

透射率函数映射

西里尔·德拉兰德尔

帕斯卡·高特隆

让-尤德斯·马维

/西里尔·德拉兰德尔、帕斯卡·高特隆、让·尤德斯·马维@technicolor.com

特艺色彩研究与创新

纪尧姆·弗朗索瓦

guillaume.francois@gmail.com

电影公司



(a) 云 - 100 步 - 8 fps



(b) TinPan Alley - 500 步 - 10 fps



(c) 特种部队 - ~50 步 - 3000 盏灯 - 7 分钟

图1：我们的算法引入了透射率函数图使用 GeForce GTX480 实时计算参与媒体内的光散射 (a、b)，并使用 Pixar 的 RenderMan 进行生产渲染 (c)。©

抽象的

光与参与介质之间的相互作用涉及复杂的物理现象，包括光吸收和散射。雾、云或烟等介质具有复杂的光照相互作用，这些相互作用本质上与其构成粒子的属性相关。因此，介质传输的辐射亮度取决于整个光路的变化特性，从而产生柔和的光轴和不透明度变化。

模拟这些介质中的光散射通常需要复杂的离线估计。实时应用程序要么基于大量预算，仅限于同质媒体，要么依赖简单的渲染技术（例如广告牌）。我们提出了一种快速估计参与介质内单次散射的通用方法。引入概念透射率函数图和均匀投影空间采样，我们的方法利用图形硬件来交互式支持动态光源、视点和参与媒体。我们的方法还考虑了固体物体投射的阴影，为快速渲染可能包含整个场景的参与媒体提供了功能齐全的解决方案。

实时性能，依赖于大量的预算、对材料同质性的近似或假设。

我们引入了一种基于光线行进的通用方法，用于快速估计均质和异质材料中的单次散射。这种散射模拟的计算成本是双重的：沿着观察光线的散射贡献的累积，以及对每个贡献的减少的光强度的估计。在本文中，我们引入了概念透射率函数图表示傅里叶空间中的介质透射率，以及均匀投影空间采样用于快速估计动态参与介质中的单次散射。此方法不需要预先计算，并处理与可能位于介质本身内的其他场景组件的交互。此外，光源和视点可以在介质内部或外部无缝移动。光线行进的可扩展性使我们的方法适用于许多应用，从使用图形硬件的实时可视化和视频游戏到离线渲染器（例如 Pixar 的 RenderMan）上的生产质量渲染。

1 简介

在生成越来越接近现实的虚拟世界图像的过程中，模拟半透明是不可避免的，因为现实世界充满了半透明材料，称为参与介质。从明亮的薄雾到有机材料或浓烟，它们的准确渲染是迈向现实主义的重要一步。光的穿过使这些材料具有复杂的光学现象，称为散射、吸收和发射。这种在现实世界中无处不在的现象使得半透明的真实渲染成为数十年来高度活跃的研究领域，产生了大量的实时和离线解决方案。当前最先进的技术要么仅限于离线渲染，要么出于

右。

在接下来的两节中，我们描述了之前解决参与媒体渲染的工作（第 2 节），并介绍了单次散射计算的关键方面（第 3 节）。第 4 节介绍了我们在同质媒体情况下渲染技术的基础。第 5 节介绍了我们在异质介质中光散射的情况下分解减少强度计算的解决方案。在第 6 节中，我们讨论实际问题并提出改进性能和适用性的解决方案。我们的结果在第 7 节中介绍。

2 相关工作

过去几十年来，大量出版物丰富了有关光与参与介质之间相互作用的有效模拟的文献。[Chandrasekhar 1950] 中介绍了参与介质中辐射传输的基本理论，并且 [Cerezo 等人 2017] 中提供了对此类介质的渲染技术的广泛调查。2005]。本节介绍与我们的方法最密切相关的先前工作，重点关注实时解决方案。

有几种方法为辐射传递方程的单散射部分提供了解析解，例如 [Pegoraro 和 Parker 2009; 孙等人。2005]。虽然有效并提供高交互性，但基础方程是建立在均匀介质的假设之上的，并且忽略了体积阴影效应

* 《特种部队：眼镜蛇的崛起》，图片由派拉蒙影业提供

由于固体物体遮挡光线。这种遮挡在 [Wyman and Ramsey 2008] 中得到了解释，它依赖于阴影体积和光线行进。该方法提供了高帧率，但在复杂场景中阴影体积提取可能会出现问题。

动画异质材料的实时渲染已在 [Zhou et al. 2017] 中得到解决。2008]。该方法基于将材质投影到径向基函数，支持多重散射和基于图像的照明。然而，它基于大量的预算计算，需要了解整个动画序列。[Harris 2005] 中描述了另一种方法，其中使用动态生成的冒名顶替者来表示体积云。该技术提供实时性能，但仅提供光散射的粗略近似，并在快速视点移动时产生伪影。

我们的透射率函数映射 (TFM) 技术大量使用了投影纹理，该原理之前已在文献中设计过。特别是，深度阴影贴图 [Lokovic 和 Veach 2000] 目前是表示半透明材料内透射率的一种选择方法，用于支持

归纳渲染。与阴影贴图 [Williams 1978] 类似，深度阴影贴图为每个纹素存储多个深度记录以及不透明度值。即使使用压缩，不透明度变化的准确表示也需要对许多值进行采样和潜在存储，从而导致大量内存占用。已经提出了几种方法来将此概念扩展到基于 GPU 的渲染 [Kim 和 Neumann 2001；尼斯等人。2003]，具有类似的优点和缺点。一些深阴影贴图

问题已被记录，其中 [Jansen 和 Bavoil 2010] 中已详细阐述，乌介绍了佛里尔不透明贴图。粒子的不透明度而不是每深度和不透明云以个别纹素中明确的故事值学家的形式进行投使用一小组有效系数的傅里叶空间，并且与影。这种方法很独我们的技术密切相关特，但重点关注实际不透明度存储而不是计算的光散射 G。此外，该技术在云中效果很好，但往往会在高密度中的光学细颗粒产生振铃伪影粒解决了这两个问 A。在本文中，TFM 技术解决了下一节介绍题。散射理论与本文其余部分的基础知识。

3 单次散射 特林

之间的相互作用 可见光和参与介质完全导出传输方程由覆盖两个单一的辐射 [Chandrasekhar 1950] 和多个散射事件。在射划线 本文中，在每个点重新描述了非发射参与者中我们专注于单身媒的散射事件 p 通过以下体。此类媒体的功能是：

- 吸收 系数 $\sigma_A(p)$ 表示光转化为其他形式的数量，即将来的闪电能量，例如热。
- 散射 系数 $\sigma_S(p)$ 是传入的金额照明散射 四处走动 p。
- 消光系数 $\sigma_T(p) = \sigma_A(p) + \sigma_S(p)$ 。
- 相位函数 $\rho(p, \omega_{\text{出去}}, \omega_{\text{在}})$ 它描述了散射光的量 p 从传入方向 $\omega_{\text{在}}$ 进入外出方向 $\omega_{\text{出去}}$ 。

为了定义单次散射，我们首先考虑一个点 p_n 介质内，以及散射方向 $\omega_{\text{出去}}$ 。给定光照强度 $L_{\text{里}}(p_n, \omega_{\text{在}})$ 从一个方向 $\omega_{\text{在}}$ (图2)，单次散射为：

$$\text{向}(p_n, \omega_{\text{出去}}) = \sigma_S(p_n) \rho(p_n, \omega_{\text{出去}}, \omega_{\text{在}}) L_{\text{里}}(p_n, \omega_{\text{在}}) \quad (1)$$

的贡献 p_n 到出射辐射率 $p_{\text{在}}$ 那么就是：

$$L_{p_n}(p_{\text{在}}, \omega_{\text{出去}}) = \text{向}(p_n, \omega_{\text{出去}}) e^{\int_{p_n}^{p_{\text{在}}} k_{\text{在}}(p) dp} \quad (2)$$

该方程的积分部分表示沿路径的光衰减 p_n 到 $p_{\text{在}}$ 介质内。

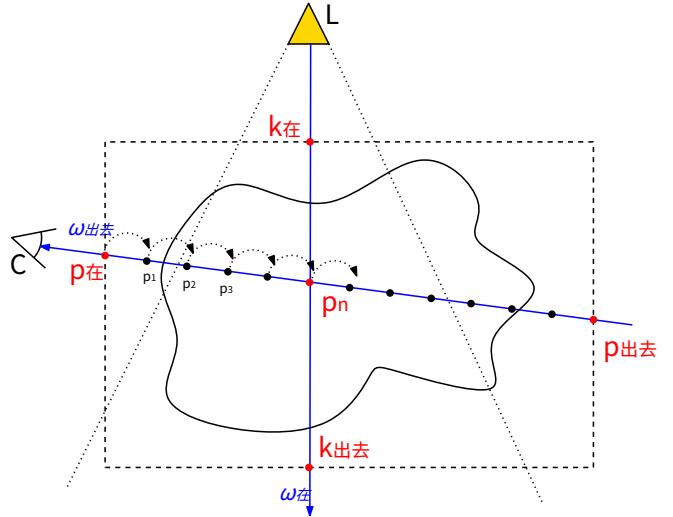


图2：经典射线行进算法的符号和原理

计算由盒子包围的参与者的单次散射的算法。执行饮食媒介光线行进 $[p_{\text{在}}, p_{\text{出去}}]$ ；对于每个样本，沿着 $[k_{\text{在}}, p_n]$ 计算减少的光 i G_{p_n} 是每强度。

正如刚才提到的， $L_{\text{里}}(p_n, \omega_{\text{在}})$ 描述该点的光入射 p 强度 n 从照明方向 $\omega_{\text{在}}$ 。这个值，称为降低强度，由光源的能量决定 L 以及沿路径的消任务道具光系数介质 L 到 p_n ：

$$L_{\text{里}}(p_n, \omega_{\text{在}}) = e^{\int_{p_n}^{p_{\text{在}}} k_{\text{在}}(p) dp} \quad (3)$$

点处的总出射辐射率 $p_{\text{在}}$ 由于沿着一个方向的罪恶 ω 角度散射出去然后通过积分每个点给出 $p_{\text{在}}$ 和 $p_{\text{出去}}$ 贡献

$$L(p_{\text{在}}, \omega_{\text{出去}}) = \int_{p_{\text{在}}}^{p_{\text{出去}}} L_p(p_{\text{在}}, \omega_{\text{出去}}) d p \quad (4)$$

基于这些方程，我们首先引入这个概念 *ric* 阴影贴图 到 F 体积-用于快速计算均匀介质中的单次计算，考虑固体物体麻烦 sim-的体积。这种同性质假设 i 等阴影 然后 s 升高 使用我们的透射率函数图用于异构介质中的快速降低强度计算。

4 体积阴影贴图

我们介绍阴影贴图的使用和均匀投影空间采样用于有效计算由于固体物体或投影纹理而产生的均匀介质中的光轴。我们的渲染方法基于延迟着色，分为三个主要步骤：阴影图的生成、实体对象延迟着色的位置和光照信息的收集，以及

单次散射计算。为了简单起见，仅

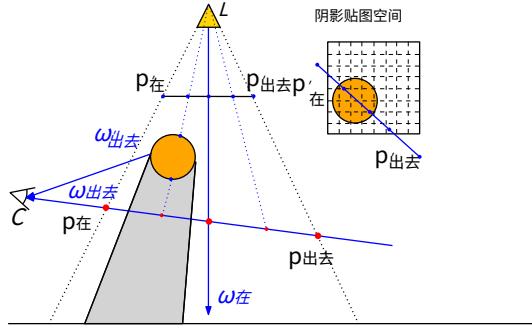


图3：我们计算均匀参与介质内的单次散射的算法的符号和原理。我们沿着每条观察光线执行单次光线行进，并使用阴影贴图检查样本是否被照亮。

本文考虑了聚光灯和均匀阴影贴图 [Williams 1978]，尽管可以使用任何其他光源类型，只要它符合投影纹理和阴影贴图算法即可。

4.1 基本算法

第一步，阴影贴图是从光源到虚拟环由撕裂产生的 disering 的投影。第二步，利用介质均匀性实际对象 int OA 缓冲区。在来计算场景的传入照明实体对象，以在每个可见的点的便唱沙多 w 地图和等式 3 分析地：

$$L_{\text{里}}(p_n, \omega_{\text{在}}) = e^{-\sigma t / \rho n k_{\text{在}}} \quad (5)$$

在第二步中使用表面反射率是每个点能指出到视点的反射减少。这 ca 通道的浮点实体和 RGBA buf nel 表示距离值。其中 fer, 其中 e 阿尔法 -

第三步根据上述输出执行实际 si (算单次散射法)。如图所示在图3中，对于每条射线开始于 C 在一个方向 n $\omega_{\text{出去}}$ 通过哈像素，我们首先与聚光锥相交以确定其入口点和出口点 p_在 和 p_{出去}。然后根据到最近实体的距离测试这些点，以考虑潜在的遮挡，

产生实际的进入点和退出点。最后，之间的射线 p_在 和 p_{出去} 进行采样以数值求解方程 4：对于每个采样点 p_n，我们通过获取相应的阴影贴图来计算光源的贡献。如果 p_n 如果未遮挡，则使用公式 5 和可能的投影纹理来计算降低的强度。点的贡献 p_n 然后使用公式 4 将其添加到单次散射中。

虽然该技术在图形硬件上有效且易于实现，但可以改进两个主要方面：阴影贴图采样的控制以及光锥外部参与介质的外观。我们使用以下方法解决这些问题 投影空间采样，和分散的环境照明。

4.2 投影空间采样

在锥体入口点和出口点之间采样点的最简单方法是拾取之间均匀间隔的采样点 p_在 和 p_{出去}。然而，如图 4 所示，阴影图中实际阴影采样点的密度根据观察方向的不同而变化很大。图 4(a) 给出了一个病理情况，其中采样密度

算法1基础体积阴影贴图

生成阴影贴图
计算反射辐射率 L 和距离信息 d, \forall 像素 对全部像素做

确定方向 $\omega_{\text{出去}}$ 从 C 通过像素 Fetch L 和 d, 反射亮度和到最近固体物体的距离

使相应光线与光锥相交 如果射线与圆锥体相交然
后

计算入口点和出口点 p_在 和 p_{出去}

如果 $d < \|CP_{\text{出去}}\|$ 然后

返回 L

万一

如果 $d < \|CP_{\text{出去}}\|$ 然后

$p_{\text{出去}} = C + d\omega_{\text{出去}}$

万一

$L_{\text{分数}} = 0$

对全部样本点 p_n 沿着 p_在 p_{出去} 做

获取对应的阴影贴图纹理元素

如果 ISJ 不铜 dt 他 n

$L_{SC_{\text{在}}} +=$ 斯吴乐 s 加物贡献 p_n

zhd 如果

结束 For

钻议威特 红色的斯 d = $L_{\text{ot}} / \|p_{\text{在}} p_{\text{出去}}\|$

雷物的 SC_在 + L 关丑 C 编辑

别的

雷物的

万一

结束于

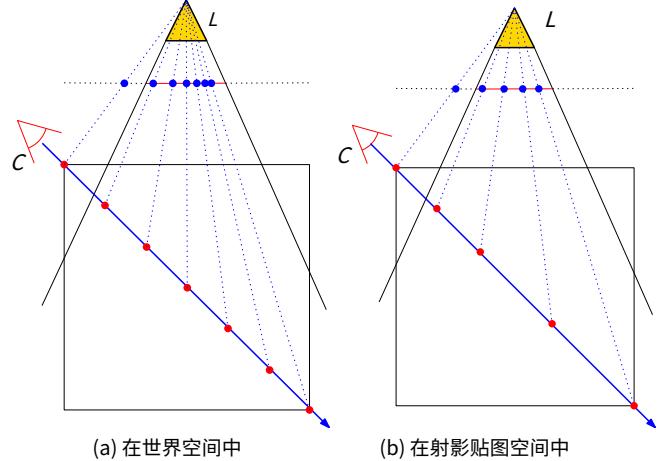


图4：由于沿光线的投影贴图采样率不同，世界空间 (a) 中的均匀采样涉及精度问题。我们通过在投影贴图空间 (b) 中进行均匀采样来克服这个问题，从而沿着整个光线提供恒定的阴影采样质量。

阴影贴图在视点附近很少，并且随着到视点的距离变远而增加。因此，在视点附近获得令人满意的采样质量意味着在介质的较远部分进行不必要的过采样。

为了提供直观的质量控制，我们建议使用以下方法在阴影贴图上保持恒定的采样质量 投影空间采样：入口点和出口点 p_在 和 p_{出去} 是第一

投影到阴影贴图空间，产生 p_' 和 p_' 出去。然后，投影样本点 p_n 均匀细分得到

该段 p' 在 p 出去。如图4(b)所示，样本点 p_n 然后被投影回世界空间来计算它们的散射荷兰国际集团的贡献。

此方法在包含高频细节的场景中或在使用高分辨率投影纹理时特别有用，因为这将样本数量直接链接到投影纹理的实际采样率。如图 5 所示，我们的投影空间采样倾向于比世界空间中的经典采样更准确地捕获投影图的细节，特别是当照明和观察方向几乎共线时。

4.3 分散的环境照明

体积方法的一个常见问题是在光锥之外缺乏相干散射和衰减效应。在现实世界中，这种效应是由于参与介质中的多次散射事件和全局照明造成的。许多实时应用程序使用简单的环境照明术语来近似全局照明效果，不加区别地添加到每个阴影点。由于我们的方法仅处理单散射和直接照明，因此我们建议将环境照明的原理扩展到同质参与媒体。让我们回忆一下描述单次散射的方程 2：

$$L_{p_n}(p_{\text{在}}, \omega_{\text{出去}}) = \int_{\Omega} (p_n, \omega_{\text{出去}}) e_{\text{在}}^{\text{PN-ot}}(\text{页}) dp \quad (6)$$

我们引入一个分散环境照明术语 L_d 对应于从各个方向到达介质中每个点的辐射率。在这种情况下，积分可以通过以下路径解析求解：C 到某一点 p 介质内：

$$L_{p, \omega_{\text{出去}}} = \int_{\Omega} \frac{\sigma_{\text{散}}}{\sigma_t} L(\omega_{\text{在}}) e_{\text{在}}(\omega_{\text{出去}}) \quad (7)$$

由于这个公式与 [Chandrasekhar 1950] 中单次散射的定义一致，分散的环境照明可以与上述算法无缝结合，如图 6 所示。

在本节中，我们介绍了快速高效的单散射模拟方法。我们利用均匀参与介质的假设来分析计算光源的降低强度。下一节介绍透射率函数图提出这一假设，从而将我们的方法扩展到具有不同不透明度的参与媒体。

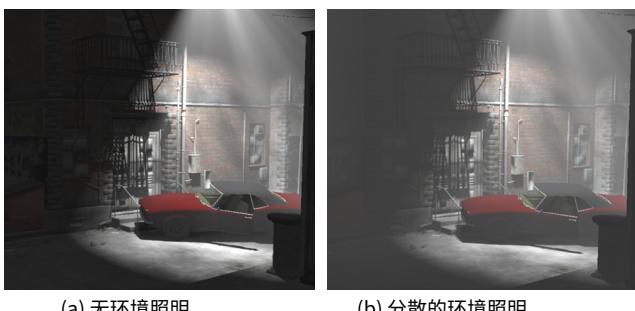


图6：分散的环境照明在光锥外提供相干衰减。

5 透射率函数映射

异构参与介质中光线行进散射模拟的常见瓶颈是减少的计算

强度 L_s 在每个样本点。这种降低的强度可以通过将介质从样本向光源进行光线行进或使用投影纹理技术（例如深度阴影图 [Lokovic 和 Veach 2000] 或傅里叶不透明度图 [Jansen 和 Bavoil 2010]）来获得更高的性能。

透射率函数贴图的原理直接建立在上一节中描述的体积阴影贴图技术的基础上：我们的目标是利用有关沿每条光线的光衰减的附加信息来丰富阴影贴图。为此，我们以类似于深度阴影贴图方法的方式，沿着光线对介质进行采样。然而，我们没有明确存储不透明度样本的分段线性组合，而是选择利用透射率函数的连续性和相对平滑度，并将其投影到函数基础的一小组系数中。因此，给定一组基函数 $\{\mathcal{Z}_j(x)\}_{j \in \mathbb{N}}$ ，透射率函数 $\text{时间}(x)$ 在远处 x 是：

$$\text{时间}(x) = \sum_j C_j \mathcal{Z}_j(x) \quad (8)$$

$$C_j = \int_{-\infty}^x \text{时间}(x) \mathcal{Z}_j(x) dx \quad (9)$$

算法2透射率函数图生成

将视点设置为阴影贴图生成 对全部像素做

放 $C_j = 0 \forall j \in [0..n]$

确定方向 $\omega_{\text{在}}$ 从 C 通过像素 Fetch d 到最近固体物体的距离 射线与介质的边界框相交 如果射线与盒子相交然后

计算入口点和出口点 $k_{\text{在}}$ 和 $k_{\text{出去}}$

如果 $d < \text{力克在}$ //然后

返回 $C_j = 0 \forall j \in [0..n]$ 万一

如果 $d < \text{力克出去}$ //然后

$k_{\text{出去}} = k_{\text{在}} + d \omega_{\text{在}}$

万一

对全部样本点 k_n 沿着 $k_{\text{在}} \rightarrow k_{\text{出去}}$ 做

获取密度 k_n 并计算透射率 时间_{jn}

$\delta_k = \text{时间}_{jn} / k_{n-1} k_n$ // 对全

部 $j \in [0..n]$ 做

$C_j = \text{时间}_{jn} \text{余弦} \left(\frac{j\pi}{2^n} (2X+1) \right) \delta_k$

结束于

结束于

返回 $\{C_j\}_{j \in [0..n]}$

别的

返回 $C_j = 0 \forall j \in [0..n]$ 万一

结束于

在实践中，我们通过遍历介质并执行数值积分来求解方程 9（算法 2）。虽然透射率函数可以投影到任何函数基础中，但我们选择了离散余弦变换，因为它易于评估，并且即使使用一小组系数也能保证重建信号的质量：

$$\mathcal{Z}_j(x) = \text{余弦} \left(\frac{j\pi}{2^n} (2X+1) \right) \quad (10)$$

这组系数可以在阴影贴图生成后立即存储在多个浮点渲染目标中。

最终渲染遵循算法 1。但是，我们不是通过分析计算降低的强度，而是获取透射率

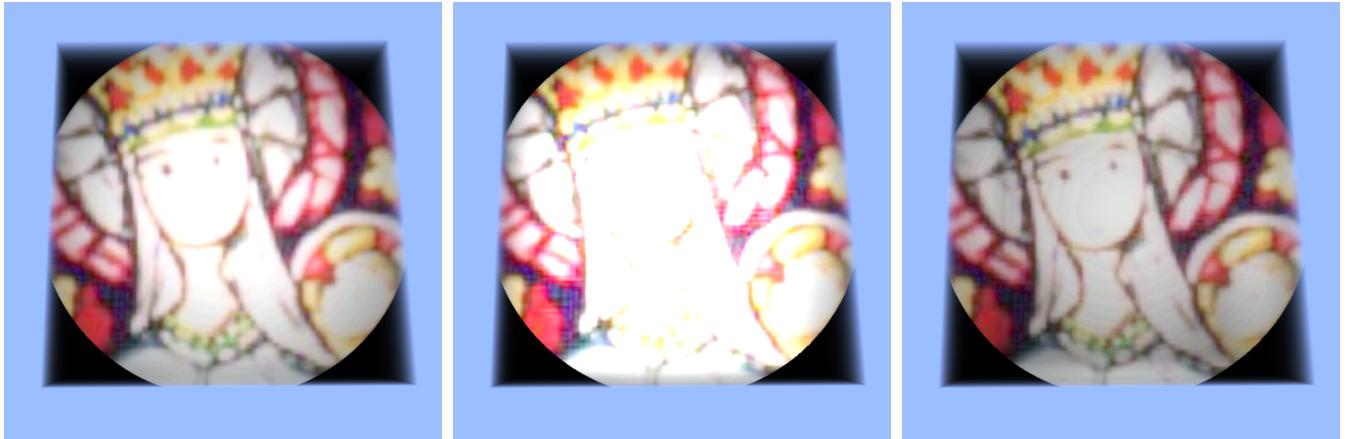


图5：由投影纹理照亮的均质立方体。参考图像(a)是通过每条视图光线1000个样本的双光线行进获得的，图像(b)是通过世界空间中10个样本的光线行进获得的，图像(c)是通过具有10个样本的阴影贴图空间中的光线行进。

函数映射相应纹素中的系数并重建每个样本点的透射率。然后将该透射率乘以光强度以获得折算的强度。

该方法提供了一种简单而准确的方法，使用DCT基础上的一小组投影系数来表示异质介质中的光衰减变化。然而，必须针对每个表示的波长计算和存储此类系数，因此需要大量的存储空间和带宽。此外，正如[Jansen和Bavoil 2010]中指出的，如果介质具有高密度，则以函数为基础表示透射率或不透明度会导致潜在的振铃伪影。下一节为这些问题提供了简单的解决方案，从而提高了我们方法的效率和通用性。

6 讨论

6.1 波长依赖性

如上一节所述，必须对每个表示的波长（即大多数情况下的RGB）投影和评估透射率函数。即使每个纹素仅使用4个系数，透射率函数贴图生成也会输出3个浮点RGBA纹理，这些纹理将在渲染过程中进行采样。我们建议通过将范围缩小到参与介质的子集来减少我们方法的内存占用，其中吸收和散射系数为：

$$\sigma_A(p) = D \text{ (页)} \quad \sigma_A \text{ 和 } \sigma_S(p) = D \text{ (页)} \quad \sigma_S \quad (11)$$

在哪里 D (页) 是标量介质密度，并且 σ_A, σ_S 在整个介质上是恒定的。基本上，所考虑的参与介质由具有不同密度的单一材料制成。这在云和烟雾渲染的背景下特别有用。在此背景下，我们将透射率函数重新表述如下：

$$\begin{aligned} \text{时间}(k_n) &= e^{-\int_{\text{介质}} \sigma_A(k) dk} \\ &= (e^{-\int_{\text{介质}} D(k) dk})^{\sigma_A} \end{aligned} \quad (12)$$

因此，我们不投影整个透射率函数，而是只投影上式中与波长无关的部分，即

$$\text{时间项目}(k_n) = e^{-\int_{\text{介质}} dp} \quad (13)$$

实际的、与波长相关的透射率可以是：

$$\text{时间}(k_n) = (\text{时间项目}(k_n))^{\sigma_A} \quad (14)$$

该技术的优点有两个：一方面，所需系数的数量减少，从而减少了存储空间和带宽。另一方面，一旦生成了透射率图，就可以即时修改与波长相关的散射和吸收系数，而不需要对透射率图进行任何更新。这方面的离线生产渲染的背景下特别重要：避免透射率图的重新生成使介质设计者能够获得有关散射属性变化的非常快速的反馈，从而加快设计工作流程。

6.2 高密度介质

基函数的使用提供了透射率函数的紧凑且平滑的表示。然而，正如[Jansen和Bavoil 2010]中也指出的那样，在光学厚参与介质中密度变化的情况下，此类方法往往会产生伪影。重建信号中的振荡会产生“剥离”效应，如图7所示。根据以下观察，我们引入密度加权来克服此问题：

- 伪影在光学薄介质中几乎看不见
- 透射率值保持在[0,1]
- 透射率函数是一个随距离连续递减的函数

基于这些观察，我们的目标是无损地平滑所表示的信号，以便伪像不太可能被看到。这相当于减少了所表示的透射率的变化量，即减少了信号导数的幅度。让我们考虑一个函数 $F(x)$ 满足与透射率函数相同的特性，并做出以下假设：

$$\frac{\partial F(x)^{\bar{\alpha}}}{\partial x} < \frac{\partial f(x)}{\partial x} \quad (15)$$

在哪里 $\alpha > 1$ 是任意标量值。为了验证这个假设——化，我们的目标是证明增加 α 结果减少 $\frac{\partial f(x)}{\partial x}$ 的导数 F 求幂后为： $\frac{\partial F(x)^{\bar{\alpha}}}{\partial x}$

$$\frac{\partial F(x)^{\bar{\alpha}}}{\partial x} = F^{\frac{1}{\alpha}}(x)^{-1 - \frac{1}{\alpha}} \cdot \frac{\partial f(x)}{\partial x} \quad (16)$$

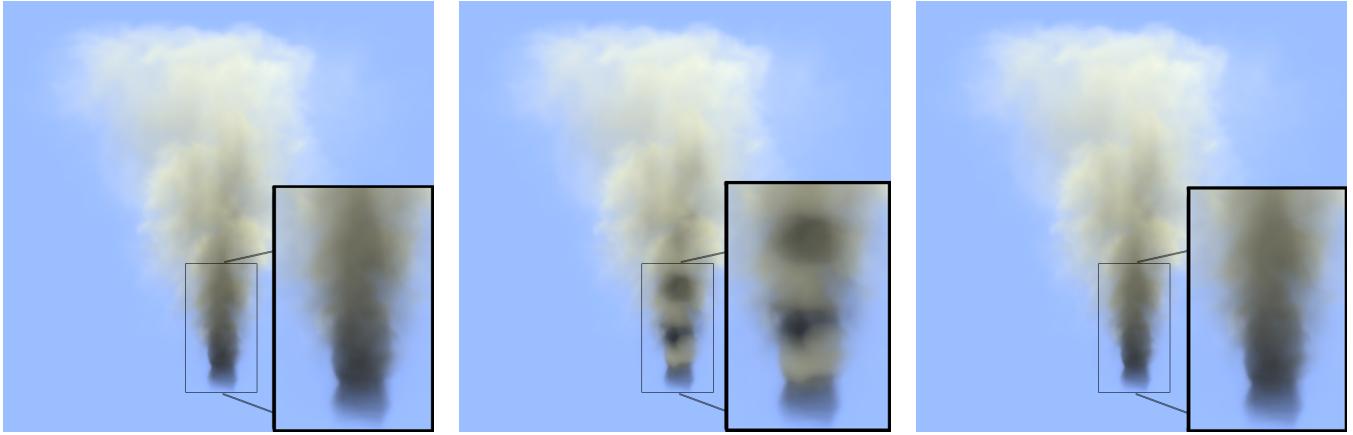


图7: 与参考溶液(a)相比, 密集介质中振铃伪影的明显性。

此衍生广告之间的关系 α 可以用它的导数来表示 α 。下面的 I 导数为负。

如果假设为真, 则

$$\frac{\partial_2 F(x)}{\partial \alpha \partial x} = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{F(x) \bar{a} \frac{\partial f}{\partial x} (\alpha + \ln(F(x)))}{F(x) \alpha^3} \right) \leq 0 \quad (17)$$

功能 $F(x)$ 积极地 a

$F(x) \bar{a} \geq 0$ 和 $\frac{\partial f}{\partial x} \leq 0 \forall x$ 。缺点

和 $F(x) \alpha \geq 0$ 。

因此, 为了验证假设 w

并减少, 我们不断推论, F

$(x) \frac{1}{\alpha} \frac{\partial f(x)}{\partial x} \leq 0$

e 必须有:

$$\alpha + \ln(F(x)) \geq 0 \forall x \Leftrightarrow \text{最大限度 } F(x) \geq e^{-\alpha} \quad (18)$$

在我们的背景下 $F(x)$ 是透射介质, e 函数。在光学厚的空间透射函数满足其大部分域, 使得指数中, 上面的方程具有高的强特别有用。相反, 从光学上看, 该因度 α 合作伙伴媒体将受益于的值较低 α 。基于这一事实, 我们通过重写 tr 将该用户插入到我们的计算中

定义密度加权 α 导纳函数为:

$$\text{时间}_w(k_n) = e^{\int_{\text{介质}}^n \sigma t \frac{D(s)}{\alpha} ds} \quad (19)$$

然后得到 d 属性的实际函数:

直接使用指数

$$\text{时间}(k_n) = (\text{时间}_w(k_n))^{\alpha} \quad (20)$$

如图 7(c) 所示, 即使在烟雾等低反照率介质的情况下, 该因素也使我们能够显着减少伪影。

7 个结果

前面几节中介绍的技术描述了用于快速渲染同质和异构参与媒体的全功能解决方案。本节说明了使用 Intel Xeon 3.6GHz 和 nVidia GeForce GTX480 GPU 使用 OpenGL 和 Pixar RenderMan 进行实时渲染所获得的一些结果。

用于生产质量渲染。

为了客观地将我们的图像与这些参考进行比较, 我们使用 SSIM (结构相似性) 按照 [Wang 等人定义的测量方法。2004]。SSIM 分数范围从 -1 到 1, 只有在比较两个相同图像时才能达到 1。

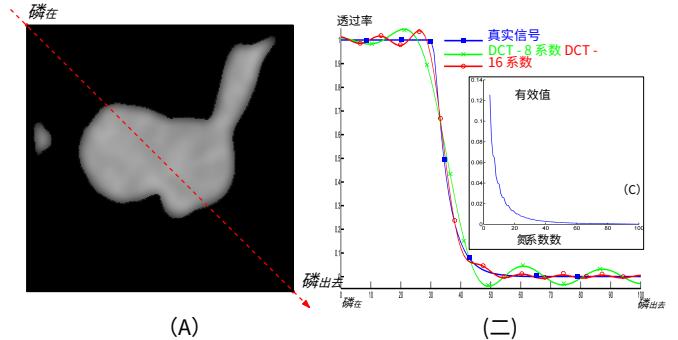


图8: 透射率函数被投影成一组系 n 沿着一条路径 介质 (a) 数, 当增加时误差迅速下降 (二)。请注 e 重建-意, 这表示数字 of 系数。

7.1 体积阴影贴图

平

我们的方法提供实时性能图像是在浪漫, 如图所示重新渲染的 1024₂阴影贴图和投影的解决方案 1280 × 720 使用纹理。ca 作为 RenderMan shad 实现的最终使用 2 实现渲染的每像素的目标纹理和阴影细。用于渲染 t 的 thm 已经节 i 步骤 相同算法 他在水下-电影《特种部队: 眼镜蛇的崛起》的第三座城市, ~3000 个光源: 我们的方法无缝支持任意数量的光源, 前提是对每条穿过的光线对光锥进行采样。在这种情况下, 根据几何形状和照明复杂性, 行进步骤的数量可以减少到 ~50, 因此允许场景设计者通过减少每个灯光的计算成本来插入额外的光源。

7.2 透射率函数映射

透射率函数映射方法提供了实时性能 128₃ 由密度值描述的体积数据 (图 1(b)), 以及更高清晰度体积上的交互性能 (图 1(a))。如随附视频所示, 渲染的体积可以任意动画, 因为我们的方法不需要任何预先计算。在本节的其余部分中, 我们将我们的方法与使用强力射线行进算法获得的参考图像进行比较, 以估计透射率函数



图9：体积阴影贴图 - 200 步 - 30 fps

烟——1283体素 - 图 10 (广告)					
	FPS	SSIM		峰值信噪比	
		数据仓库	不数据仓库	数据仓库	数据仓库
TSM 4 系数	15.10	99.73%	87.12%	54.52	17.64
TSM 8 系数	14.78	99.74%	95.49%	58.58	25.50
TSM 16 系数	12.18	99.74%	95.35%	60.02	25.60

兔子 -2563体素 - 图 10 (eh)					
	FPS	SSIM		峰值信噪比	
		数据仓库	不数据仓库	数据仓库	数据仓库
TSM 4 系数	14.41	98.68%	79.77%	35.61	16.74
TSM 8 系数	14.20	99.03%	82.57%	43.27	15.07
TSM 16 系数	13.98	99.05%	77.55%	46.19	14.30

表格1：参考图像与 TFM 技术之间的客观比较密度加权 (DW = 10) 使用 100 个样本/射线和 1024₂ 透过率函数图。

。请注意密切相关的办法，例如 [Jansen 和 Bavoil 2010; Lokovic 和 Veach 2000] 旨在代表不透明度介质的影响，并且通常忽略光散射的影响。由于使用这些方法获得的结果与我们的结果本质上不同，因此我们不会将它们与我们的方法进行比较。

7.2.1 系数个数

透射率函数的投影系数的数量对重建的质量有显著影响 (图 8)。系数数量不足会导致重建过于平滑，从而丢失体积中的高频细节。如表1所示，我们的透射率函数映射技术使用 SSIM 和 PSNR 测量在主观和客观方面提供了令人满意的结果。在我们的测试中，使用每个纹素至少包含 8 个系数的透射函数图生成的图像客观上与参考解决方案几乎没有区别。此外，虽然较少数量的系数产生客观上与地面真实情况不同的图像，但此类图像在视觉上仍然合理 (图 10(b,f))。康-

结合光线行进算法固有的可扩展性，这使得我们的算法可以通过调整行进步骤和系数数量在各种图形硬件上有效。此外，兔子体积具有急剧的密度变化以及密度恒定的大区域。尽管该体积可以被认为是我们技术的病理情况，但图 10 和表 1 显示与参考图像的差异仍然非常小。

8 结论

复杂参与媒体的交互模拟是一个复杂的问题，没有简单的解决方案。我们提出了一种使用体积阴影映射和衰减函数图在同质和异质介质中进行单次散射的全功能方法。基于投影纹理和透射率数据的傅里叶表示，我们的方法不依赖于对介质或照明和观看条件的任何假设。由于本文描述了单散射模拟问题的可扩展方法，因此所引入的解决方案可用于实时和生产渲染，使其适用于广泛的应用，例如视频游戏、资产预览或最终后期制作渲染。未来的工作将特别考虑基于透射率函数图扩展到傅立叶空间中的多个散射事件的模拟。此外，我们希望将透射率函数图的概念扩展到基于图像的照明，以增强真实感。



图11：云 600×200×400 - 7 帧/秒

参考

C埃雷佐、E、P埃雷兹、F、PUEYO, X., S埃隆, F。, 和S亿利安, F. 2005。有关参与媒体渲染技术的调查。视觉计算机 21, 5, 303–328。

C汉德拉斯卡, S. 1950。辐射传输。克拉伦登出版社, 牛津。

D伊拉兰德、C、G奥创, P., M阿尔维, J.-E., 和 F兰索瓦, G. 异质参与介质中的单次散射。在 ACM SIGGRAPH 2010 演讲, SIGGRAPH '10。

G奥创, P., M阿尔维, J.-E., 和F兰索瓦, G.2009。卷- 公制阴影贴图。在 SIGGRAPH 2009 演讲。

H棱, MJ 2005。实时云模拟和渲染。在 SIGGRAPH 2005 课程。

J安森, J., 和乙埃沃伊尔, L. 2010。傅立叶不透明度映射。在 交互式3D图形与游戏研讨会论文集, 165–172。

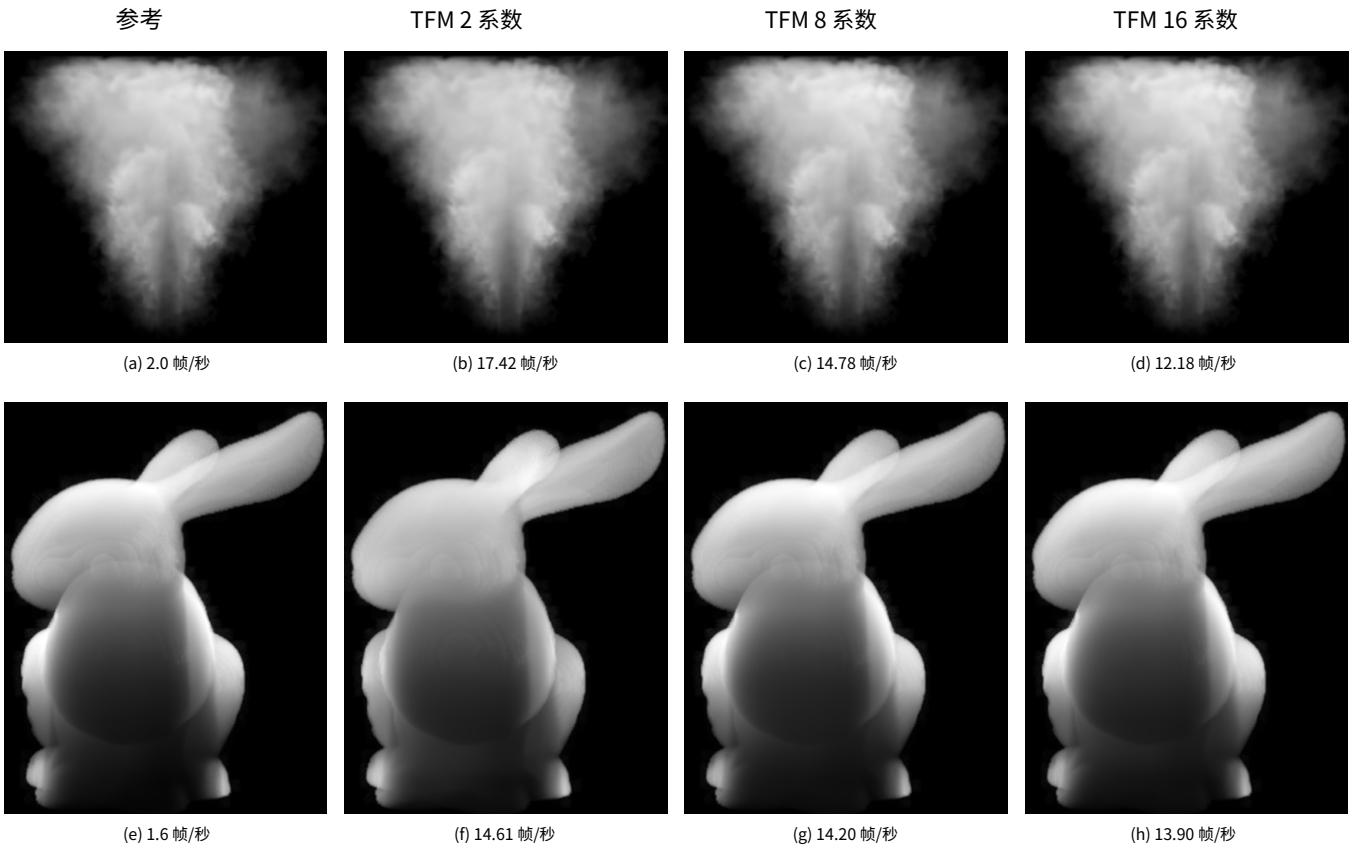


图10：使用 100 步/视图光线和 100 降低强度步/采样点的双光线行进算法与使用 100 步/视图光线和 1024 的算法之间的质量评估 $\times 1024$ 透过率函数图具有 2、8 和 16 个 DCT 系数。

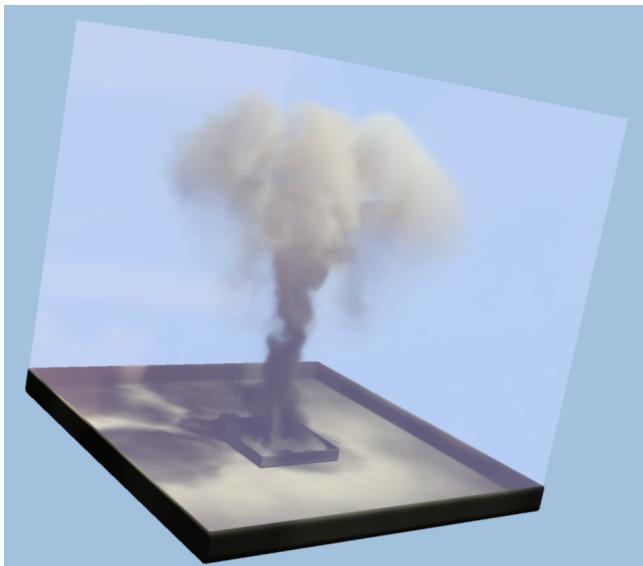


图 12：动态烟雾 $600 \times 200 \times 400 - 25$ 帧/秒

K我是, T.-Y., 和氮欧曼, U. 2001。不透明阴影贴图。在欧洲图形渲染研讨会论文集, 177–182。

K国家情报研究所, J.P雷莫兹, S., H安森, CS赫利, P., 和中号C磷她儿子, A. 2003。体积照明和建模模型。IEEE 可视化和计算机图形学汇刊 9, 2, 150–162。

L奥科维奇, T., 和V每个, E. 2000。深度阴影贴图。在 SIGGRAPH 会议录, 385–392。

磷埃戈拉罗, 五, 和磷阿尔克, S. 2009。解析解均匀参与介质中的单次散射。欧洲图形学论文集 28, 2, 329–335。

S联合国, B., R阿玛莫蒂, R., N阿拉西姆汉, SG, 和氮A-亚尔, SK 2005。用于实时渲染的实用分析单散射模型。SIGGRAPH 24 会议记录, 3, 1040–1049。

瓦胃酸、Z. B奥维克, 交流, S海克赫, 人力资源, 和S伊蒙赛利, EP 2004。图像质量评估：从错误可见性到结构相似性。IEEE 图像处理汇刊 13, 4, 600–612。

瓦伊利亚斯, L. 1978。在曲面上投射弯曲阴影。SIGGRAPH 12 论文集, 3, 270–274。

瓦伊曼, C., 和右安西, S. 2008。交互式体积阴影-单散射参与介质中的流动。IEEE 交互式光线追踪研讨会论文集, 87–92。

Z侯, K., RCN, Z., L在, S., BAO, H., G俄勒冈州, B., 和S哼, H.-Y. 2008。使用补偿光线行进进行实时烟雾渲染。在 SIGGRAPH 会议录, 1–12。