

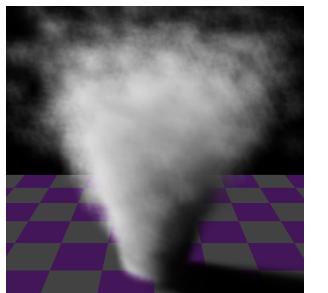
出现在 I3D 2010 会议记录中

傅立叶不透明度映射

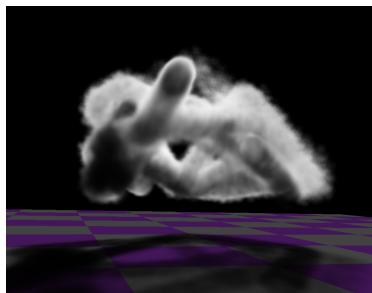
乔恩·詹森

路易斯·巴沃伊

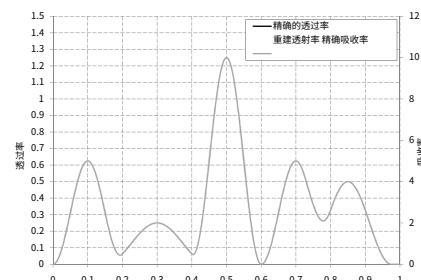
英伟达公司



(A)



(二)



(C)

图1：(a) 使用傅立叶不透明度贴图 (FOM) 渲染的烟羽。(b) 使用 FOM 渲染的具有复杂结构的粒子系统。(c) 使用具有 15 个系数的 FOM 重建透射率。请注意，尽管在整个 z 范围内存在多个吸收特征，但精确的透射率和重建的透射率几乎完全一致。

抽象的

虽然用于加速体积阴影渲染的深度阴影贴图算法是离线应用程序的合适解决方案，但它会消耗无限量的内存，并且很难很好地映射到当前的图形硬件。对于这些

为交互式应用程序提出替代方法的原因

基于信息的关于这个想法累加值 ng 不透明度 米体积公式的模仿基于 pth 的 BU C 凯特或切片。然而，t Hese 切片-Based 方法可以介绍一下令人反对的 e 且不稳定 片状阿事实由于欠采样 部分 g H 范围，以及经常很多斯里 s 需要 埃德到奥弗科 米这些阿特法 cts。进一步研究 e 罚款哈一直支持 哦 ed 到地址 S 这个，但是他们 约束 概论的算法 米，例如 通过命令 假设 上的大学佛 m 不透明度 或 通过删除 s 公关支持 e 过滤。我们介绍 A 新颖的算法 我叫美 r 层不透明度 中应用 (FO 中号) 和我们 嘴既然它是一个 好的选择 F 或渲染 无伪影 p 重新过滤沃 Lumetric Sha d 案件数量 斯帕蒂亚在哪里 l 不透明度变化 离子是 SM 平滑 (例如 s 米奥克、煤气和 低不透明度 h 空气)。我们也 展示如何 th 算法 c An 是将军 S 编辑至其他 or 托法巴 会话。

K 关键词：v 哟 度学、沙 道琼斯指数，不透明 y 映射，s 米 好吧，雾，帕文章、头发

1 简介 C的

©ACM 2009. 这是自动 H 我者的版本 工作。这是 发布在这里 经过的许可 ACM 为 y 我们个人的你 东南。不适合重新 d 分配。 钉最终版本 sion 是 pr ary e 在 I3D 发送 2010 会的 p 梨在 交 涵 数字图书馆 (<http://doi.ac.m.org>)。

体积阴影（或透射率）定义为沿着体积点和光源之间追踪的光线到达体积中的一点的光量，假设光源是点光源。与任何阴影一样，可以通过对区域光上多个点样本的阴影进行平均来渲染区域光的柔阴影。忽略散射，即

假设光在半透明体积内沿着

李直 nes. 每个特拉 n 透明初级 主动认为这样的 一道光线 你好 沿着它的 path 减弱 当前李 正确的能见度 2y 反式 米 t- 坦克 _{时间量级} Fp 基元我 (w 这里时间=1 - 不透明度)。

与任何基于阴影贴图的算法一样，我们对

翻译 你原始的 该卷的 es 俄来自 e 六点 ew 光的 t。每个像素 埃尔从这个 查看通讯录 哟 ds 到 lig H T 雷存在 追踪自 t H 易光中心 r 虽然 v 奥卢梅。温里 克 影子米 与 o 一起使用 帕克奥克卢德 呢，我们有 多次启动 我 主动控制 伊布丁阴影 沿着 gi 文光线。 深影 w 地图 [洛 k 奥维奇和维 A 第2000章] 是一个 现状- A 实时算法 在 用于渲染体积阴影的离线渲染。这个算法 捕获一个 我原始的 es 使用 lin 每个 pi 的 ked 列表 仲裁 xel 里 尺寸。这米问题 wi 这个算法 hm 代表实时 米电子渲染 是 云布 n 预定金额 哟 记忆 tha t 是必需的 f 哟 捕获 t 他 原语， 以及公关 e 过滤 d 深影 米美联社

对于实时米渲染， 近似 深煞 ns 陶氏地图哈 维 一直支持 哟 ed [金安 d 诺依曼 2 001; 克尼斯等人 A 湖 2003 年; 尤克斯 埃尔 和凯斯 2008 年; 辛托尔 n 和阿萨斯 2008 年; 圣特 奥恩和阿萨尔 s- 儿子 2009]。这些算法 thms 是 bas ed 关于这个想法 离散化 吴 传输 迭代函数 哟 沿光 使用 p 的射线 重新定义部门 th 桶。 时间有一个网络 X 编辑记忆 Cost 和 can r 实时联合国 e. 然而， 事实是 他们离散化 e 传输 接触函数 在 深入 桶原因 e 间断 关系中的关系 n 德雷德沙多 WS 沿着 z 轴 阴影贴图 F 鲁斯图姆。这 挑战无线 th 这个近似 Ach 是如何 l 模仿下 米普林人工制品 当德 n- 部门所在地 每第 th 个桶 光线为 n 哟 足够大 h 捕获 t 他 复杂性 y 体积的 米 e.

灵感 b y 卷积 马影 ps (CSM) [安 嫩 等人 200 7; 安南 等人 湖 2008]，我们的 A 算法重构 规定了 a 吸收乐趣 C- 的 $\sigma(z)$ A 傅立叶变换 e 里斯。福伦 德令沙多 w 来自 opaq 的 s 对象， CSM 需要许多系数来表示 锐利 st EP

照亮和遮挡之间的功能。对于体积阴影，我们想要评估的透射率函数通常要平滑得多，尤其是在渲染雾和烟等媒体时。因此，需要更少的傅里叶系数来忠实地表示具有截断傅里叶级数的典型透射率函数。

对于给定的光线，可以通过使用加法混合在单次光栅化过程中精确计算傅立叶系数（具有浮点精度）。我们存储第一个 n 将系数转化为阴影贴图，称为傅立叶不透明度贴图。而不是通过投影来离散化 $\sigma(z)$ 函数到深度的细分上，我们通过将其投影到傅里叶级数的余弦和正弦函数上来离散化。使用截断傅里叶级数的主要优点是它在平移下更稳定并且对深度范围的变化不太敏感。另一个优点是截断的傅立叶级数始终是平滑的（实际上是无限可微的），而基于切片的重建具有斜率不连续性，这些斜率不连续性转化为阴影中的可见不连续性。与卷积阴影贴图算法一样，我们的方法还具有允许通过预过滤傅立叶系数来渲染软阴影的优点。

2 相关工作

深度阴影贴图算法 [Lokovic 和 Veach 2000] 沿着使用光栅化生成的网格对齐光线预先计算光可见度函数。首先，从光源的角度来看，所有阴影投射图元（不透明和半透明）都被光栅化为深度阴影贴图。每个像素包含覆盖该像素的所有光栅化片段的链接列表，按相对于光的深度顺序排序。其次，对深度阴影图进行预处理。对于深度阴影图中的每个片段，透射率 $\text{时间}(r, d)$ 计算并构建分段线性函数，该函数对 $(z_{\text{左}}, z_{\text{右}})$ 控制点。然后精确地预过滤每个像素的分段线性函数，这扩大了控制点的数量。最后，减少每个预过滤多项式的控制点数量（压缩步骤）以使算法更加实用。预过滤对于避免混叠非常重要（特别是对于带有 $\geq 50\%$ 不透明度）和假次表面散射。[哈德维格等人。2006] 在 GPU 上生成并渲染深度阴影贴图以进行体积渲染。

不透明度阴影贴图 [Kim 和 Neumann 2001] 是深度阴影贴图的近似值，其中每个像素的可见性函数的深度值在规则网格上对齐。与深度阴影贴图不同，它们可以使用多个渲染目标 [Nguyen 和 Donnelly 2005] 并在深度桶中渲染 [Sintorn 和 Assarsson 2008] 在 GPU 上高效生成。不透明度阴影贴图相当于对阴影平截头体进行体素化并为每个体素保留一个密度值。唯一的区别是密度值是沿着光线预先累积的。因此，不透明阴影贴图支持预过滤。模糊 X、Y 和 Z 方向上的不透明度阴影贴图可柔化阴影并消除分层伪影。然而，必须沿 Z 方向使用大量切片，以避免分层伪影（或在 Z 方向过滤时丢失细节）。深度不透明贴图 [Yuksel 和 Keyser 2008] 是不透明阴影贴图的一种变体，其中深度切片不是在规则网格上对齐，而是相对于最近的深度层对齐。根据距离光线最近的层移动深度切片可以消除大多数分层伪影。占用贴图 [Sintorn 和 Assarsson 2009] 对每个阴影贴图图像素的最近和最远基元之间的头发密度进行体素化。由于深度切片未在网格上对齐，因此预过滤深度不透明图和占用图不会产生软阴影。深度不透明贴图 [Yuksel 和 Keyser 2008] 是不透明阴影贴图的一种变体，其中深度切片不是在规则网格上对齐，而是相对于最近的深度层对齐。根据距离光线最近的层移动深度切片可以消除大多数分层伪影。占用贴图 [Sintorn 和 Assarsson 2009] 对每个阴影贴图图像素的最近和最远基元之间的头发密度进行体素化。由于深度切片未在网格上对齐，因此预过滤深度不透明图和占用图不会产生软阴影。占用贴图 [Sintorn 和 Assarsson 2009] 对每个阴影贴图图像素的最近和最远基元之间的头发密度进行体素化。由于深度切片未在网格上对齐，因此预过滤深度不透明图和占用图不会产生软阴影。占用贴图 [Sintorn 和 Assarsson 2009] 对每个阴影贴图图像素的最近和最远基元之间的头发密度进行体素化。由于深度切片未在网格上对齐，因此预过滤深度不透明图和占用图不会产生软阴影。

渲染体积阴影的另一种方法是使用半角切片进行体积渲染 [Kniss 等人。2003年][绿色2009年]。

这种方法的优点是比深度不透明贴图方法使用更少的内存，但价格昂贵，因为它需要多个几何体通道和渲染目标切换。

3 我们的算法

3.1 连续配制

我们考虑来自点光源的光线穿过半透明介质的旅程。我们假设通常的“阴影空间”投影已经建立，并且我们可以通过它的 (x, y) 阴影空间中的位置，进一步，射线上的点由 z 值范围 $[0, 1]$ （其中 0 表示距光源最近的点，1 表示最远的点）。

我们的目标是确定给定深度的透射率， d ，在给定的射线上，河透射率定义为直接到达给定点的光与沿光线进入半透明介质的光的比率：

$$\text{时间}(r, d) = \frac{\text{我}(r, d)}{\text{我}(r)}$$

与其他方法一样，我们忽略散射效应：我们只考虑从光源沿着直线路径直接到达的光。为了简洁和清晰的目的，我们将省略 r 从我们现在开始的讨论来看，但请记住，在所有情况下，“对于给定的光线，”隐含的是：

$$\text{时间}(d) = \frac{\text{我}(d)}{\text{我}}$$

对于具有恒定吸收的足够半透明的介质，可以使用比尔定律作为近似值 $\text{时间}(z)$ ：

$$\text{时间}(d) = \text{指数}(-\sigma d)$$

我们通过替换将其推广到可变吸收情况 σd 吸收函数沿路径积分的项
射线的：

$$\text{时间}(d) = \text{经验值} - \int_0^d \sigma(z) dz$$

我们现在观察到吸收函数 $\sigma(z)$ 可以方便地表示为傅立叶级数。回想一下，傅里叶展开的正则投影和重构如下：

$$A_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F(t) \cos(kt) dt$$

$$Z_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F(t) \sin(kt) dt$$

$$F(t) \approx \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(kt) + \sum_{k=1}^{\infty} Z_k \sin(kt)$$

正如我们正在努力的那样 z 在范围中 $[0, 1]$ ，我们应用替换 $t = \pi(1 - 2z)$ ，给出：

$$A_k = \int_0^1 \sigma(z) \cos(2\pi kz - k\pi) dz$$

$$Z_k = \int_0^1 \sigma(z) \sin(2\pi kz - k\pi) dz$$

$$\sigma(z) \approx \frac{A_0 +}{2} \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(2\pi kz - k\pi) + \sum_{k=1}^{\infty} Z_k \sin(2\pi kz - k\pi)$$

我们观察到余弦 $(\theta - k\pi) = (-1)^k$ 余弦 (θ) 和罪 $(\theta - k\pi) = (-1)^k$ 罪 (θ) ，所以设置 $A' = (-1)^k A_k$ 和 $Z' = (-1)^k Z_k$ ，我们得到以下方便的表述：

$$Ak = 2 \int_0^1 \sigma(z) \cos(2\pi kz) dz \quad (1)$$

$$Zk = 2 \int_0^1 \sigma(z) \sin(2\pi kz) dz \quad (2)$$

$$\sigma(z) \approx \frac{A'}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} Ak \cos(2\pi kz) + \sum_{k=1}^{\infty} Zk \sin(2\pi kz)$$

我们现在可以导出 $\sigma(z)$ ：

$$\begin{aligned} \int_0^d \sigma(z) dz &\approx \int_0^d \left(\frac{A'}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{Ak}{2\pi k} \sin(2\pi kd) \right) dz \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{Zk}{2\pi k} (1 - \cos(2\pi kd)) \end{aligned} \quad (3)$$

该公式的一个重要特性是它可以在 z 范围的极限内提供正确的结果：

$$\begin{aligned} \text{时间}(0) &= 1 \\ \text{时间}(1) &= \text{指数} - \int_0^1 \sigma(z) dz \end{aligned}$$

3.2 离散化

在现实世界的渲染应用程序中，我们很少遇到 $\sigma(z)$ 以一种允许我们轻松计算的形式 A' 和 Z' 使用分析方法。相反，更常见的是半透明介质由大量半透明基元表示，并且介质的吸收属性由基元的可变不透明度暗示。

一个有用的起点是考虑具有不透明度的单个基元的操作 α 在深度 d 。该单一原始情况的透射率函数由下式给出：

$$\text{时间}(d) = \begin{cases} 1 & \text{如果 } d < d \\ 1 - \alpha & \text{如果 } d \geq d \end{cases}$$

我们可以使用狄拉克 delta 函数根据广义比尔定律重新表述这一点：

$$\text{时间}(d) = \text{经验值} \left(\int_0^d \delta(z - d) dz \right)$$

这自然会导致以下对多个基元的操作的进一步概括：

$$\begin{aligned} \text{时间}(d) &= \text{经验值} \left(\int_0^d \sum_{\text{我}} \ln(1 - \alpha) \delta(z - d) dz \right) \\ \sigma(z) &= - \sum_{\text{我}} \ln(1 - \alpha) \delta(z - d) \end{aligned} \quad (4)$$

将(4)代入方程(1)和(2)，并利用狄拉克 δ 的以下性质：

$$\int_{-\infty}^{\text{无穷大}} F(x) \delta(x - c) dx = F(c)$$

我们获得：

$$Ak = -2 \sum_{\text{我}} \ln(1 - \alpha) \cos(2\pi kd) \quad (5)$$

$$Zk = -2 \sum_{\text{我}} \ln(1 - \alpha) \sin(2\pi kd) \quad (6)$$

4 GPU 实现

我们的实施仅包含两个步骤：

1. 使用 equal- 将图元渲染为一个或多个纹理系统蒸发散 (5) 和 (6) 来生成系数 A' 和 Z' (即“傅立叶不透明度图”)
2. 使用公式 (3) 将图元渲染到屏幕缓冲区根据系数计算透射率 A 和 $Z(r)$ 。从生成的纹理中读取系数在步骤 1 中。

4.1 生成傅立叶不透明度图

此步骤不需要特殊排序，因为所有基元都有助于系数的计算。因此，该实现可以与基元的任意顺序一起使用，包括已经出于某些其他目的（例如深度排序）而排序的集合。

我们使用一个或多个渲染目标，具体取决于傅里叶级数中使用的系数数量。在我们自己的实验中，我们发现 7 个系数效果很好（即 A' 直流项 + 3 谐波），因此我们使用了两个 4x16F 的渲染目标。

所有渲染目标都清除为零。然后，在所有通道上启用加法混合并禁用深度测试后，我们从光源的角度渲染所有图元。对于每个基元，我们的像素着色器计算以下系数贡献，这些系数贡献通过加法混合汇总到渲染目标中：

$$\delta a_{\text{我知道}} = -2 \ln(1 - \alpha) \cos(2\pi kd)$$

$$\delta z_{\text{我知道}} = -2 \ln(1 - \alpha) \sin(2\pi kd)$$

请注意，不是计算每个罪() 或者余弦() 从头开始，我们使用以下递推关系来计算高次谐波：

$$\text{罪}((n+1)\theta) = \text{罪}(\theta) \cos(\theta) + \text{余弦}(\theta) \sin(\theta)$$

$$\text{余弦}((n+1)\theta) = \text{余弦}(\theta) \cos(\theta) - \text{罪}(\theta) \sin(\theta)$$

图 2 显示了在渲染图 1(a) 中的图像期间生成的系数图。

4.2 渲染图元

然后，我们以正常方式渲染基元，对半透明对象进行通常的从后到前排序，并使用通常的 alpha 混合设置。我们计算纹理坐标以读取系数的方式与计算阴影贴图坐标的方式相同[Williams 1978]。然后，我们应用方程 (3) 来生成阴影项，再次使用递归关系来跳过一些罪() 和余弦() 计算。

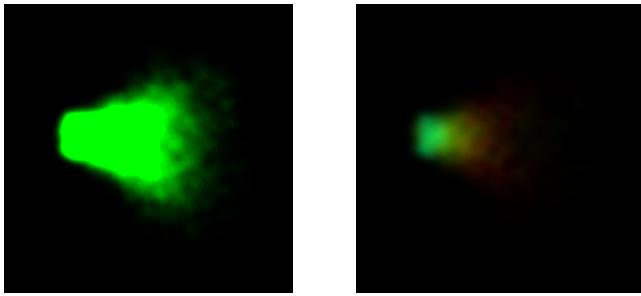


图2：傅立叶不透明度映射系数图，其中7个系数打包到两个 $4 \times 16F$ 纹理中 $[R, G, B, A] \leftrightarrow [X, A_0, A_1, b_1]$ 和 $[R, G, B, A] \leftrightarrow [A_2, b_2, A_3, b_3]$ 。

5 推广到任何正交基

我们对傅立叶基投影进行的分析可以推广到适用于任何正交基 $F_k(z)$ 。可以在像素着色器中以相同的方式计算基础系数贡献：

$$\delta a_{\text{我知道}} = -\sigma(1-a_{\text{我}}) F_k(d_{\text{我}})$$

我们的透射率近似采用以下广义形式：

$$\text{时间}(d) \approx \text{经验值} - \left(\sum A_k G_k(d) \right)$$

在哪里：

$$G_k(d) = \int_0^d F_k(z) dz$$

请注意，在选择基函数时，我们需要能够计算 $F_k(z)$ 和 $G_k(d)$ 在我们的着色器中有效。在实践中，这意味着我们要选择基函数，其中 $F_k(z)$ 和 $G_k(d)$ 具有可以轻松构建的分析形式

常用的着色器数学原语（即乘法、加法、 \sin/\cos 、幂、对数、条件等）。

重新引入隐含射线 r 一会儿，我们观察到系数 A_k (右)形成一个映射，所以我们将这个广义映射称为“系数映射”。

5.1 分段常数基础上的投影

作为我们概括的一个例子，基于切片的不透明度图 [Kim and Neumann 2001] 可以使用以下分段常数基函数重新表示为正交基技术：

$$F_k(z) = \sqrt{\frac{k}{n}} \left[H(z - \frac{k}{n}) - H(z - \frac{k+1}{n}) \right]$$

在哪里 $k=0, 1, \dots, (n-1)$ 。积分的解析形式 $F_k(z)$ 重建期间使用的参数由下式给出：

$$G_k(d) = \sqrt{\frac{k}{n}} \left(d - \frac{k}{n} \right) H(d - \frac{k}{n}) - \sqrt{\frac{k+1}{n}} \left(d - \frac{k+1}{n} \right) H(d - \frac{k+1}{n})$$

在实践中，移动以下简化公式之一是很方便的 $\sqrt{\frac{k}{n}}$ 条款和使用的：

$$F_k(z) = H(z - \frac{k}{n}) - H(z - \frac{k+1}{n})$$

$$G_k(d) = n \left(d - \frac{k}{n} \right) H(d - \frac{k}{n}) - \left(d - \frac{k+1}{n} \right) H(d - \frac{k+1}{n})$$

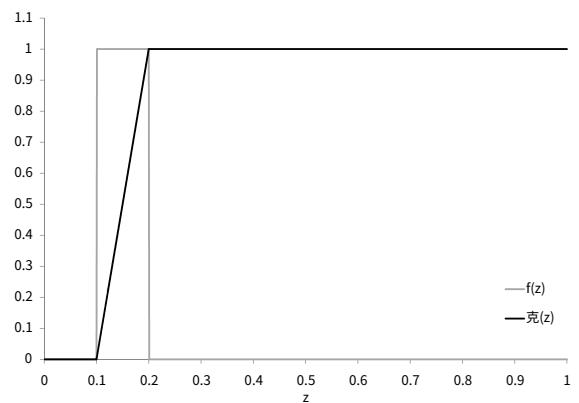


图3：分段常数基， $n=10$ ， $k=1-F(z)$ 是我们在渲染系数图时使用的基函数， $G(z)$ 是我们在重建过程中使用的积分。

6 预过滤的物理解释

了解预滤波系数图的物理含义很有用。假设此类运算采用卷积的形式，则足以考虑两个不同射线之间的线性组合的更简单情况：

$$A_k = (1-\lambda) A_k(r_0) + \lambda A_k(r_1)$$

回顾一下：

$$A_k(r) = \int_0^1 \sigma(r, z) F_k(z) dz$$

我们获得：

$$A_k = \int_0^1 [(1-\lambda) \sigma(r_0, z) + \lambda \sigma(r_1, z)] F_k(z) dz$$

即过滤系数相当于过滤吸收函数：

$$\sigma'(z) = (1-\lambda) \sigma(r_0, z) + \lambda \sigma(r_1, z)$$

回想一下吸收函数代表局部密度，因此我们可以得出结论，应用于系数图的任何卷积滤波器的作用就好像该滤波器应用于参与介质的密度一样。我们注意到，相同的物理解释也适用于不透明阴影贴图的过滤 [Kim 和 Neumann 2001]。

7 傅里叶不透明度映射的讨论

7.1 翻译稳定性

基于切片的方法通过划分 ras- 来离散深度值

将基元分解为深度桶。对于半透明图元正在移动且深度桶也可能移动的动态场景，这种离散映射会导致切片形状的混叠伪影（参见图 5）。相比之下，傅立叶不透明度映射使用连续深度映射，并用离散化伪影来损失高频细节和一定量的振铃。当吸收函数相对平滑时，傅立叶不透明度映射能够确保吸收函数中主要特征的总体形状和 z 位置一致地重建（见图 1(c)），即使在平移下也是如此（见图 6）以及（在一定程度上） z 的缩放。

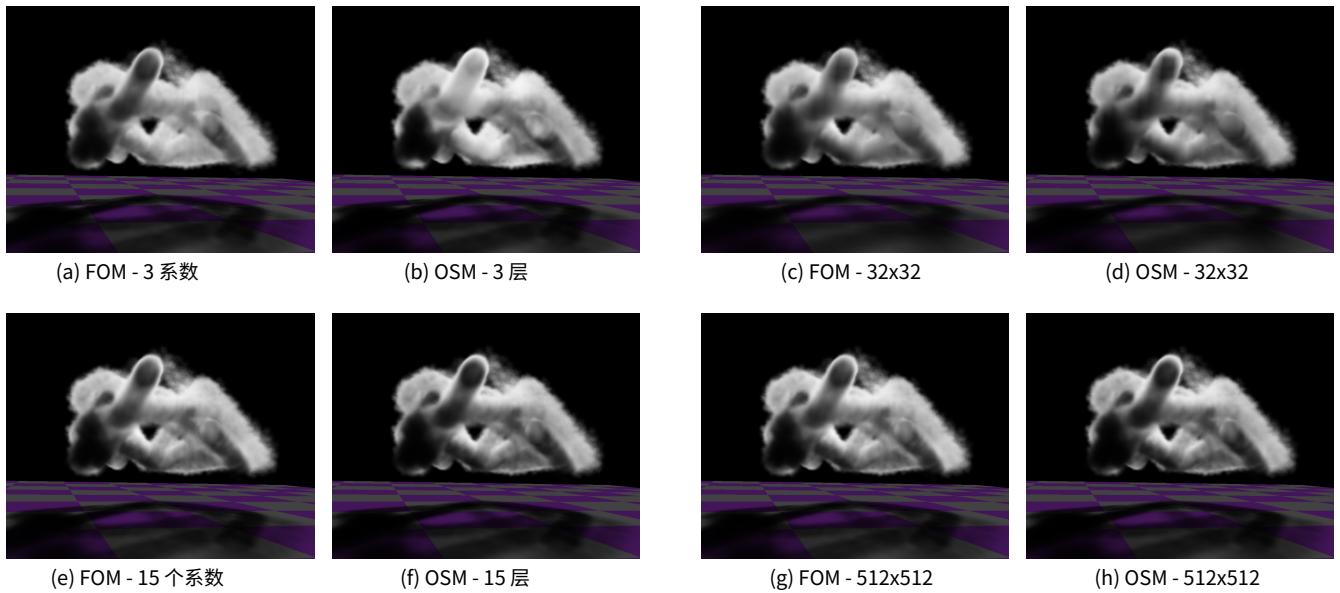


图4：对于傅立叶不透明度贴图(FOM)和不透明度阴影贴图(OSM)，改变不透明度贴图的系数数量和分辨率的效果。图a、b、e和f使用512x512不透明度贴图。图c、d、g和h每个纹素使用15个系数。

7.2 异常值

依赖于初始通道来缩小z范围的技术，例如Deep Opacity Maps [Yuksel 和 Keyser 2008]，可能难以正确处理离群值（在这种情况下，离群值是与主组分开的基本元）。此类异常值对z范围的影响与其对透射率函数的实际影响不成比例。

傅里叶不透明度映射可以很好地处理异常值，因为它仅通过原始密度和不透明度来衡量异常值对透射率函数的贡献（见图7）。

7.3 振铃

当傅立叶不透明度映射应用于具有高不透明度的薄或高频特征时，振铃可能会变得更加成问题。我们凭经验发现，对于给定数量的系数，振铃的存在或不存在是由临界特征尺寸决定的。如果出现振铃，则振铃的强度由特征的整体不透明度决定（参见图8）。

出于这些原因，我们将傅立叶不透明度映射描述为最适用于具有低不透明度和大特征尺寸的交互式应用程序，例如烟雾、蒸汽或雾气以及低不透明度头发的云（见图9）。在需要更小特征尺寸的非交互式应用中，可以通过使用更多系数来减少振铃的发生。

我们知道实际的透射率永远不应该超过1，我们还可以将重建的透射率限制在范围[0,1]在像素/片段着色器中，以消除一些可能因振铃而发生的过度增亮伪像（我们注意到，相同的解决方案用于控制卷积阴影贴图中的振铃[Annen et al. 2007]；Annen 等人，2008年）。这反过来又允许我们在某些情况下容忍更大量的振铃，从而节省额外系数的计算费用。

7.4 不透明阴影

我们已经看到，将傅里叶不透明度映射应用于薄的高不透明度特征可能会导致振铃，这似乎会妨碍傅里叶不透明度映射直接处理不透明阴影。然而，不透明阴影可以很容易地通过传统的不透明阴影映射技术[Williams 1978]单独处理，并通过调制组合产生的阴影项：

$$\text{时间}(r, d) = \text{时间不透明}(r, d) \cdot \text{时间FOM}(r, d)$$

8 性能

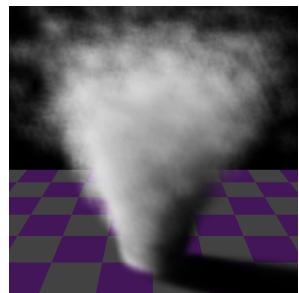
我们通过在 GeForce GTX 260 上以两种不同的屏幕分辨率和三种不同的系数图分辨率渲染图1(a)中所示的16K粒子羽流来测试性能。我们将傅立叶不透明度映射与基于统一切片的方法进行了比较 [Nguyen 和 Donnelly 2005]（见图4）。

系数图分辨率	1024x1024	512x512	256x256
FOM Coeff 渲染 (毫秒)	15.5	4.3	1.7
FOM 场景渲染 (毫秒)	14.0	12.3	11.7
OSM 系数渲染 (毫秒)	10.1	3.0	1.5
OSM 场景渲染 (毫秒)	13.3	12.2	11.7

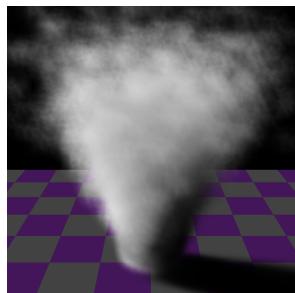
表格1：具有7个系数的1680x1050傅立叶不透明度贴图(FOM)和具有7个系数的不透明度阴影贴图(OSM)。

系数图分辨率	1024x1024	512x512	256x256
FOM Coeff 渲染 (毫秒)	15.9	4.2	1.6
FOM 场景渲染 (毫秒)	10.1	7.4	7.3
OSM 系数渲染 (毫秒)	11.1	2.8	1.5
OSM 场景渲染 (毫秒)	9.9	7.3	7.3

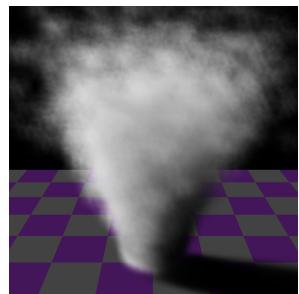
表格2：具有7个系数的1280x800傅立叶不透明度贴图(FOM)和具有7个系数的不透明度阴影贴图(OSM)。



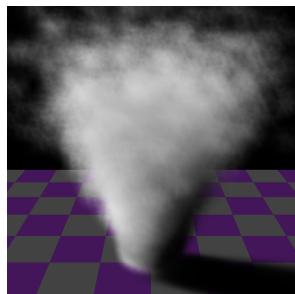
(a) FOM - 基线



(b) OSM - 基线



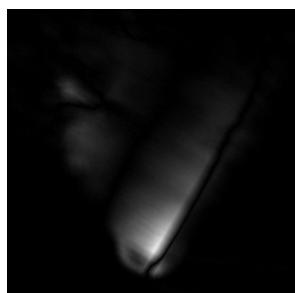
(c) FOM - 深度界限扩大 10%



(d) OSM - 深度界限扩大 10%



(e) FOM - 不同 [5(a)-5(c)]



(f) OSM - 差异 [5(b) - 5(d)]

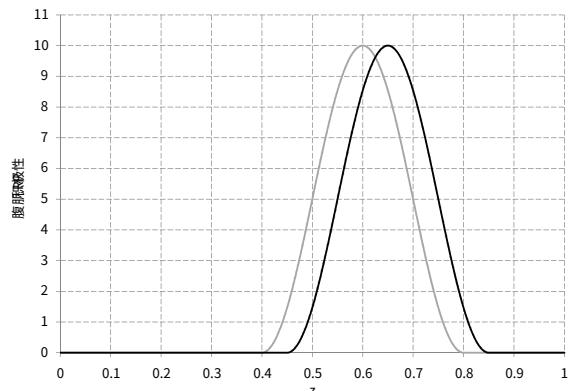


(g) FOM - 关于相对差异 [5(e)/5(a)]

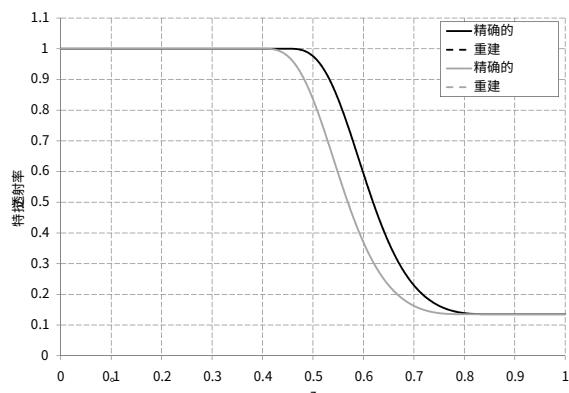


(h) OSM - 相对差异 [5(f)/5(b)]

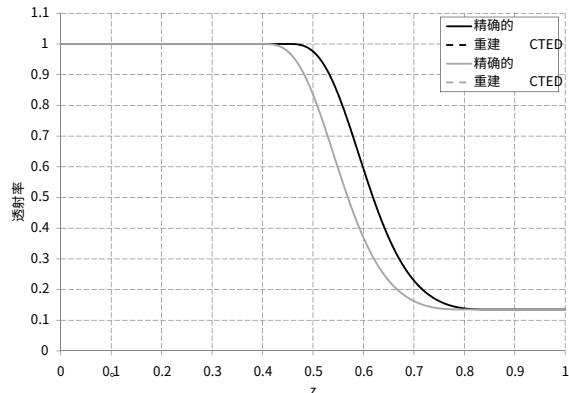
F图5: 埃菲 深度 ct_{bo} 迪斯康蒂 n 烟效 e 羽
s哈多渲染 ng (7系数 在所有情况下都是 nts)，对于傅里叶 r 奥帕克-
映射 (F 氧) 和 $Opac$ 实体暗影 (M) 和 Ops (OSM)。



(a) 在粒子系统模拟烟雾或蒸汽羽流过程中可能遇到的代表性吸收函数，以及同一吸收函数的代表性翻译。



(b) 比较 s精确与重建 t 从吸收 离子函数 i n 6(a), 其中 r e施工 w 由 pr 组成 喷射到 ap 上 逐次 - 康斯塔 nt 基础。



(c) 比较 s精确与重建 t 从吸收 离子函数 i n 6(a), 其中 r e施工 w 由 pr 组成 喷射到 F 上 欧里埃系列。

F图6: 钨 米圣型坯 能力下 翻译。 注意如何
t傅里叶巴 sis重建 准确离子 保留了 地点
At 的形状 He大调 (和 感知上我 米重要) 轻 t 至暗
t转变, 但是 还请注意如何 这是在 e 索姆的花费 e 铃声
e在t的其他地方 H重建 离子。在这个c Ase (以米为单位 A任何这样的
Cases) 我们发现 认为这个传统 e关闭是受益者 阿尔因为 e r吟
我介绍了我 的一部分 我的z范围 s要么联合行动管制中心 乌皮或
p感觉上你 n重要的。

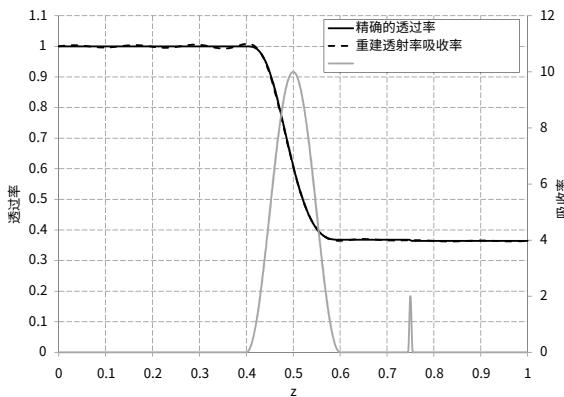


图7：具有异常特征的代表性吸收函数，以及精确的透射率函数和使用傅里叶不透明度映射的重建 - 异常值对重建的影响可以忽略不计。

表1和表2提供了时序。尽管在主场景渲染步骤中，傅里叶不透明度映射的性能与不透明度阴影贴图相当，但在系数渲染过程中，傅里叶不透明度映射处于劣势，高达1.5倍。

然而，我们还注意到，该通道的性能大约与为系数图选择的分辨率成正比，因此在实践中，我们可以通过仔细的分辨率管理来实现可接受的性能。我们在这方面得到了平滑的帮助

主题的频率性质，以及平滑
交缠公重刑 e 过滤步骤 p。

9 调色 AND颜色r

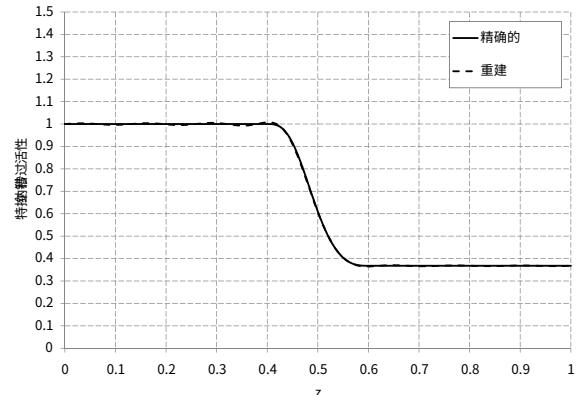
瓦e 有假设 ed 到目前为止 t 他 不透明度信息 或者协会 西亚特与 A原语是 si n格值，何韦弗四 伊尔不透明度应用高特 ds 微不足道 t 哪案例何 伊光谱 o p阿泰信息 的是亲六 ded 在 for 米RGB 的 t 一倍三倍 伊卡特迪瓦的重刑 菲西恩特。

10 结论 你易安

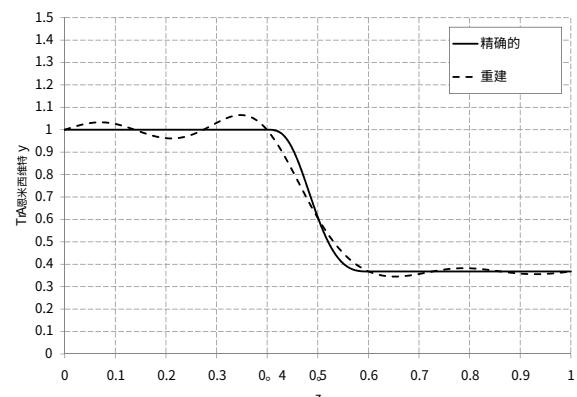
瓦e 有预置 恩特·傅立叶 氧城市地图 英，和我们 H大道显示何它可以是 你ed 到 rende r 无事实 e p重新过滤 卷公制嘘ados 使用 A紧凑型TW 啥步算法 嗯 那个报价公趣帕拉-B电子性能 e 到现有的我 恩驱动技术 H你问题。我们 H大道显示何我们的算法 Hm 被导出 FRm 坚定 physiC普林西普报莱斯和我们哈我们还展示了 n 藻类如何 或者 m 可以 b e Ge归一化 t 澳特地或-th异常碱基 s, 例如圆周率 欧共体 const 一个 藻类 奥里特有嘘自己被抢 你足以 Z 用于 th e 嘘伊平嘎 米乙 阿特曼: A卡姆阿斯鲁 米 对于影子 温光 烟 p 阿勿清洁系统 秒 (图-你的10). 通过瓦y 未来的w 好的 我们会d 李e 投资 t伊加特一个米基于方法 哪内- pr产品，包括 你进hg 其他 o 右旅普通的 bases, 还有 w是否是 p哦able到tA克 帐户 o FSG特林 埃读向o内 你框架 o。

A克诺勒 d宝石

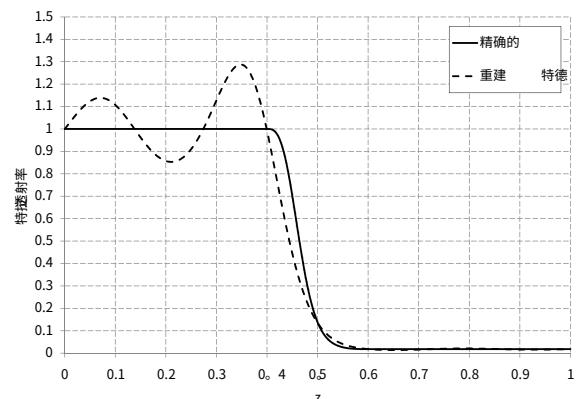
瓦e 想要 t谢谢乔纳 th科恩，磷呃雪莉 和 西蒙 G为他们的雷恩 热情 And 有帮助的 乌格 一个 ND中 例尔 S安兹支援 们让我们团结起来 恩重观地看到 英 这项工作到 F申请。



(a) 使用具有 15 个系数的傅里叶不透明度映射重建的薄特征。



(b) 使用具有 100 个系数的傅里叶不透明度映射重建的薄特征。



(c) 使用具有 1000 个系数的傅里叶不透明度映射重建的薄特征。

图8 : 如何振铃 G在佛得尔氧帕西蒂中使用程序 faffed 经过 n奥数 f系数科学和 FEA 真奥 p一座城市。

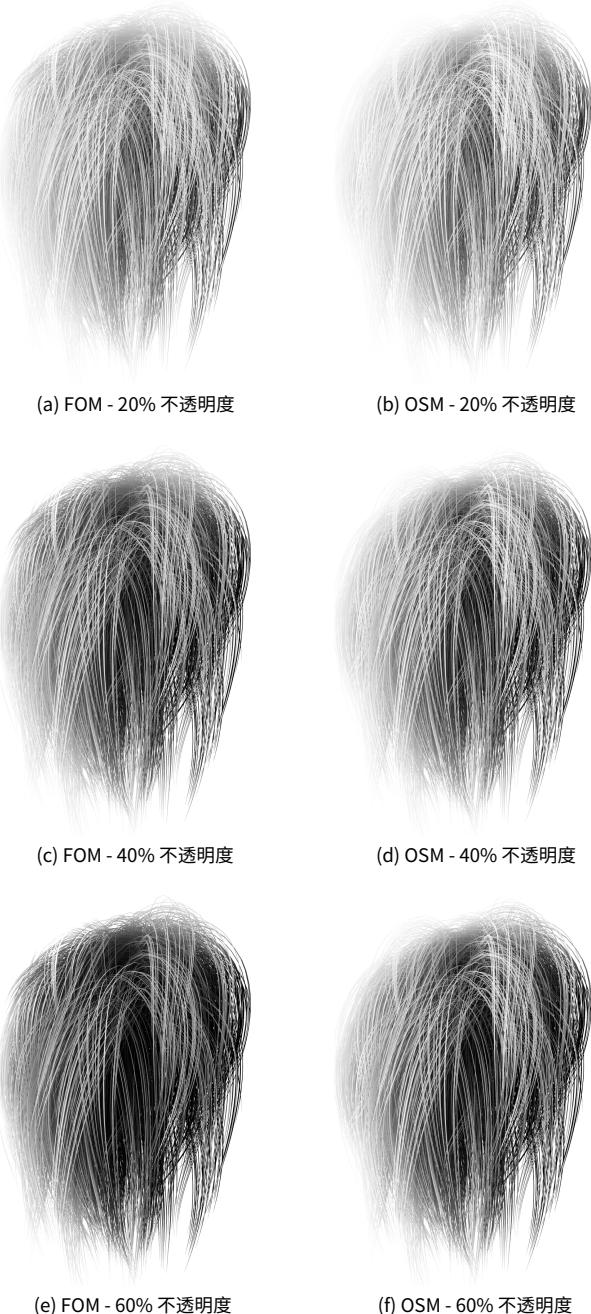


图9：头发上的傅立叶不透明度贴图(FOM)和不透明度阴影贴图(OSM)的比较。对于FOM和OSM，不透明度贴图的分辨率为512x512，并使用33x33盒式滤镜进行预过滤，以减少锯齿并柔化阴影。OSM图像使用32个切片，FOM图像每个纹素使用5个系数。该头发模型是Maya的内置示例头发系统①

右头发8.5。)



图10：《蝙蝠侠：阿卡姆疯人院》游戏截图，由Rocksteady Studios 和 Square Enix 提供。

参考

- ANNEN, TM值尔腾斯, T., B埃克埃尔特, P., S艾德尔, 生命值。, 和 K奥茨, J. 2007。卷积阴影贴图。在渲染技术 2007: 欧洲图形渲染研讨会, Eurographics, J. Kautz 和 S. Pattanaik, 编辑, 卷。18, 51-60。
- ANNEN, T., D翁格, Z., M尔腾斯, T., B埃克埃尔特, P., S艾德尔, 生命值。, 和 K奥茨, J. 2008。动态场景中的实时、全频率阴影。ACM 翻译。图形。27, 3, 1-8。
- G瑞恩, S. 2009。DirectX11 效果。游戏开发者大会 2009。
- H阿德维格, M., K拉兹, 作为免疫球蛋白G, C。, 和乙于勒, K. 2006。用于直接体积渲染的 GPU 加速深度阴影贴图。在第 21 届 ACM SIGGRAPH/Eurographics 图形硬件研讨会论文集。
- H艾伦, H. 2007。实时头发模拟和可视化
游戏用。硕士学位论文, 隆德大学。
- K我是, T.-Y., 和氮欧曼, U. 2001。不透明阴影贴图。在
第 12 届 Eurographics 渲染技术研讨会论文集, 6月 25 日至
27 日, 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磷地儿子, A. 2003。体积照明和建模模型。IEEE 可视化和
计算机图形学汇刊 2003, 150-162。
- L奥科维奇, T., 和V每个, E. 2000。深度阴影贴图。在亲-
第27届计算机图形学与交互技术年会论文集, 385-392。
- 氮古彦, H。, 和D奥纳利, W. 2005。实时渲染和
“nalu” 中真实头发的动画。在 GPU 宝石2。361-380。
- S内托恩, E., 和A萨森, U. 2008。实时近似
对头发渲染中的自阴影和透明度进行排序。在 2008 年交互式
3D 图形和游戏研讨会论文集, 2008 年 2 月 15 日至 17 日, 加
利福尼亚州雷德伍德城。
- S内托恩, E., 和A萨森, U. 2009。头发自阴影
以及使用占用图的透明度深度排序。在 2009 年交互式 3D 图形
和游戏研讨会论文集, 2009 年 2 月 27 日至 3 月 1 日, 马萨诸
塞州波士顿。
- 瓦伊利亚斯, L. 1978。在曲面上投射弯曲阴影。
在 1978 年 SIGGRAPH 论文集, 卷。12, 270274。
- 是英国SEL, C。, 和K艾塞尔, J. 2008。深度不透明贴图。在康-
计算机图形论坛 27(2): 675-680, (2008 年 EURO-Graphics
会议记录)。