i)} \quad (2)$$

其中 $p(\vec{\omega}_i)$ 是采样的概率分布函数 PDF。如果是均匀的随机采样, 则每个采样点的概率密度相等, 都为 $p(\vec{\omega}_i) = 1/2\pi$ 。为了在不增加采样数目的条件下提高结果质量, 计算过程应用重要性采样, 即尽量在光照显著的方向上生成更多的采样点。理论上最佳的方案是根据反射结果, $E(\vec{x}, \vec{\omega}_i) f_r(\vec{x}, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}_i) V(\vec{x}, \vec{\omega}_i)$ 的大小作为采样概率的权值。但是该项的结果和光源 (E)、材质 (f_r) 以及几何信息 (V) 都有关系, 无法进行预测, 也没有高效的计算方法。前人的工作都是取三者中的一个进行重要性采样, 忽略其它两项的变化影响, 因此都在应用范围上存在一定的限制: 跟据光源亮度的大小采样的方法适用于高频光源下的低频反射, 如漫反射材质; 根据 BRDF 进行重要性采样, 适用于高频反射的材质, 如光滑金属的反射; 根据几何信息采样计算可见性, 适用于低频光照下的漫反射阴影, 如环境遮挡。

本文提出一个新的分治采样的方案解决这个问题。通过分解渲染方程的形式, 每个分量可以用各自最佳的策略进行采样。首先, 我们将材质的反射函数分解为高频 (镜面反射和平滑反射项) 和低频 (漫反射系数) 两项, 即 $f_r(\vec{x}, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}) = f_H(\vec{x}, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}) + f_d(\vec{x})$ 。由于常用的 BRDF 模型, 如 Phong 模型, Cook-Torrance 模型, Strauss 模型等, 都可以表示为漫反射项和高光项的和, 因此这种分解是容易得到的。其次, 根据 Green 等的结论^[14], 在大多数情况下光滑表面上的阴影对最终结果的影响很小, 因此可以忽略高频反射项的可见性判断, 假设所有方向上的高频反射都是可见的。最后, 使用遮挡函数 O 来表示低频分量的可见性, 即 $V(\vec{x}, \vec{\omega}) = 1 - O(\vec{x}, \vec{\omega})$ 。此时方程(1)被分为三个积分项的和:

$$L(\vec{x}, \vec{\omega}_o) = \underbrace{\int_{\Omega} E(\vec{x}, \vec{\omega}) f_H(\vec{x}, \vec{\omega}_o, \vec{\omega}) d\vec{\omega}}_{\text{高频反射项}} + \underbrace{\int_{\Omega} E(\vec{x}, \vec{\omega}) f_d(\vec{x}) d\vec{\omega}}_{\text{低频反射项}} - \underbrace{\int_{\Omega} E(\vec{x}, \vec{\omega}) O(\vec{x}, \vec{\omega}) d\vec{\omega}}_{\text{遮挡项}} \quad (3)$$

图 1 展示了根据本算法计算的各部分图像以及最终的渲染结果。

第一项 (高频反射项) 只有高频分量的反射, 因此只需在反射的峰值附近少量的采样就可以很好地还原正确的结果。这里简单应用 Colbert 和 Krivanek 的方法^[15]根据材质特性进行重要性采样。根据材质 BRDF 的解析式可以得到各方向上反射量的大小, 并以此作为采样概率的权重, 计算出 PDF 的表达式 $p(\vec{\omega})$ 。累积分布函数 CDF 的表达式也可以由 PDF 积分得到 $P(s) = \int_{\vec{\omega}=0}^s p(\vec{\theta}) d\vec{\theta}$ 。生成 [0,1] 区间均匀分布的随机变量 ξ , 采样方向的分布可以由 CDF 得反映射 $P^{-1}(\xi)$ 计算。

第二项 (低频反射项) 积分中只和光源以及方向有关, 采用以光源为中心的重要性采样。如果光源在无限远处, 如环境光, 方向的选择和场景物体没有任何关系, 可以在渲染前针对所有法线方向进行的预计算。

为了去除静态光源的限制，本文不使用这种预计算方法，而是实时对光源进行重要性采样，在亮度较大的方向上生成更多的采样点以更好地还原真实光照。由于该项不存在高频的反射，较少的采样（如 100 个）就可以很好地还原此积分项的正确结果。图 6 通过结果的对比支持了这个观点。

第三项（遮挡项）包含光源和几何的相关项。整个场景的几何信息很难在局部模型的光照计算中得到，因此采样的重要性权重仍然为对光源的亮度。和第二项不同，这里需要提高采样数量，用大量的采样方向（如 1000 个）来捕捉所有的遮挡体。采样数目的提高必然带来效率的降低。为了维持高速的渲染，用传统的 **Shadow Mapping** 来判断可见性是不可行的。我们通过改进屏幕空间环境遮挡^[21,22]方法，在采样过程中计算各个方向的负光照，以生成方向相关的遮挡。这种方法生成的阴影虽然不能完全保证物理真实，但是在大多数情况下能提供非常好的视觉效果。更重要的是，这种近似方法的时间花费比一般可见性判断方法低得多，可以保证高帧率的实时渲染。3.2 节介绍在屏幕空间计算遮挡的具体过程。

3.2 屏幕空间遮挡计算

遮挡的计算方法基于延迟渲染技术，即在第一步首先生成一个包含屏幕空间每个像素位置、法线和深度信息的几何缓存，称为 **G-Buffer**。第二步是渲染过程，对于一个三维的点 \vec{x} ，遮挡的量由法线 \vec{n} 的上半球的 N 个方向来采样计算得到。这 N 个方向是根据光源进行重要性采样得到的。对于每个采样方向 $\vec{\omega}_i$ ，取一个随机的长度 $\lambda_i \in [0, r_{\max}]$ （其中 r_{\max} 是一个用户指定的长度，和场景尺度有关）得到 \vec{x} 附近的一个点 $\vec{x}' = \vec{x} + \lambda_i \vec{\omega}$ 。 \vec{x}' 被投影到屏幕上，它到视点的深度值与 **G-Buffer** 中对应位置的深度值比较，如果 \vec{x}' 的深度值更大，说明它在其他物体的下面，则认为这个方向是被遮挡的。遮挡体的距离越远，产生的阴影越不明显，因此遮挡的量定义为随距离衰减的函数：如果当前的方向被遮挡，则 $O(\vec{x}, \vec{\omega}) = \max\{0, 1 - (d / r_{\max})^2\}$ ，否则 $O(\vec{x}, \vec{\omega}) = 0$ 。其中 d 是前述两个深度值的差。根据公式(3)，每个方向上的 O 要和该方向的光强 E 相乘得最后结果。

即使屏幕空间的近似方法省略了 **Shadow Mapping** 步骤，每个像素的采样数目仍然太多。进一步的优化使用间隔采样^[6]的策略。整个屏幕的像素被分为 $m \times n$ 的格子，全体采样方向平均分配给格子内部的每个像素。假设总共需要 1024 个采样，每个格子的大小为 $4 \times 4 = 16$ 个像素，则每个像素只需 $1024/16=64$ 个采样。由于间隔采样造成了每个像素采样的差异，结果中会产生的采样噪声。这种噪声可以由一个几何相关的图像滤波器（如 **Bilateral** 滤波）去除。

最近 Ritschel 等^[23]提出了和上面方法类似的技术计算方向遮挡。但他们仅仅在随机的方向上采样，没有考虑光源的重要性采样。另外，本文方法计算出的结果只是用于遮挡项。由于有单独的光照项保持了光源和几何的高频特性，对遮挡项进行图像滤波不会在最终结果中造成明显的模糊现象。而 Ritschel 等的方法必须在采样的同时计算出最终光照，在非去噪的情况下会产生有噪声的光照的结果。而在去噪的过程中，光照项也同时进行了模糊，无法得到清晰的结果。图 7 通过比较两种方法的结果，说明了本文的方法更加优越。

4 实时环境光照

本节讨论如何应用上面算法实时渲染环境映射光源照明下的场景。环境映射的方式有很多种，如球形映射、立方体映射等。为了方便采样，我们将映射方式选择为经纬映射，使用一张 **HDR** 图像表示整个环境光照，如图 2(a)所示。由于只有一张矩形图像，整个环境光可以应用二维图像的重要性采样方法用多个方向光源表示。我们在实现过程中采用 Ostromoukhov 等^[5]的分层重要性采样算法，该算法一个效率很高的确定性采样方法，可以在毫秒级的时间内生成约 1000 个采样点，因此可以进行无预计算的实时采样。用每个像素代表的亮度 $I = C \cdot \cos \theta$ （ C 为像素颜色的灰度值）作为采样权重，采样的结果如图 2(b)所示。绝大多数采样点集中于图像中的很亮的部分。由于使用了重要性采样，每个光源的像素亮度要除以采样的 PDF 得到最终需要的方向光源辐射率。

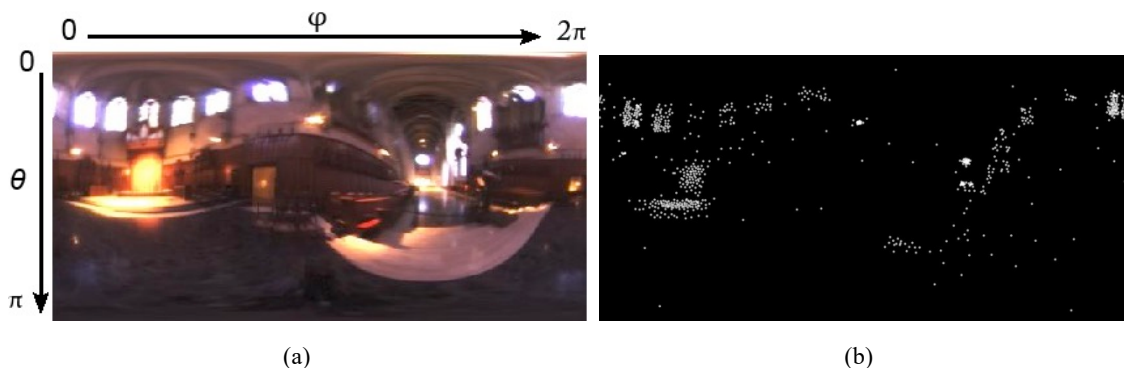


图2 (a)环境光的经纬映射；(b)对应图像的重要性采样结果。

重要性采样生成了很多方向光源，每个光源有一个方向和辐射率。为了便于下一步的 GPU 处理，这些信息要保存为一张光源信息纹理。由于低频反射光照和遮挡项需要的采样光源数目不同，并且遮挡的计算需要间隔采样，因此环境映射图像被采样两次，生成两组采样方向，一组用于计算直接光照，另一组用于计算遮挡。用于直接光照的采样光源数目较少（约 100 个），只需要存为两个一维线性表分别包含方向与辐射率。用于遮挡计算的采样数目较多（约 1000 个），需要按如下方法分组储存：所有采样结果分为 g 组，每组包含 l 个采样光源。光源纹理的尺寸为 $2g$ 行 l 列，每组光源各占两行，一行用纹理的 RGB 通道分别储存光照方向的 XYZ 值，另一行储存辐射率颜色。图 3 是分组光源纹理一个小规模储存的示例，其中采样了 20 个采样光源，分为两组储存，每组 10 个，因此纹理大小为 10×4 。

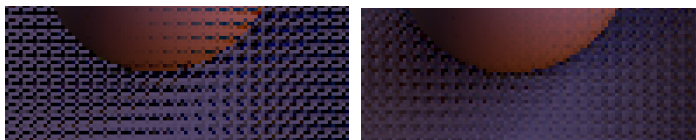
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
光照方向											第 1 组
辐射率											
光照方向											第 2 组
辐射率											

图3 分组储存的光源纹理结构。

遮挡阴影使用光源纹理中采样好的光源方向进行重要性采样计算。间隔采样将屏幕分为 $m \times n$ 的格子，且 $m \times n = g$ 即光源信息纹理中的分组数。格子中每一像素按照顺序分配一组采样光源进行计算。由于每个格子内的像素之间采样方向都不同，结果图像会存在网格状的噪声，如图 4 上行中两幅图像所示。为减小噪声影响，我们使用 $2m \times 2n$ 的交叉 Bilateral 滤波^[25]，并在过滤权重中考虑深度信息以避免边缘模糊。

为进一步优化结果质量，我们对采样光源进行乱序处理。因为经过确定性采样方法得到的采样列表常常具有一定顺序性，如果简单进行顺序分组，同一组的光源很可能聚集到相似方向上，从而使得相邻像素的计算结果差距较大，导致噪声很难被滤除。在分组之前打乱采样光源的顺序可以避免此类情况的发生，在很大程度上改进结果的质量，如图 4 下行中两幅图像所示。

Bilateral 过滤前



Bilateral 过滤后



非乱序

乱序

图 4 将采样光源的顺序打乱可以提高间隔采样的结果质量。

5 实验结果分析

我们使用 DirectX 9.0c 和 HLSL 3.0 实现了环境光渲染算法。实验平台的硬件配置为 Intel Core 2 Duo 2.2GHz 的 CPU 和 NVIDIA Geforce 9800GT 的 GPU。如果没有特殊说明，下文中的 FPS 都是指分辨率为 512 x 512 时的渲染帧率。

图 5 是采用不同采样数的结果比较。第一行是不包含遮挡的漫反射光照。通过观察结果可以看出采样数大于 100 时图像没有明显不同。由此可以得到结论，低频的直接光照只使用少量的采样就可以还原真实的结果。第二行为采样数对遮挡的影响，从图像中可以看出，遮挡的渲染结果随着减少采样数目会产生质量的下降。在 400 个和 200 个采样下，圆台的阴影就有了明显的走样与噪声。因此遮挡的计算必须用较多的采样才能得到较好的结果。

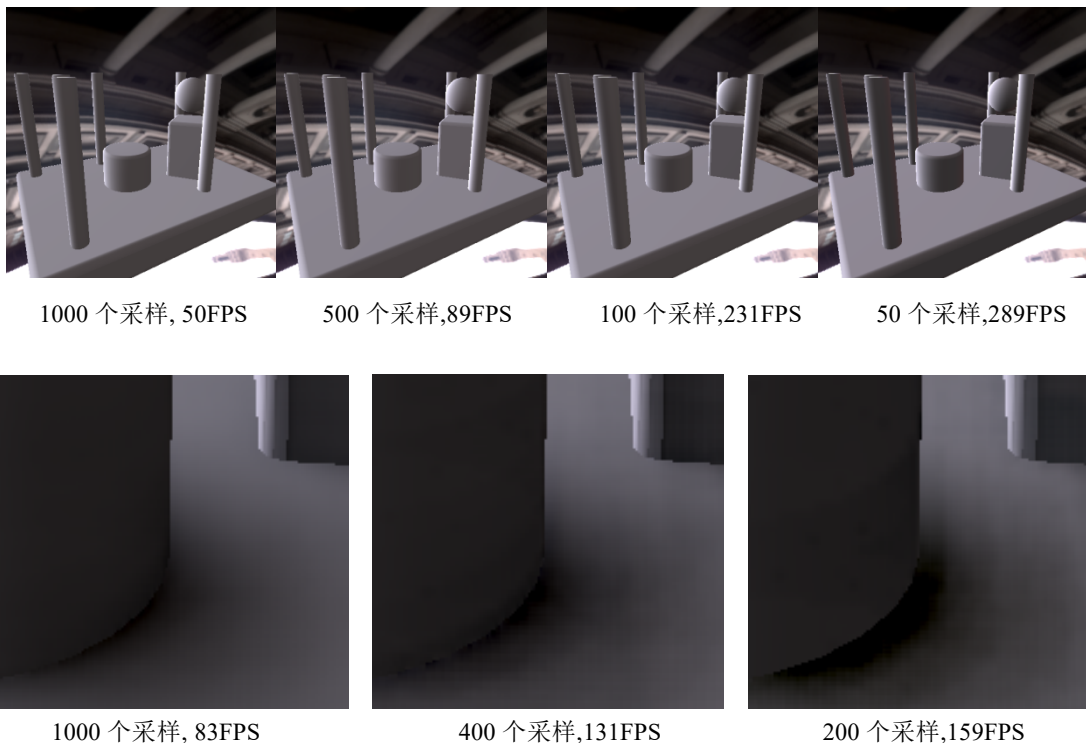


图 5 采样数对低频光照（第一行）以及遮挡阴影（第二行）的影响。对于不包含遮挡的低频光照，采样数的增加对于视觉质量影响不大。但是阴影的结果随着采样数降低有明显走样。

图 6 通过和 Ritschel 等^[23]的方法对比说明了本文分离光照项和遮挡项的优点。由于他们的方法不适于高频反射，为了公平对比，图 6 结果只选择包含漫反射材质。二者都进行 4x4 的间隔采样，并使用交叉 Bilateral 滤波去噪。但是由于 Ritschel 等的方法没有分离光照项，光照与遮挡同时进行了滤波去噪。虽然以深度信息为权重的滤波可以保持物体轮廓上的清晰边界，但是内部的细节完全被模糊掉了。与此相比，本文方法只模

糊了的遮挡项，物体上任何地方的几何细节都可以得到保持。在效率上，本文方法需要对光照和遮挡分别采样，而 Ritschel 等的方法只需一次采样。然而两者在最终效率上差别不大，原因有两点：一是本文算法虽然是分别采样，但是并没有增加光照计算的实际计算量，只是增加了纹理读取次数；二是由图 5 可知，渲染的主要瓶颈在遮挡的采样上，相比之下直接光照的采样数很少，因此不会对最终效率产生很大影响。

图 7 和图 8 是综合结果的展示。这两张图中包含的平滑反射是使用带 Fresnel 项的 Phong 模型实现的。图 7 是一个摇椅在支架上摆动的实时动画的场景。这个场景中包含了支架的漫反射材质，摇椅的高频平滑反射和地面的低频平滑反射。随着动画的进行，摇椅产生的阴影也实时地平滑改变。我们测试了用很多种环境光照射同一场景，图 8 是其中的一些结果。该场景中包含漫反射、镜面反射以及高频和低频的平滑反射。可以看到本文技术在不同光源下都得到较好的渲染结果。为了提高质量，我们在渲染图 8 时提高了方向光源的采样数（约 2000 个），因此 FPS 比其他结果稍低，但是仍然保持实时渲染的效率。

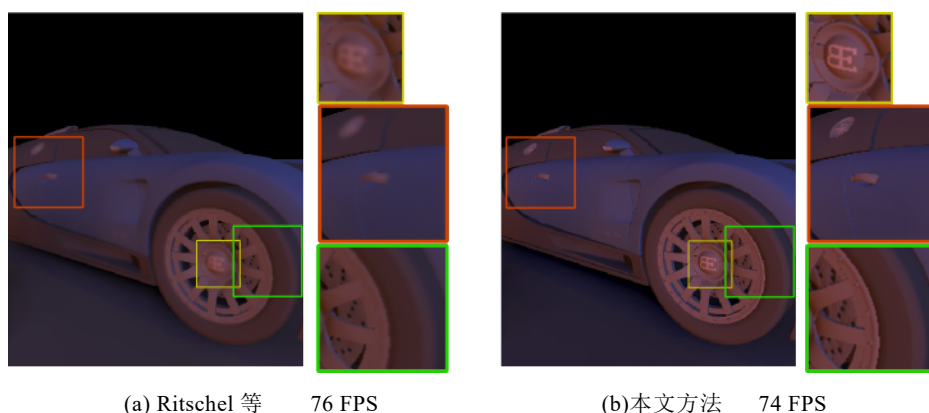


图 6 Ritschel 等^[23]的方法与本文方法的比较。(a) Ritschel 等的方法同时采样计算光照和遮挡，并且使用了图像滤波进行模糊，因此结果中丢失了物体内部的细节，如车轮和车窗标志；(b)本文的方法分离了光照和遮挡，因此使得在模糊阴影的同时保持物体内的细节。

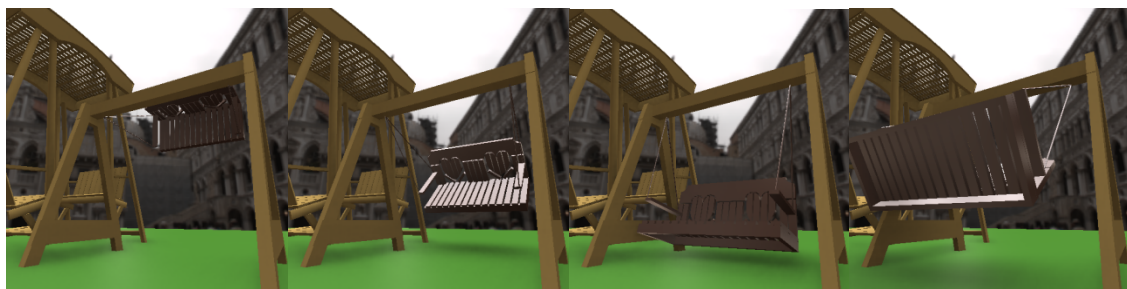


图 7 动态场景例子的截图。这个摇椅的动画以 40FPS 的速率实时渲染。注意阴影在不同时刻的变化。

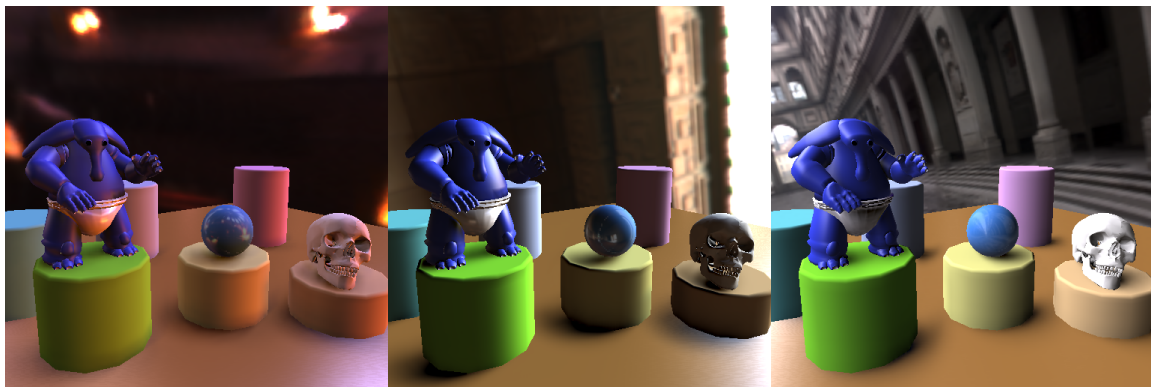


图8 同一场景在不同光源下的渲染结果。渲染速率约 20 FPS。

6 问题讨论与改进

上一节展示了本文方法可以在实时的效率下在得到较好的渲染结果，然而该方法仍然存在一些不足。在渲染正确性上，本文提出的分解策略在两处进行了近似，一个是忽略了高频反射的可见性，这是基于 Green 等的结论^[14]，高频反射在复杂光照下的可见性对结果影响不大。然而当光源具有高频特性，如单一点光源，该可见性就有可能对结果产生较大影响。实际上一般情况下应将主光源和环境光分离，对于主光源（如单一点光源）使用传统的 Shadow Mapping 来计算可见性，而对分离后的环境光采用本文的算法计算光照，最后将两者的光照结果叠加。另一个近似是本文采用屏幕空间遮挡来计算可见性，这种方法虽然计算简单高效，但是不能保证产生物理真实的遮挡结果。首先由于采样是在屏幕空间进行，因此正确性受到屏幕像素信息的限制；其次由于需要对间隔采样的结果进行滤波，因此没有办法捕捉到高频阴影的边缘。通过增大屏幕采样层次与增大采样点数目可以减小这些误差，但是需要付出更多计算时间与存储空间的代价。实际上，渲染的正确性与渲染的速度之间的矛盾存在于任何渲染算法中。本文试图在保证结果真实感的前提下尽量提高渲染的效率和算法的简单性。虽然无法保证最终结果完全符合物理的真实光照，本文的实验结果证明了该方法能够在很高的效率下得到具有真实感的渲染图像，因此可以很好地应用于游戏、虚拟现实等实践领域。

本文展示了应用分治采样框架计算环境光源的照明。实际上由于本文的算法原理没有基于的环境光的特性，如光源在无限远处，因此其应用并不局限于环境光照计算。我们在后续的工作中计划应用此框架处理更一般的多光源问题，如使用 VPL 采样计算间接光照等。本文的算法由于需要分解高频和低频材质，并且根据材质进行重要性采样，因此假设场景中的 BRDF 都为解析表示。虽然这符合一般应用的场合，但不支持数据表示的 BRDF 限制了本算法的应用。后续工作需要对此加以改进，使得本文方法支持任意的 BRDF。

7 结论

本文提出一个新的方法分解渲染方程，对高频反射、低频反射以及遮挡阴影进行分治采样，以使得每一部分都能收益于重要性采样，在较短的时间内得到高质量的渲染结果。此方法改进了原有的方向遮挡技术，在屏幕空间高效地生成视觉效果良好的阴影。由于进行了光照和遮挡计算的分离，遮挡部分由间隔采样减少每个像素的采样数量，同时保持了光照部分的高频特性。文章展示了如何应用这个渲染框架在 GPU 上实现实时环境光源光照的渲染。实验结果以及对比证明本文方法能够处理完整的复杂光照效果，并且达到了比现有技术更高的渲染质量。

致谢 本课题得到国家 973 项目(2010CB328001)和国家 863 计划(2007AA040401)、国家自然科学基金(60625202)、清华大学自主科研计划(2009THZ0)的资助。本文第三作者得到 ANR-NSFC(60911130368)资助和

霍英东教育基金会(111070)资助。

References:

- [1] Sloan P.-P., Kautz J., Snyder J.: Precomputed Radiance Transfer for Real-Time Rendering in Dynamic, Low-Frequency Lighting Environments. In Proceedings of SIGGRAPH, 2002, pp. 527–536.
- [2] Ramamoorthi R., Hanrahan P.: An Efficient Representation for Irradiance Environment Maps. In Proceedings SIGGRAPH, 2001, pp. 497–500.
- [3] Kautz J., Sloan P.-P., Snyder J.: Fast, Arbitrary BRDF Shading For Low-Frequency Lighting Using Spherical Harmonics. In Proceedings of 13th Eurographics Workshop on Rendering, 2002, pp. 301–308.
- [4] Annen T., Dong Z., Mertens T., Bekaert P., Seidel H.-P., Kautz J.: Real-Time, All-Frequency Shadows in Dynamic Scenes. ACM Trans. Graph. (Proceedings of SIGGRAPH), 27(3), 2008, pp. 1-8.
- [5] Ostromoukhov V., Donohue C., Jodoin P.-M.: Fast Hierarchical Importance Sampling with Blue Noise Properties. ACM Trans. Graph. (Proceedings of SIGGRAPH), 23(3), 2004, pp. 448-495.
- [6] Segovia B., Iehl J.-C., Mitanchey R., Péroche B.: Non-interleaved Deferred Shading of Interleaved Sample Patterns. In Proceedings of Graphics Hardware, 2006, pp. 53–60.
- [7] Blinn J., Newell M.: Texture and Reflection in Computer Generated Images. Communications of the ACM 19, 1976, pp.542–546.
- [8] Wang R., Tran J., Luebke D.: All-Frequency Relighting of Non-Diffuse Objects using Separable BRDF Approximation. In Proceedings of Eurographics Symposium on Rendering, 2004, pp. 345–354.
- [9] Liu X., Sloan P.-P., Shum H.-Y., Snyder J.: All-Frequency Precomputed Radiance Transfer for Glossy Objects. In Proceedings of Eurographics Symposium on Rendering, 2004, pp. 337–344.
- [10] Hoff, K., Culver, T., Keyser, J., Lin, M., Manocha, D: Fast Computation of Generalized Voronoi Diagrams Using Graphics Hardware. In Proceedings of SIGGRAPH, 1999, pp. 277-286.
- [11] Agarwal, S., Ramamoorthi, R., Belongie, S., Jensen, H.: Structured Importance Sampling of Environment Maps. ACM Trans. on Graphics 22, 3 (July), 2003, pp. 605-612.
- [12] Mcallister D. K., Lastra A., Heidrich W.: Efficient Rendering of Spatial Bi-Directional Reflectance Distribution Functions. In Proceedings of Graphics Hardware, 2002, pp. 79-88.
- [13] Hensley J., Scheuermann T.: Dynamic Glossy Environment Reflections Using Summed Area Table. In ShaderX4, 2006, Charles River Media.
- [14] Green P., Kautz J., Durand F.: Efficient Reflectance and Visibility Approximations for Environment Map Rendering. Computer Graphics Forum 26, 2, 2007, pp. 495–502.
- [15] Krivánek J., Colbert M.: Real-time Shading with Filtered Importance Sampling. In Proceedings of Eurographics Symposium on Rendering, 2008, pp. 1147-1154.
- [16] Annen T., Mertens T., Bekaert P., Seidel H.-P., Kautz J.: Convolution Shadow Maps. In Proceedings of Eurographics Symposium on Rendering, 2007, pp. 51–60.
- [17] Donnelly W., Lauritzen A. : Variance Shadow Maps. In Proceedings of SI3D, 2006, pp. 161–165.
- [18] Keller A.: Instant Radiosity. In Proceedings of SIGGRAPH' 97, 1997, pp. 49–56.
- [19] Dachsbacher C. , Marc Stamminger M.: Reflective Shadow Maps. In Proceedings of SI3D, 2005, pp. 203–213.
- [20] Landis H.: RenderMan in Production. In Proceedings of SIGGRAPH, Course 16, 2002.
- [21] Shanmugam P., Arikan O.: Hardware Accelerated Ambient Occlusion Techniques on GPUs. In Proceedings of SI3D, 2007, pp. 73–80.
- [22] Mittring, M.: Finding Next-Gen: CryEngine 2. In ACM SIGGRAPH 2007 courses, ACM, 2007, pp. 97–121.
- [23] Ritschel T., Grosch T., Seidel H.-P.: Approximating Dynamic Global Illumination in Image Space. In Proceedings of SI3D, 2009, pp.75–82.
- [24] Jensen H. W.: Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping. A K Peters, Ltd., 2002
- [25] Eisemann E. and Durand F.: Flash Photography Enhancement via Intrinsic Relighting. ACM Trans. on Graphics 23, 3, 2004, pp. 673-678.
- [26] Kajiya J. T.: The rendering equation. In Proceedings of SIGGRAPH, 1986, pp. 143–150.