



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112785675 B

(45) 授权公告日 2024.07.26

(21) 申请号 202011237718.4
(22) 申请日 2020.11.09
(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112785675 A

(51) Int.Cl.
G06T 15/04 (2011.01)
G06T 15/06 (2011.01)
G06T 15/50 (2011.01)

(43) 申请公布日 2021.05.11

(56) 对比文件
CN 104361624 A, 2015.02.18
CN 105096374 A, 2015.11.25

(30) 优先权数据
16/679,075 2019.11.08 US

审查员 陈潇

(73) 专利权人 开奥斯软件有限公司
地址 保加利亚索非亚

(72) 发明人 翁德热·卡利克 马丁·西克
彼得·韦沃达 托马斯·什克里万
雅罗斯拉夫·克日瓦内克

(74) 专利代理机构 中原信达知识产权代理有限
责任公司 11219

专利代理师 张伟峰 夏凯

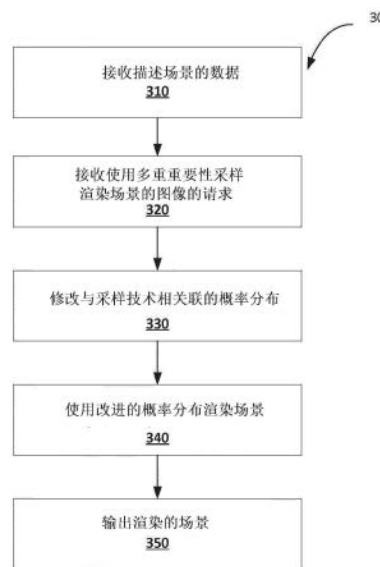
权利要求书1页 说明书9页 附图3页

(54) 发明名称

使用修改的多重重要性采样渲染图像

(57) 摘要

本发明涉及使用修改的多重重要性采样渲染图像。用于图像渲染的方法、系统和装置,包括在计算机存储介质上编码的计算机程序。方法之一包括:接收描述场景的数据,其中,场景包括一个或多个光源以及具有不同表面光学特性的一个或多个对象;接收使用结合了多种采样技术的多重重要性采样方法,渲染场景图像的请求,其中,每种采样技术都使用不同的概率分布来采样样本总数中的相应分数;修改概率分布中的特定一个以减少多重重要性采样的方差,同时保持相应分数和其他概率分布固定;使用所改进的特定概率分布和其他概率分布,利用多重重要性采样来渲染场景;并且响应于该请求来输出所渲染的场景。



1. 一种计算机实现的方法,包括:

接收描述场景的数据,其中,所述场景包括一个或多个光源以及具有不同表面光学特性的一个或多个对象;

接收用于使用结合了多种采样技术的多重重要性采样方法渲染所述场景的图像的请求,其中,每种采样技术都使用不同的概率分布来采样样本总数中的相应分数,其中每种采样技术用于渲染所述场景的不同区域,并且其中每种采样技术限定将对数据点进行采样的不同概率;

修改对应于特定采样技术的所述概率分布中的特定一个以减少多重重要性采样的方差,同时保持所述相应分数和其他概率分布固定;

使用改进的特定概率分布和其他概率分布,利用所述多重重要性采样来渲染所述场景;以及

响应于所述请求来输出所渲染的场景。

2. 如权利要求1所述的方法,其中,按改进的特定概率分布分配给给定样本的概率取决于(i)与所述给定样本对渲染结果的贡献成比例的第一值与(ii)作为按其他概率分配给所述给定样本的概率的加权总和的第二值之间的差。

3. 如权利要求2所述的方法,其中,所述加权总和中的每个概率由用于相应的其他概率分布的相应样本计数分数加权。

4. 如权利要求2所述的方法,其中,当所述差大于零时,分配给所述给定样本的概率是所述差除以用于改进的特定概率分布的样本计数分数和归一化因子。

5. 如权利要求2所述的方法,其中,当所述差不大于零时,分配给所述给定样本的概率为零。

6. 一种系统,包括:

一个或多个计算机和存储指令的一个或多个存储设备,所述指令当由所述一个或多个计算机执行时,可操作使所述一个或多个计算机执行根据权利要求1至5中任一项所述的方法的操作。

7. 编码有指令的一种或多种计算机可读存储介质,所述指令当被一个或多个计算机执行时,使所述一个或多个计算机执行根据权利要求1至5中任一项所述的方法的操作。

使用修改的多重重要性采样渲染图像

技术领域

[0001] 本说明书涉及减少样本结果差异的图像渲染中的采样技术。

背景技术

[0002] 计算机图形学中的常见任务是渲染场景的图像。该任务等效于确定用于图像中的每个像素的值,这又取决于求解代表场景的渲染方程。渲染方程是描述在场景中的任何空间点处朝向任何方向的辐射量的积分方程。但是,由于其复杂的形式,渲染方程通常没有封闭解。结果,通常使用蒙特卡洛方法来数值地计算求解渲染方程,即渲染场景的图像。

[0003] 常规的蒙特卡洛方法使用重复随机采样,通过将积分表示为随机变量的期望值来近似渲染方程的解。每种采样技术都根据独特概率分布来选择样本。

[0004] 在某些情况下,可以使用称为多重重要性采样(MIS)的方法来组合不同的采样技术。但是,将采样技术与MIS结合使用可能会产生过度防御估算器,从而导致渲染图像中不必要的高方差(即噪声)。

发明内容

[0005] 本说明书描述了对常规MIS的改进。一般而言,MIS框架代表了一系列估算器,经由被用来组合来自不同采样技术的样本的加权函数参数化。偏离常规MIS框架可以为估算器方差减少提供可能。当与使用常规MIS渲染的图像相比时,如本说明书中所述渲染的图像显示出减小的方差。与常规MIS类似,本发明采用几种采样技术的组合,但是与常规MIS不同,允许其中一种采样技术的概率密度函数(pdf)采用任何形状。随后,为自由技术的pdf找到了解析表达式,其最小化结果估算器的方差。

[0006] 通常,本说明书中描述的主题的一个创新方面可以体现以使用改进的采样技术来渲染场景的图像的方法实现,该方法包括接收描述场景的数据,其中,场景包括一个或多个光源以及具有不同表面光学特性的一个或多个对象;接收使用结合了多种采样技术的多重重要性采样方法,渲染场景图像的请求,其中,每种采样技术都使用不同的概率分布来采样样本总数中的相应分数;修改概率分布中的特定一个以减少多重重要性采样的方差,同时保持相应分数和其他概率分布固定;使用所改进的特定概率分布和其他概率分布,利用多重重要性采样来渲染场景;并且响应于该请求来输出所渲染的场景。

[0007] 该方面的其他实施例包括相应的计算机系统、装置和记录在一个或多个计算机存储设备上的计算机程序,分别被配置为执行该方法的动作。对于被配置为执行特定操作或动作的一个或多个计算机的系统,意味着该系统已经在其上安装了软件、固件、硬件或它们的组合,这些软件、固件、硬件或它们的组合在操作中使得该系统执行这些操作或动作。对于被配置为执行特定操作或动作的一个或多个计算机程序,意味着一个或多个程序包括指令,当该指令被数据处理装置执行时,使得该装置执行这些操作或动作。

[0008] 该方面的其他实施例可以包括以下可选特征中的一个或多个。通过所改进的特定概率分布分配给给定样本的概率取决于(i)与给定样本对渲染结果的贡献成比例的第一值

与(ii)作为按其他概率分配给给定样本的概率的加权总和的第二值之间的差。加权总和中的每个概率由用于相应的其他概率分布的相应样本计数分数加权。当差大于零时,分配给给定样本的概率是差除以用于所改进的特定概率分布的样本计数分数和归一化因子。当差不大于零时,分配给给定样本的概率为零。

[0009] 本说明书中描述的主题可以在特定实施例中实现,以实现以下优点中的一个或多个。场景的图像可以以高度的视觉真实感进行渲染,同时减少图像渲染的计算成本。通过以特定方式选择和组合各种采样技术,可以更有效地执行渲染图像。另一个优点是,与常规MIS的估算器方差相比,可以减小本说明书中描述的MIS的改进版本的估算器方差。使用一个或多个计算设备可以轻松实现本说明书中描述的MIS改进。输出只能减少方差,而不能增加方差。该实施方式可以具有很少的计算和内存开销。此外,总输出可以更快地并且以减少的计算量提供至少与常规MIS相同的渲染质量。

[0010] 在附图和以下描述中阐述本说明书的主题的一个或多个实施例的细节。根据说明书、附图和权利要求书,本主题的其他特征、方面和优点将变得显而易见。

附图说明

[0011] 图1是示例性图像渲染系统的框图。

[0012] 图2示出了利用采样技术的光线追踪的操作示例。

[0013] 图3是用于使用修改的MIS来渲染场景的图像的示例性过程的流程图。

[0014] 在各个附图中,相同的附图标记和标号表示相同的元件。

具体实施方式

[0015] 图1是示例性图像渲染系统100的框图。图像渲染系统100是一个或多个位置中的一个或多个计算机的示例性系统,能够产生给定视点和像平面的场景的渲染图像104,其中,场景是包括一个或多个反射和散射表面并且受一个或多个光源影响的三维环境。

[0016] 图像渲染系统100获得环境模型101作为输入,并且分析环境模型101以生成场景的渲染图像104。环境模型101可以包括描述场景中的各种对象的位置、取向、形状或光学特性的数据。环境模型101还可以包括关于视点和像平面的信息,诸如视点的位置、像平面的位置、像平面的方向、像平面的大小、渲染的图像的分辨率等。

[0017] 图像渲染系统100包括预渲染模块102和渲染模块103。预渲染模块102通过预处理环境模型101来优化渲染过程。在一些实施方式中,预渲染模块102可以预处理场景以改进由渲染模块103执行的采样过程。例如,预渲染模块102可以基于不同区域的一个或多个光学特性,将场景划分为不同区域,并且向渲染模块103推荐针对每个区域优化的采样技术。

[0018] 渲染模块103渲染表示环境模型101的图像。在渲染过程中,渲染模块103可以支持多种渲染技术以确定渲染图像104上的每个像素的值。渲染技术的示例包括以图像为中心的光线跟踪和栅格化。例如,为了实现光线追踪,渲染模块103可以从视点投射多条光线(视线)。视线穿过像平面上的像素并与场景中的点相交。如果这些点属于光源,则光源可以将值直接赋予渲染图像上的相应像素。如果这些点属于非发光对象,则可以在一个或多个方向上反射或散射视线以到达光源来产生像素值。反射/散射光线的数量和方向取决于点的特定光学特性和几何形状。例如,如果这些点位于散射表面上,则由于该表面均匀地散射入

射光线,因此可以分析多个出射方向。反射或散射的光线中的每一个都可以到达光源,该光源赋予对应于原始光线的像素值。在另一个示例中,反射/散射的光线可以到达另一个非发光的对象,从而导致另外的反射/散射。

[0019] 当场景包括复杂的光照条件和/或材料表面模型时,追踪场景中的所有点的光线可能会产生较高的计算成本。为了减少与渲染相关联的计算成本,渲染模块103对例如从场景中的点到影响场景的光源的光线进行采样。也就是说,渲染模块103选择场景中的一组表面点和/或一组方向以估计渲染图像的像素值。

[0020] 为了采样光线,渲染模块103采用一种或多种采样技术。用于评估表面上某个点的照明的两种常见采样技术包括对光源进行采样和对双向反射分布函数(BRDF)进行采样。对光源进行采样可以指代各种类型的光源,包括例如点光源、球形光源、矩形光源等,或者如下文更详细地描述,对应用于场景的模型的高动态范围(HDR)映射进行采样。

[0021] BRDF描述了根据入射在表面上的光线的方向如何使光从表面反射/散射。当视线入射在光滑表面上时,根据反射定律,相当大部分的视线在单个方向上被反射,这表明入射光线的角度等于反射光线的角度。结果,出于有效采样的目的,BRDF采样技术可以根据与双向反射分布函数相似的概率分布,在表面点处随机选择反射或出射光线的方向。也就是说,采样技术在入射光线的入射点处随机采样出射光线方向,每个特定方向的采样概率等于在特定方向上反射的光与从入射光线的方向在表面上入射的光量之比。相反,当光线入射在粗糙的散射表面上时,可以在所有方向上均匀的散射出射光线。结果,对光源上的表面点进行采样比对场景中的入射点处的出射光线方向进行采样更为有效。例如,可以根据均匀分布,对光源上的表面点进行采样。

[0022] 如果场景包括具有不同光学特性的表面,例如光滑的反射表面和粗糙的散射表面,单一采样技术可能都不足以对场景进行采样。因此,可以使用多种采样技术,每种都适合于渲染场景的不同区域。通过使用MIS结合采样技术,可以在整个渲染图像上实现低噪声水平。

[0023] 当渲染模块103采用多种采样技术时,多重重要性采样为将采样技术与可证明的方差约束相结合提供简单而健壮的方式。

[0024] 考虑非负函数 $f(x)$ 的积分 $F = \int_{\mathcal{X}} f(x) d\mu(x)$ 。可以通过取利用pdf $p(x)$ 的采样技术生成的 n 个随机变量(样本) $X_i, i=1, \dots, n$ 来构造积分的无偏蒙特卡洛估算器 $\langle F \rangle$,并且设置估算器 $\langle F \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{f(X_i)}{p(X_i)}$ 。估算器的方差取决于样本的数量以及pdf $p(x)$ 与被积函数 $f(x)$

有多“相似”。只要 p 与 f 的比例正好符合归一化常数(即 $p(x) = f(x)/F$),方差为零。

[0025] 在所有情况下都很难找到近似于 f 的单一pdf,但可能存在多种采样技术 $t \in T$,具有pdfs $p_t(x)$,每种都近似于 f 的一些重要特征,例如双向反射分布函数(BRDF)采样或高动态范围(HDR)映射采样。

[0026] 多重重要性采样(MIS)为给定多种抽样技术的情况下构建组合估算器提供了通用框架。假定存在来自每种技术的 $n_t = c_t * n$ 个独立样本,其中, c_t 表示总样本数的相应分数,每个第 i 个独立样本表示为 $X_{t,i}$ 。然后,多样本组合估算器将读取:

[0027] $\langle F \rangle_{MS} = \sum_{t \in T} \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} w_t(X_{t,i}) \frac{f(X_{t,i})}{p_t(X_{t,i})}$ (等式 1)

[0028] 其中,第一求和是通过多种采样技术进行的,第二求和是通过独立采样进行的,并且其中,加权函数 $w_t(x)$ 提供了可以被用来优化估算器方差的自由度。

[0029] 因此,图像渲染系统可以通过调整加权函数,例如通过调整不同采样技术对渲染图像的不同区域(诸如对象表面的不同部分)的贡献来优化不同采样技术的组合。这样,加权函数提供了可以被用来优化MIS估算器方差的自由度。在一些实施方式中,将平衡启发式用于 $w_t(x)$,这将在下文更详细地描述。

[0030] 平衡启发式的等式为:

$$[0031] \quad w_t(x) = \frac{c_t p_t(x)}{\sum_{t' \in T} c_{t'} p_{t'}(x)} \quad (\text{等式 2})$$

[0032] 其中 c_t 是采样技术集合 T 中的采样技术 t 的总采样计数的相应分数,而 $p_t(x)$ 是采样技术 t 的pdf。分母中的质数符号表示分母中的总和遍及所有采样技术(包括 t),而分子仅使用与权重相对应的单个采样技术 t 。

[0033] 将平衡启发式与等式1的常见MIS估算器结合可得出以下形式的组合估算器:

$$[0034] \quad \langle F \rangle_{MS} = \frac{1}{n} \sum_{t \in T} \sum_{i=1}^{n_t} \frac{f(X_{t,i})}{p_{\text{eff}}(X_{t,i})} \quad (\text{等式 3})$$

[0035] 其中,根据上面等式2中的平衡启发式分母, $p_{\text{eff}}(x)$ 等于 $\sum_{t' \in T} c_{t'} p_{t'}(x)$ 。这种组合估算器表明,使用平衡启发式有效地对应于具有从 $p_{\text{eff}}(x)$,即,采样技术的pdf的加权平均中提取的样本的常规的蒙特卡洛估算器。

[0036] 虽然平衡启发式通常会导致全局意义上的低方差MIS估算器,但当将其应用于特定的固定采样技术集合时,可能不会产生良好的估算器。由于平衡启发式有效地平均了组合采样技术的pdf,因此可能导致高值区域采样不足,而低值区采样过度。

[0037] 但是,可以通过优化采样技术之一来有效地“锐化”其pdf,以补偿由平衡启发式引起的pdf平均的影响,从而减少估算器方差。

[0038] 对于采样分数 $c_t > 0$ 的给定的采样技术集 $t \in T$ 的MIS组合,可以将采样技术之一指定为“自由”。修改的MIS的目标是找到用于采样技术 τ 的 $p_\tau(x)$,将利用上文等式3中所示的平衡启发式最小化组合估算器的方差。即,为减少估算器的方差,该系统优化采样技术之一。

[0039] 在理想情况下,等式3中的MIS估算器的方差为零。为此,混合物密度 $p_{\text{eff}}(x)$ 必须与被积函数 $f(x)$ 正好成正比,即, $p_{\text{eff}}(x) = \frac{f(x)}{F}$ 。

[0040] 假设平衡启发式,则 $p_{\text{eff}}(x) = q(x) + c_\tau p_\tau(x)$ 成立,其中,在单项 $q(x) = \sum_{t' \in T \setminus \{\tau\}} c_{t'} p_{t'}(x)$ 下,存在用于所有固定采样技术的单独的pdf。

[0041] 可以用pdf代数求解:

$$[0042] \quad p_\tau(x) = \frac{f(x)}{c_\tau F} - \frac{q(x)}{c_\tau} \quad (\text{等式 4})$$

[0043] 但是,为了使所得的pdf有效,可以将负值钳位并将方程重新归一化,以获取用于所改进的MIS的优化pdf,如下所示:

$$[0044] \quad \tilde{p}_\tau(x) = \frac{1}{b} \max\{0, p_\tau(x)\} \quad (\text{等式 5})$$

[0045] 等式5的pdf提供了用于改进的pdf的通用等式,即使在图像渲染的上下文之外,该等式也可以应用于任何MIS估算器。下文的图2和图3描述了将该通用结果应用于图像渲染系统中基于图像的照明的特定上下文。

[0046] 图2示出了基于图像的照明的示例。基于图像的照明涉及由于具有任意BRDF的表面上的高动态范围(HDR)环境映射的照明的计算。HDR环境映射可以对应于例如相对于被照亮的表面,投射到半球上的现实世界照明的全向捕获。图像渲染系统,例如,图1的图像渲染系统100,被用于例如使用MIS,显示图像的图像。可以使用图1中的示例,例如,使用MIS,基于HDR环境映射来计算场景的照度。

[0047] 具体地,图2示出了具有任意BRDF 202的表面200。HDR映射204可以被用来从特定角度确定表面上的点x 206上的照明。该表面具有法线n 208。

[0048] 由于来自HDR映射的直接照明而导致的点x在表面200上的反射辐射为:

$$L_{\text{dir}}(\mathbf{x}, \omega_o) = \int_{\mathcal{H}(\mathbf{n})} L_i(\omega_i) \rho(\mathbf{x}, \omega_o, \omega_i) |\omega_i \cdot \mathbf{n}|_+ d\omega_i \quad (\text{等式 6})$$

[0050] 在等式6中,x是表面上的位置,n是x处的表面法线。 ω_o 是图2中的光线210所示的出射视向。 $\mathcal{H}(\mathbf{n})$ 是以表面法线n为中心的半球。来自方向 ω_i 的HDR映射发射由 $L_i(\omega_i)$ 给出,其由图2中的光线212示出。变量 ρ 表示表面BRDF,以及 $|\omega_i \cdot \mathbf{n}|_+$ 表示 ω_i 和n之间的角的余弦的正部。

[0051] 来自HDR映射的直接照明的蒙特卡洛估计 $L_{\text{dir}}(\mathbf{x}, \omega_o)$ 通常依赖于两种采样技术,这两种技术使用随机采样来找到辐射的近似解。第一种采样技术涉及对HDR映射的采样,而第二种采样技术涉及对BRDF与余弦的乘积 $|\omega_i \cdot \mathbf{n}|_+$ 的采样。然后将MIS用于组合采样技术。

[0052] 通常使用列表概率密度函数(pdf) $p_1(\omega_i)$ 来实现从HDR映射,例如映射204的采样。相比之下,对BRDF的余弦乘积进行采样是从pdf $p_p(\omega_i | \omega_o, \mathbf{x})$ 导出的解析等式,该等式通常取决于出射方向和表面位置。

[0053] 然后,图像渲染系统可以通过组合由两种采样技术产生的结果以使用MIS来渲染表面200,以生成表面200上的点的反射辐射。此外,如在下文参考图3更详细所述,优化这些采样技术中的一种可以被用来从常规MIS的估算器结果减少估算器方差。

[0054] 图3是用于使用修改的多重重要性采样来渲染具有基于图像的照明的场景的图像的示例性过程300的流程图。为了方便起见,过程300将被描述为由位于一个或多个位置的一个或多个计算机的系统执行,并且根据本说明书被适当地编程。例如,图像渲染系统,例如,图1的图像渲染系统100,可以被适当地编程,以执行过程300。

[0055] 系统接收描述场景的数据(310)。该场景可以包括一个或多个对象,这些对象可以具有不同的表面光学特性,以及描述基于图像的照明的数据,例如基于图像的照明的HDR映射。对象数据可以描述例如一个或多个对象的位置、取向、形状或光学特性。描述场景的数据可以是完整的数据集,即,它包括系统渲染场景的视觉逼真的图像的所有必要信息。作为示例,场景可以是由图2的表面200表示的场景。

[0056] 数据还可以描述沿特定观看方向,从场景中的各个点出射的光量,辐射。出射辐射,即离开场景中的任一方向的点的辐射,是出射辐射(从该点出射的辐射,例如,如果该点位于光源表面上)和反射辐射(从该点反射的辐射)的总和。该关系可以通过下述的渲染等

式捕获:

$$[0057] \quad L_{\text{out}}(x, \omega_0) = L_{\text{emit}}(x, \omega_0) + L_{\text{reflected}}(x, \omega_0) \quad (\text{等式7})$$

[0058] 该渲染等式给出沿特定方向(如角度 ω_0 所述的)离开场景中的某个点(如矢量 x 所述的)的辐射量。描述场景的数据指定了渲染等式中包含的所有参数。特别地,值得注意的是等式7中的 $L_{\text{reflected}}$ 对应于 $L_{\text{dir}} + L_{\text{indir}}$,其中, L_{dir} 由等式6给出,并且对应于由所改进的MIS改进的值。通常通过追踪反射光线并且在反射光线撞击要渲染的场景的点处计算等式7来递归求解 L_{indir} 。

[0059] 该系统使用多重重要性采样来接收渲染场景的图像的请求(320)。可以使用具有不同概率分布的特定多个采样技术,在场景中对 n 个总样本进行采样,每种技术都用于采样 n 个总样本中的相应分数。

[0060] 例如,图像可以从特定像平面中的指定视点的角度所拍摄的图像。该系统可以通过以图像为中心的光线跟踪,即追踪通过像平面中的像素的光路并且模拟其与场景中的对象相遇的效果来渲染图像。渲染图像等效于求解关联的渲染等式,并且获得描述光线如何与场景中的一个或多个对象相互作用的函数。但是,项 $L_{\text{reflected}}(x, \omega_0)$ 涉及复积分,导致渲染方程通常没有封闭解。为了近似解,可以使用依赖于多种采样技术的蒙特卡洛估算对渲染方程进行数值评估。然后可以使用MIS组合这些采样技术。如上所述,传统的MIS依赖于用于每种采样技术的不同加权函数来微调每种采样技术的贡献。因此,MIS估算器方差也取决于所使用的加权函数。

[0061] 回到图2,第一采样技术涉及对描述场景的基于全向图像的照明的HDR映射进行采样,而第二采样技术涉及对表面的点处的BRDF和 $|\omega_i \cdot n|_+$ 的乘积进行采样。

[0062] 在数学上,每种采样技术都与概率分布函数相关联。概率分布指示将对数据点进行采样的可能性。例如,均匀的概率分布表示所有数据点都同样有可能被采样。

[0063] 该系统修改与采样技术之一相关联的概率分布(330)。与常规MIS相比,本说明书中描述的改进的MIS优化来自采样技术之一的pdf,以减少估算器方差。在用于基于图像的照明的上述示例中,通常使用列表pdf实现对HDR映射的采样,该列表pdf通常比用于对BRDF余弦乘积采样的pdf更易于修改。

[0064] 特别地,在一些实施方式中,系统在预处理中优化列表概率密度,该可以在依赖于用于HDR采样的MIS的任何渲染器中使用该改进,而无需对采样例程本身进行任何修改。也就是说,优化可以在采样开始之前完成,并且不依赖于系统的任何自适应更新。由于该系统仅修改了列表pdf,因此对每个样本的时间没有开销和边际影响。

[0065] 为了获得用于图2中所述的基于图像的照明场景的改进的pdf \tilde{p}_1 ,如图2所示,将来自等式6和BRDF采样技术的被积函数 $p_\rho(\omega_i | \omega_0, x)$ 插入上述等式5的广义pdf解中,得到:

$$[0066] \quad \tilde{p}_1(\omega_i | \omega_0, x) = \frac{1}{b} \max\left\{0, \frac{f_1(x, \omega_0, \omega_i)}{c_1 L_{\text{dir}}(x, \omega_0)} - \frac{1 - c_1}{c_1} p_\rho(\omega_i | \omega_0, x)\right\} \quad (\text{等式8})$$

[0067] 其中, c_1 是从HDR映射中获取的样本的分数,并且 $f_1(x, \omega_0, \omega_i) = L_1(\omega_i) \rho(x, \omega_0, \omega_i) |\omega_i \cdot n|_+$ 。归一化因子 b 确保 $\tilde{p}_1(\omega_i | \omega_0, x)$ 积分为1。

[0068] 等式8中改进的列表pdf在实践中很难应用,因为pdf $\tilde{p}_1(\omega_i | \omega_0, x)$ 取决于 ω_0 和 x ,并且该等式要求系统对每个观看方向和表面位置列表化pdf。但是,可以通过假设具有单位

反照率的Lambertian (朗伯特) BRDF得出与法线相关的pdf (nd), 其提供了等式8的pdf的实际近似值, 由表面反射的入射光的比例 $\rho \equiv \frac{1}{\pi}$, 如下所示:

$$[0069] \quad p_i^{nd}(\omega_i | \mathbf{n}) = \frac{1}{b_{nd}} \max\left\{0, \frac{f_{nd}(\omega_i, \mathbf{n})}{c_1 \int_{\mathcal{H}(\mathbf{n})} f_{nd}(\omega, \mathbf{n}) d\omega} - \frac{1-c_1}{c_1} \frac{|\omega_i \cdot \mathbf{n}|_+}{\pi}\right\} \quad (\text{等式 } 9)$$

$$[0070] \quad \text{其中, } f_{nd}(\omega_i, \mathbf{n}) = L_1(\omega_i) \frac{|\omega_i \cdot \mathbf{n}|_+}{\pi}。$$

[0071] 现在得到的pdf仅取决于表面法线 \mathbf{n} , 并且可以对多个方向进行预先计算。为了获得可以方便地应用于现有渲染器的更方便的结果, 通过在所有可能的法线上平均 $p_i^{nd}(\omega_i | \mathbf{n})$ 来去除对 \mathbf{n} 的依赖以生成与法线无关的pdf (n_i)。这产生了实际的改进的概率分布:

$$[0072] \quad p_i^{ni}(\omega_i) = \frac{1}{b_{ni}} \max\{0, L_1(\omega_i) - 2(1 - c_1)\bar{L}_1\} \quad (\text{等式 } 10)$$

[0073] 其中 \bar{L}_1 是平均HDR映射亮度, 以及 b_{ni} 确保 $p_i^{ni}(\omega_i)$ 积分为1。

[0074] 系统使用改进的概率分布来渲染场景 (340)。例如, 系统可以用具有上述改进的概率分布的改进的采样技术代替自由采样技术。该系统可以使用适当的加权函数 (例如, 使用平衡启发式) 来组合包括改进的采样技术的采样技术。与常规MIS估算器相比, 使用改进的采样技术的改进的多重重要性采样具有减小的MIS估算器方差。

[0075] 系统输出渲染的图像 (350)。一旦系统获得了渲染图像上每个像素的值, 就可以将图像转换为合适的格式并显示。图像数据格式的示例包括JPEG、PNG、TIFF、SVG、CGM、FITS等。

[0076] 尽管本公开内容讨论了将改进的MIS应用于计算机图形学领域, 但是通常, 可以将该改进的MIS应用于依赖MIS的广泛问题。例如, 如本说明书中所述的改进的MIS可用于运输路径导航应用、异构介质中的自由飞行采样或直接或间接照明的光采样。所有这些方法均以结合防御技术的经验构造的pdf为特征, 使其可适用于本说明书中所述的改进的MIS。

[0077] 本说明书中所述的主题和功能操作的实施例能够以数字电子电路、以有形体现的计算机软件或固件、以计算机硬件实现, 包括本说明书中公开的结构及其等效结构, 或者其一种或多种的组合。本说明书中所述的主题的实施例能够实现为一个或多个计算机程序, 即, 在有形的非暂时性程序载体上编码的计算机程序指令的一个或多个模块, 该模块由数据处理装置执行或该模块控制数据处理装置的操作。替选地或另外, 程序指令能够被编码在人工产生的传播信号上, 例如机器产生的电、光或电磁信号, 这些信号被产生以对信息进行编码以用于传输到合适的接收器装置从而由数据处理装置执行。计算机存储介质能够为机器可读存储设备、机器可读存储基板、随机或串行访问存储器设备或它们中的一个或多个的组合。然而, 计算机存储介质不是传播的信号。

[0078] 术语“数据处理装置”涵盖用于处理数据的所有类型的装置、设备和机器, 例如包括可编程处理器、计算机或多个处理器或计算机。该设备能够包括专用逻辑电路, 例如FPGA (现场可编程门阵列) 或ASIC (应用程序专用集成电路)。除硬件之外, 该装置还能够包括为所讨论的计算机程序创建执行环境的代码, 例如, 构成处理器固件、协议栈、数据库管理系

统、操作系统或其一个或更多的组合的代码。

[0079] 计算机程序(也可以称为或描述为程序、软件、软件应用程序、模块、软件模块、脚本或代码)能够以任何形式的编程语言编写,包括编译或解释性语言,声明性或过程语言,并且能够以任何形式部署,包括作为独立程序或作为模块、组件、子例程或适用于计算环境的其它单元。计算机程序可以但不必对应于文件系统中的文件。程序能够存储在保存其它程序或数据的文件的一部分中,例如一个或多个脚本,该脚本被存储在标记语言文档中,存储在专用于所讨论程序的单个文件中,或存储在例如存储一个或多个模块、子程序或部分代码的文件或多个协调文件中。能够将计算机程序部署成在一台计算机上或在位于一个站点或分布在多个站点上并且由通信网络互连的多台计算机上执行。

[0080] 本说明书中所使用的“引擎”或“软件引擎”是指软件实现的输入/输出系统,该系统提供与输入不同的输出。引擎能够为编码的功能性块,诸如库、平台、软件开发工具包(“SDK”)或对象。能够在任何适当类型的计算设备(例如,服务器、移动电话、平板电脑、笔记本电脑、音乐播放器、电子书阅读器、膝上型或台式计算机、PDA、智能电话或其它固定或便携式设备)上实现每个引擎,该计算设备包括一个或多个处理器和计算机可读介质。另外,两个或多个引擎可以在同一计算设备上或在不同的计算设备上实现。

[0081] 本说明书中所述的过程和逻辑流程能够由执行一个或多个计算机程序以通过对输入数据进行操作并生成输出来执行功能的一个或多个可编程计算机来执行。过程和逻辑流程也能够由专用逻辑电路执行,并且设备也能够被实现为专用逻辑电路,例如FPGA(现场可编程门阵列)或ASIC(专用集成电路)。

[0082] 适合于执行计算机程序的计算机包括,例如,能够基于通用或专用微处理器或两者,或者基于任何其它类型的中央处理单元。通常,中央处理单元将从只读存储器或随机存取存储器或两者接收指令和数据。计算机的基本元件是用于履行或执行指令的中央处理单元以及用于存储指令和数据的一个或多个存储器设备。通常,计算机还将包括,或可操作地,耦合成从一个或多个用于存储数据的大容量存储设备接收数据,或向该设备传输数据,该设备例如例如,磁盘、磁光盘或光盘。然而,计算机不必具有这种设备。此外,计算机能够被嵌入另一设备,例如,移动电话、个人数字助理(PDA)、移动音频或视频播放器、游戏机、全球定位系统(GPS)接收器或便携式存储设备,例如通用串行总线(USB)闪存驱动器等。

[0083] 适用于存储计算机程序指令和数据的计算机可读介质包括所有形式的非易失性存储器、介质和存储器设备,包括例如半导体存储器设备,例如EPROM、EEPROM和闪存设备;磁盘,例如内部硬盘或可移动盘;磁光盘;以及CD ROM和DVD-ROM盘。处理器和存储器能够由专用逻辑电路补充或被并入专用逻辑电路中。

[0084] 为了提供与用户的交互,能够在具有显示设备以及键盘和定点设备的计算机上实现本说明书中所述的主题的实施例,该显示设备例如是CRT(阴极光线管)或LCD(液晶显示器)监视器,以向用户显示信息,用户能够通过键盘和例如鼠标或轨迹球的定点设备向计算机提供输入。也能够使用其它类型的设备以提供与用户的交互;例如,提供给用户的反馈能够为任何形式的感觉反馈,例如视觉反馈、听觉反馈或触觉反馈;并且能够以任何形式接收来自用户的输入,包括声音、语音或触觉输入。另外,计算机能够通过向用户使用的设备发送文档以及从该设备接收文档来与用户进行交互;例如,通过响应于从网页浏览器接收的请求而将网页发送到用户客户端设备上的网页浏览器。

[0085] 本说明书中所述的主题的实施例能够在下列计算系统中实现,该系统包括后端组件(例如,作为数据服务器),或者包括中间件组件(例如,应用程序服务器),或者包括前端组件,例如具有用户能够通过其与本说明书中所述的主题的实现进行交互的图形用户界面或Web浏览器的客户端计算机,或者一个或更多这些后端、中间件或前端组件中的任何组合。系统的组件能够通过数字数据通信的任何形式或介质(例如,通信网络)互连。通信网络的示例包括局域网(“LAN”)和广域网(“WAN”),例如因特网。

[0086] 计算系统能够包括客户端和服务端。客户端和服务端通常彼此远离,并且通常通过通信网络进行交互。客户端和服务端之间的关系是通过在各自计算机上运行并彼此具有客户端-服务端关系的计算机程序产生的。

[0087] 尽管本说明书包含许多特定的实施方式细节,但是这些细节不应被解释为对任何发明或可能要求保护的范围的限制,而应被解释为是特定于特别发明的特别实施例的特征的描述。在单独实施例背景下在本说明书中描述的某些特征也能够单个实施例中组合地实现。相反,在单个实施例的背景下描述的各种特征也能够多个实施例中单独地或以任何合适的子组合来实现。此外,虽然上文可能将特征描述为以某些组合起作用并且甚至最初如此要求,但是在某些情况下能够从该组合中排除所要求保护的组合的一个或多个特征,所要求保护的组合可以针对子组合或子组合的变型。

[0088] 类似地,虽然在附图中以特定顺序描绘了操作,但是这不应被理解为要求以所示的特定顺序或以连续顺序执行这些操作,或者执行所有所示操作以实现期望结果。在某些情况下,多任务和并行处理可能是有利的。此外,上述实施例中的各种系统模块和组件的分离不应被理解为在所有实施例中都需要这种分离,并且应理解,所述的程序组件和系统通常能够一起集成在单个软件产品中,或被包装成多个软件产品。

[0089] 已经描述了主题的特定实施例。其它实施例也在以下权利要求的范围内。例如,权利要求中所述的动作能够以不同的顺序执行并且仍然实现期望的结果。作为示例,附图中描绘的过程不一定需要所示的特定顺序或连续顺序来实现期望结果。在某些实施方式中,多任务和并行处理可能是有利的。

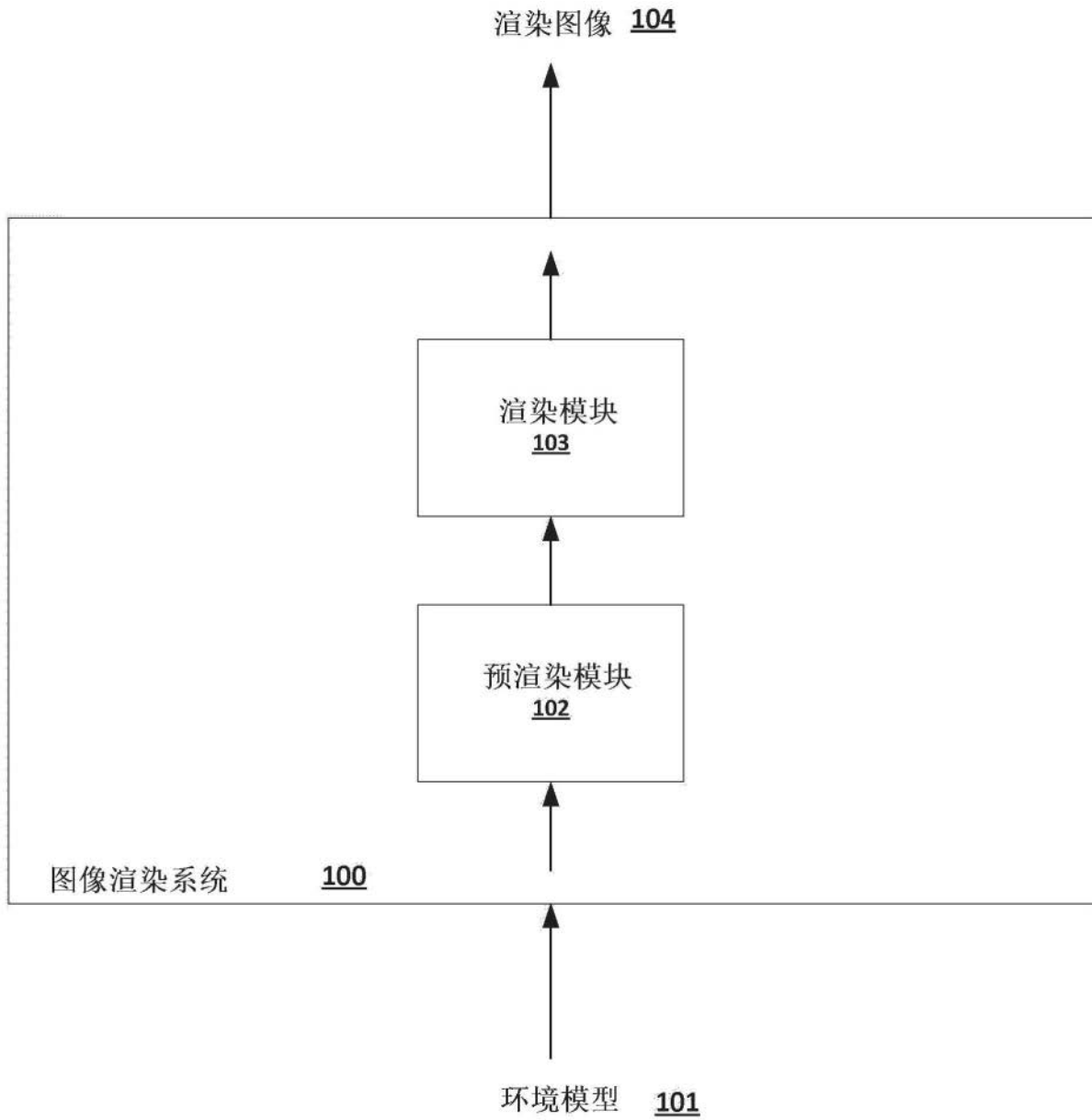


图1

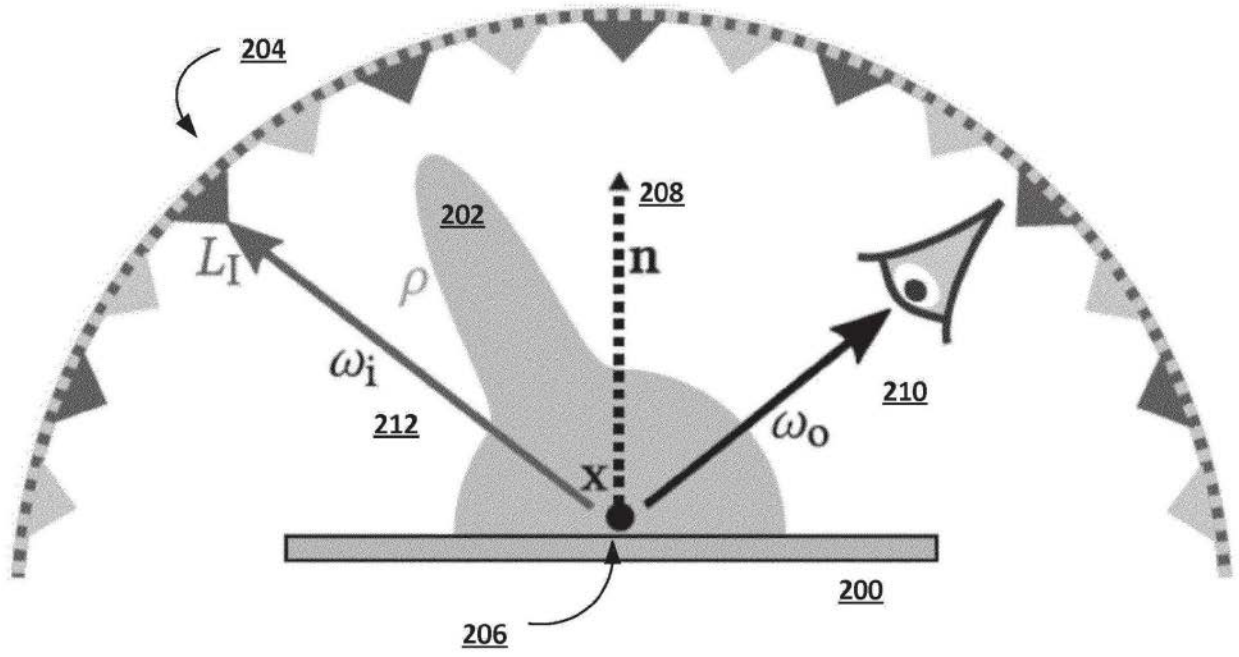


图2

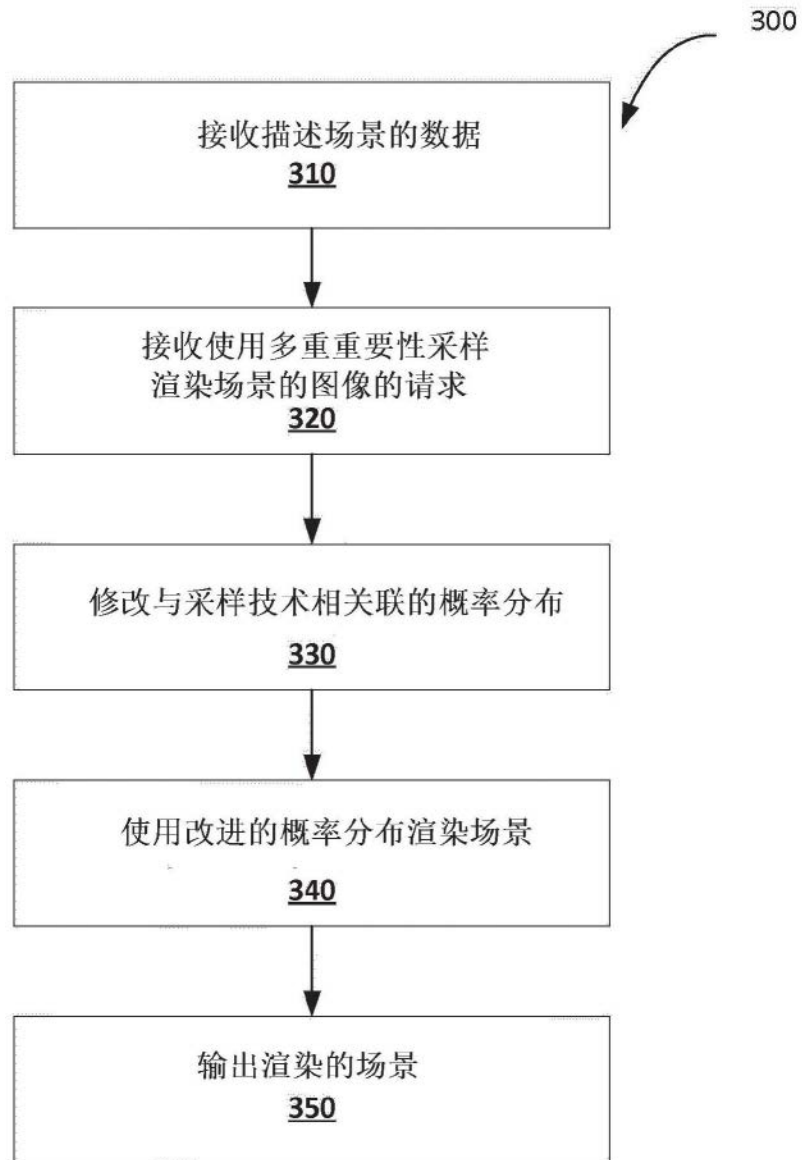


图3