一种复杂非直接光照场景的渲染算法

朱振兴 徐晓旸 潘金贵
(南京大学软件新技术国家重点实验室 南京 210093)

摘 要 针对一类具有复杂非直接光照的场景,提出了一种称作Ercuts的全局光照算法。算法提出了虚拟点光源模拟ER采样路径的思想,首先使用双向路径跟踪初始化场景,再根据ER采样在每个像素处产生长度相等的Markov链,这充分利用了双向路径之间的相关性。算法还引入了一种加速虚拟点光源光照计算的方法,为场景中的虚拟点光源建立光源树,通过遍历光源树并控制误差上界来计算场景光照。实验表明,与传统的双向路径跟踪相比,算法在具有复杂非直接光照的场景中有较好表现。

关键词 非直接光照,ER采样,虚拟点光源,光源树
中图法分类号 TP391 **文献标识码** A

Algorithm for Scenes with Complex Indirect Illumination

ZHU Zhen-xing XU Xiao-yang PAN Jin-gui
(State Key Lab for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract A global illumination algorithm called Ercuts was proposed to render scenes with complex indirect illumination. Ercuts adopted bidirectional path tracing to initialize the scene, and generated Markov chains of the same length by ER(Energy Redistribution) sampling for each pixel. After that, a VPL(Virtual Point Light) set was developed to simulate Markov chains. Ercuts also accelerated the computation of VPLs by establishing a light tree from VPL set and traversing it to approximate illumination from VPLs with a strongly sublinear cost. The experimental results indicate that, compared with traditional bidirectional path tracing, Ercuts works more effectively for scenes with complex indirect illumination.

Keywords Indirect illumination, ER sampling, Virtual point lights, Light trees

1 引言

在许多应用场合,我们需要对复杂的场景渲染出极具真实感的图像。这就要求我们不仅要考虑来自光源的直接光照,还需要考虑来自其它物体表面因反射、折射等产生的非直接光照。这样,阴影、透明等真实世界中存在的光学现象才能在我们的图像中生动地表现。

围绕非直接光照,已出现许多计算机图形学算法。例如,1997年由Veach和Guibas将原本用来解决计算物理中复杂取样问题的Metropolis采样[1]引入计算机图形学[2],其通常被称作MLT(Metropolis Light Transport)算法。MLT算法充分利用了光线路径空间的相关性,能有效处理焦散等困难的光学现象。此后Pauly等[3]将MLT算法用于参与介质的绘制;Ashikhmin等[4]研究了MLT算法的统计学性质;Kelemen等[5]简化了MLT算法,使其收敛速度更快。前不久,Fan等[6]将Metropolis采样和光子图算法相融合,同样能高效利用光线路径之间的相关性;Cline等[7]则用ER采样代替Metropolis采样,将MLT算法中的突变策略作用在光线路径集合上,使得每条路径的能量重新分布到整个图像。

与MLT同时代的IR(Instant Radiosity)算法[8]是另一种优雅的全局光照算法。IR算法由Keller提出,用虚拟点光源去近似非直接光照,通过控制虚拟点光源的数量在图像质量和渲染速度之间获得权衡。Segovia等[9]将双向路径跟踪借鉴到IR算法中,并充分挖掘了当今高速图形硬件的潜能。随后,Segovia等[10]又创造性地将MLT和IR融为一体,在渲染具有复杂的非直接光照场景时表现尤为突出。

Lightcuts是近几年出现的一种快速的可扩展的图形绘制框架[11],由Walter等提出,能够处理多种材质和光源,图像渲染时间和光源数目呈次线性的增长关系,尤其适合渲染多光源的场景。Walter等[12]又将Lightcuts推广到多维情形,可渲染出景深、运动模糊等一系列丰富的视觉效果。

到目前为止,基于ER采样的方法多在图像绘制质量上寻求突破,Lightcuts的优势也更多是在绘制速度上。本文提出了一种全局光照算法,其不仅充分利用了ER采样路径之间的相关性,同时借鉴了IR算法用虚拟点光源模拟非直接光照的思想和Lightcuts在速度上的优势,在具有复杂非直接光照的场景中表现较好。

2 算法针对的问题

考虑图1所示的S形场景,光源位于场景的一端,视点位

到稿日期:2010-01-12 返修日期:2010-03-30 本文受国家自然科学基金(60473113)和国家自然科学基金重点项目(60533080)资助。
朱振兴 男,硕士生,主要研究方向为多媒体信息处理技术及应用,E-mail:hournor@mes.nju.edu.cn;**徐晓旸** 男,博士生,主要研究方向为计算机图形学;**潘金贵** 男,教授,博士生导师,主要研究方向为多媒体信息处理技术及应用。

于场景的另一端。由于两堵不透明墙壁的阻隔，光源产生的光线只有经过多次反射，才能穿过狭长的走廊被视点观察到。显然在这样的场景中，非直接光照完全占据了主导地位，且光照的计算是很复杂的。

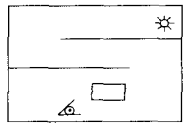

图 1　场景示意图

本文针对此类场景，提出了一种称作 Ercuts(Energy Redistribution Lightcuts)的全局光照算法，用以解决此类具有复杂非直接光照场景的渲染问题。算法的流程大致分为以下 5 个步骤，各步骤的内容将在下节具体描述。

步骤 1　双向路径跟踪初始化场景；

步骤 2　ER 采样产生 Markov 链；

步骤 3　VPL 集合模拟 Markov 链；

步骤 4　对 VPL 集合建立光源树；

步骤 5　光源树遍历计算场景光照。

3　算法的具体过程

3.1　双向路径跟踪初始化场景

我们首先使用双向路径跟踪算法去渲染场景，对每个像素重复产生多条路径，可以得到场景的一个粗略图像。对整幅图像进行统计，计算出图像的总能量即总辉度值 P。

双向路径跟踪在多数并不复杂的场景中不失为一种优秀的算法。它在光源和视点分别产生两个路径集合，通过对光源路径和视点路径进行可见性测试来生成双向路径。

然而图 1 所示的场景遮挡是很严重的，可见性测试的结果通常是失败，双向路径的产生会是一个很耗时的过程，所以单纯采用双向路径跟踪渲染会很低效。

我们的算法仅仅使用双向路径跟踪生成一个并不精确的图像，并将其作为下一步骤中 Markov 过程的平衡状态，以寻求更高效的算法。

3.2　ER 采样产生 Markov 链

我们通过对双向路径跟踪产生的图像进行 ER 采样，在每个像素处产生长度相等的 Markov 链。假设在某像素处重新产生一条双向路径 X_0，使用 Veach 等设计的 Metropolis 采样突变策略[2]，得到一条临时路径 X_1。

设 $f(X_0)$，$f(X_1)$分别是路径 X_0 和 X_1 对图像的光照贡献，$T(X_1 \mid X_0)$，$T(X_0 \mid X_1)$分别是从路径 X_0 试探突变到路径 X_1 的概率和从路径 X_1 试探突变到路径 X_0 的概率。我们定义路径 X_1 被接受的概率如下

$$a(X_1 \mid X_0)=\min\left\{1,\frac{f(X_1)T(X_0 \mid X_1)}{f(X_0)T(X_1 \mid X_0)}\right\} \tag{1}$$

我们生成一个 0 到 1 之间的随机数 rand()，若 rand()$<a(X_1 \mid X_0)$，则路径 X_0 成功突变到路径 X_1，并在 X_1 的基础上实施新的突变；否则突变失败，保留路径 X_0 并重新选取临时路径 X_1。

重复上述过程，得到一个双向路径序列$\{X_0,X_1,\cdots,X_n\}$，$n\in\mathbb{N}$。由路径突变的过程知，每条路径的选取仅依赖于前一条路径的状态，故这一路径序列构成了一个 Markov 链。

Segovia 等指出[10]，由于 ER 采样使用细致平衡，Markov 链中的每一条路径对最终图像的贡献都是相等的。

3.3　VPL 集合模拟 Markov 链

对于 Markov 链中的任意一条双向路径 X，设 x_0 为视点，$x_i(i>0)$为该路径依次在场景中的交点，我们可以把路径 X 记为 $X=\{x_0,x_1,x_2,\cdots\}$。在 x_2 处建立一个 VPL，方向等同于物体表面的法向量。

现在我们并不知道 VPL 光照强度的具体数值，仅仅知道每条路径对图像的贡献是相等的，均为 P/n，故需要对 VPL 的光照强度进行估计。

在路径突变的过程中，多条路径可能共享点 x_2 部分，如图 2 所示的路径$\{x_0,x_1,x_2,L\}$和$\{x_0,x_1,x_2,x_3,L\}$，这些路径生成的 VPL 具有完全相同的属性。可将这些重合的 VPL 合并为一个 VPL，其光照强度相应地为各 VPL 光照强度之和。

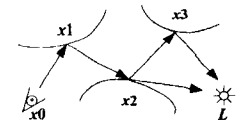

图 2　VPL 路径

在这里，假设某个 VPL 的辐射强度为 k，即为 Markov 链中经过该 VPL 的路径数量。我们用该 VPL 对图像的每一像素作光照计算，统计出对图像贡献的总能量 P^*。

在假设 VPL 光照强度为 k 的情况下，其贡献的总能量为 P^*，故在实际光照贡献为 P/n 的情况下，该 VPL 的实际光照强度为 kP/nP^*。

至此，VPL 的所有参数(位置 p，方向 n，光照强度 I)均已知，场景的所有光照均可以由 VPL 计算产生。

3.4　对 VPL 集合建立光源树

光源树是一种二叉树，叶节点是独立的光源，内部节点等同于其两个叶节点之一。

对于场景中的 VPL，我们尝试为之建立一棵光源树。以$(I_i+I_j)(2-n_in_j)|p_i-p_j|$作为权值，每次选取权值最小的两个 VPL 配对。权值愈小，表示 VPL 之间属性的相似度愈高。

如此选取的 VPL 对构成了光源树的叶节点。至于内部节点，我们在其两个子节点 i 和 j 之间随机选取，对于子节点 i，有 $I_i/(I_i+I_j)$的概率被选中。以此类推，光源树的每个节点都由对应的 VPL 填充。

图 3 示意由 6 个 VPL 构建光源树的整个过程。我们首先从 VPL 集合中选取权值最小的 VPL 配对，假设这里是光源 4 和 6。接着从剩下的 4 个 VPL 中再选取权值最小的光源 1 和 3 配对，最后剩余的光源 2 和 5 自然配为一对。光源树的叶节点都已经确定，内部节点会根据子节点的光照强度随机选取，得到一棵完整的光源树。

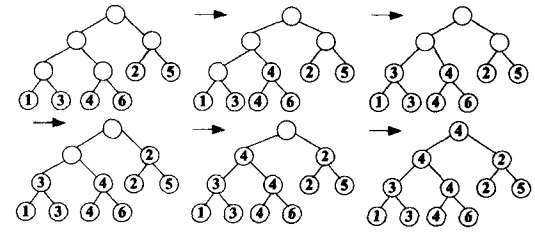

图 3　光源树构建示例

3.5 光源树遍历计算场景光照

这是算法的最后一个阶段。关于光照计算，Kajiya 在他里程碑式的论文中提出了著名的绘制方程[13]，很多渲染算法都可以看作是求绘制方程的一个近似解。我们在计算 VPL 集合的光照时，因为场景的全局光照都已经用 VPL 来模拟，故实际只要对 VPL 集合计算局部光照即可。我们这里使用的是 Walter 等给出的离散形式

$$L(x,w)=\sum_{i\in S}M_i(x,w)G_i(x)V_i(x)I_i \tag{2}$$

我们用光源树根节点 r 的材质项、几何项和可视项去作为所有叶节点的近似，于是有每一像素光照的估算值为

$$L(x,w)\approx M_r(x,w)G_r(x)V_r(x)\sum_{i\in S}I_i \tag{3}$$

根据 Walter 等给出的方法[11]，可以估算出 $M_r(x,w)$，$G_r(x)$，$V_r(x)$的上界 $\overline{M}_r(x,w)$，$\overline{G}_r(x)$，$\overline{V}_r(x)$，故可得 $L(x,w)$ 的上界为

$$\overline{L}(x,w)=\overline{M}_r(x,w)\overline{G}_r(x)\overline{V}_r(x)\sum_{i\in S}I_i \tag{4}$$

根据 Webber 法则[14]，视觉信号可观察到的最小变化等于基础信号的一个固定百分比。实验中取 2%即已足够。

故若上界和估算值的绝对误差小于估算值的 2%，即 $|\overline{L}(x,w)-L(x,w)|<2\%L(x,w)$，我们则认为估算值完全可以作为精确值的近似，且不会引起可观察到的误差。

否则我们用根节点的两个子节点去替代根节点，此时原来的光源树分裂为两棵子光源树，再次计算出其估算值 $L_1(x,w)$，$L_2(x,w)$和上界 $\overline{L}_1(x,w)$，$\overline{L}_2(x,w)$。若总的误差小于总估算值的 2%，即

$$|(\overline{L}_1(x,w)+\overline{L}_2(x,w))-(L_1(x,w)+L_2(x,w))|<2\%(L_1(x,w)+L_2(x,w)) \tag{5}$$

则估算成功。否则选取误差最大的那棵子光源树，重复上述步骤进行分裂。由于光源树的深度是有穷的，故这一过程必定能够终止。图 4 展示了上节建立的光源树的一种遍历过程。

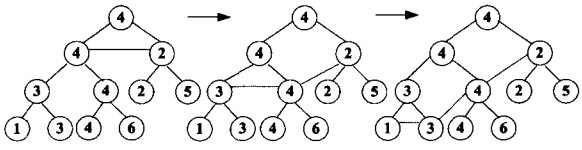

图 4 光源树遍历示例

4 实验与分析

使用我们的算法去绘制图 1 所示的 S 形场景，场景中的光照均由非直接光照提供。Segovia 等的实验指出[10]，双向路径跟踪不能得到正确的结果，绘制的图像会有大面积的无光照区。

我们的算法使用 ER 采样，故能够利用路径之间的相关性开发出足够多的有效路径。同时由于使用了基于 Webber 法则的方法，图像渲染时间和 VPL 的数量呈次线性的增长关系，故可以把 VPL 的数量取得很大，以精确模拟光照。

我们在 Intel Pentium 4 3.2GHz，1G RAM，GeForce 6800 的环境下进行实验，双向路径跟踪和 Ercuts 算法在相同渲染时间内得到的结果如图 5 所示。

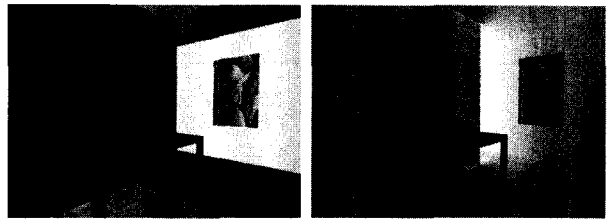

图 5 双向路径跟踪(左)与 Ercuts 算法(右)的场景效果图

可以看到，双向路径跟踪在场景末端的墙壁上，完全处于一种无光照状态，这是由于场景遮挡严重，双向路径无法通过可见性测试。Ercuts 算法由于使用 ER 采样，能够利用双向路径之间的相关性，因此渲染的结果更接近真实。

结束语 将 ER 采样和 VPL 的思想融合在一起，用 VPL 集合去模 ER 采样的路径，一方面利用了 ER 采样路径之间的相关性，另一方面将全局光照离散化为 VPL 集合，能使用基于 Webber 法则的方法去加速光照计算。实验表明，Ercuts 算法在具有复杂非直接光照的场景中有较好表现。

参 考 文 献

[1] Metropolis N, Rosenbluth W, Rosenbluth N, et al. Equations of State Calculations by Fast Computing Machines [J]. Journal of Chemical Physics, 1953: 1087-1091

[2] Veach E, Guibas L. Metropolis Light Transport [C]// Proceedings of SIGGRAPH 97. 1997: 65-76

[3] Pauly M, Kollig T, Keller A. Metropolis Light Transport for Participating Media [C]// Proceedings of the 11th Eurographics Workshop on Rendering. 2000: 11-22

[4] Ashikhmin M, Premoze S, Shirley P, et al. A Variance Analysis of the Metropolis Light Transport Algorithm [J]. Computers and Graphics, 2001: 287-294

[5] Kelemen C, Szirmay L, Antal G, et al. A Simple and Robust Mutation Strategy for the Metropolis Light Transport Algorithm [C]// Procedings of Eurographics 2002. 2002: 531-540

[6] Fan S, Chenney S, Chi Y. Metropolis Photon Sampling with Optional User Guidance [C]// Proceedings of the 16th Eurographics Symposium on Rendering. 2005: 127-138

[7] Cline D, Talbot J, Egbert P. Energy Redistribution Path Tracing [C]// Proceedings of SIGGRAPH 05. 2005: 1186-1195

[8] Keller A. Instant Radiosity [C]// Proceedings of SIGGRAPH 97. 1997: 49-56

[9] Segovia B, Iehl C, Mitanchey R, et al. Bidirectional Instant Radiosity[C]// Proceedings of the 17th Eurographics Symposium on Rendering. 2006: 389-397

[10] Segovia B, Iehl C, Peroche B. Metropolis Instant Radiosity [C]// Proceedings of the 18th Eurographics Symposium on Rendering. 2007: 425-434

[11] Walter B, Fernandez S, Arbree A, et al. Lightcuts: A Scalable Approach to Illumination [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005: 1098-1107

[12] Walter B, Arbree A, Bala K, et al. Multidimensional Lightcuts [C]// Proceedings of SIGGRAPH 06. 2006: 1081-1088

[13] Kajiya T. The Rendering Equation [C]// Proceedings of SIGGRAPH 86. 1986: 143-150

[14] Blackwell R. Luminance Difference Threshold [M]. Handbook of Sensory Physiology, vol. VII, Springer Verlag: 78-101