

曲面高精度次表面散射渲染方法

赵双龙¹⁾, 郭兵^{2)*}, 沈艳³⁾

¹⁾(四川大学华西医院设备物资部 成都 610041)

²⁾(四川大学嵌入式系统及大数据管理实验室 成都 610065)

³⁾(成都信息工程大学计算机学院 成都 610225)

(guobing@scu.edu.cn)

摘 要: 次表面散射光是确保半透明材料视觉效果的关键因素, 在电影游戏、虚拟现实中有重要的应用价值。针对现有技术依赖平面漫反射剖面, 导致渲染复杂曲面时存在散射光颜色失真、阴影过渡生硬的问题, 提出一种基于多极子模型的预积分方法, 以提高曲面模型次表面散射精度。首先使用多极子模型构建准确的曲面单层和多层漫反射剖面; 然后对漫反射剖面预先积分并将结果保存到查找表中, 通过增加单次散射进一步提高散射精度; 最后在实时渲染时结合贴图模糊技术, 提高平均曲率的准确性。为了提高特定情况的散射效果, 讨论了透射光对散射效果的贡献。针对人脸渲染的实验结果表明, 所提方法在 SSIM 和 RMSE 等各项误差指标中均优于现有预积分方法, 在保证渲染速度的同时能够消除之前的曲面散射误差, 有效地提高渲染真实感。

关键词: 次表面散射; 实时渲染; 真实感渲染

中图法分类号: TP391.41

DOI: 10.3724/SP.J.1089.2024-00101

High Precision Subsurface Scattering Rendering Technique for Curved Surfaces

Zhao Shuanglong¹⁾, Guo Bing^{2)*}, and Shen Yan³⁾

¹⁾(Equipment and Materials Department of West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041)

²⁾(Embedded Systems and Big Data Management Laboratory, Sichuan University, Chengdu 610065)

³⁾(School of Computer Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

Abstract: Subsurface scattering is a key factor in ensuring the visual effects of translucent materials, and it holds significant application value in film, gaming, virtual reality, and digital twin technology. However, existing technologies rely on planar diffusion profiles, which lead to issues such as color distortion and harsh shadow transitions when rendering complex surfaces. To address these issues, this paper proposes a pre-integration method based on multipole theory to enhance the accuracy of subsurface scattering on surface models. Initially, it employs the multipole model to build accurate single-layer and multi-layer diffusion profiles for surfaces. Subsequently, these diffusion profiles are pre-integrated into a Lookup Table (LUT), and single scattering is included to further improve the scattering precision. Lastly, during real-time rendering, texture blur techniques are used in conjunction with LUT to improve the accuracy of the average curvature. Moreover, the paper discusses the contribution of transmitted light to the scattering effect in order to enhance the scattering in specific scenarios. Experiments focused on facial rendering demonstrate that the proposed method outperforms existing pre-integration techniques in error metrics such as SSIM and RMSE, and effectively eliminates previous errors in surface scattering while maintaining rendering speed and significantly enhancing the realism of the render.

Key words: subsurface scattering; real-time rendering; realistic rendering

收稿日期: 2024-02-27; 修回日期: 2024-09-19. 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62172061). 赵双龙(1995—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为实时渲染; 郭兵(1970—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 会员, 论文通信作者, 主要研究方向为区块链、大数据管理、绿色计算; 沈艳(1973—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为大数据、嵌入式系统。

由于光在介质内部发生了次表面散射, 因此常见的半透明物体具有柔和均匀的视觉特征. 次表面散射效果是影响渲染真实感的重要因素, 在电影、游戏、医学仿真以及虚拟现实中有重要的应用价值. 传统的双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)将次表面散射简化为朗伯反射的一部分, 仅考虑光线在小尺度范围内的散射贡献, 存在较大误差, 无法正确地表现出半透明材质的视觉特征. 因此, 获得高质量的散射效果的关键是通过模拟光在介质内部的扩散过程, 构建合适的散射模型.

模拟次表面散射的一类方法是对体积渲染方程进行数值积分, 通过光线追踪或光子映射对介质内部散射光线采样. 这类方法精度高, 通常作为标准结果对其他方法进行误差分析. 但由于光线在介质内部会产生大量散射和吸收, 直接采样消耗大量的渲染时间, 难以应用于实时渲染中. 另一种简化的模型是使用双向散射表面反射分布函数(bidirectional scattering surface reflectance distribution function, BSSRDF)描述光的散射过程, 它是 BRDF 模型的一种扩展形式, 其将光线在内部的传输简化为介质表面的光扩散, 使用一个径向对称的漫反射剖面计算出射点散射光强度. 由于 BSSRDF 只在介质表面进行采样, 因此易于扩展到实时渲染中. 例如, 屏幕空间技术和贴图空间技术利用多个可分离高斯核拟合漫反射剖面, 以减少实时渲染开销; 预积分方法将次表面散射光提前计算并集成到查找表(look up table, LUT), 再以曲率和光照角度为参数进行实时查找. 然而, 现有的主流算法大多使用平面的漫反射剖面, 无法准确地表现曲面散射光分布情况, 且大部分算法未考虑透射光产生的散射效果. 基于上述问题, 本文提出一种更加快速、准确的方法获得曲面物体的次表面散射效果, 对多层曲面解耦并使用 BSSRDF 模型计算精确散射剖面; 为了易于卷积计算, 基于扩散角度对散射光进行采样, 并使用透射光散射正确地表现薄层的散射效果.

1 相关工作

1.1 离线渲染方法

早期的离线渲染使用路径追踪^[1]和光子映射^[2-3]模拟光线在介质内部的传输, 这类方法通常能得到高质量的次表面散射, 但计算开销巨大; 基于光谱和物理参数蒙特卡罗方法^[4-6]可以进一步提高上

述方法结果的精度; 文献[7-8]可以处理非均质材料和复杂边界, 但需要建立有限元并使用数值求解扩散方程; Jensen 等^[9]利用经典扩散理论^[10], 通过假设材料是均匀的和半无限厚的几何体, 提出基于偶极子模型的双向表面散射分布函数; d'Eon 等^[11]使用量化扩散(quantized-diffusion, QD)函数和优化的光源分布替代偶极子构建光照模型; Christensen^[12]使用新的参数替代 BSSRDF 模型中的吸收系数和散射系数, 并以指数和形式表示漫反射剖面, 比 Habel 等^[13]提出的光束扩散模型更接近蒙特卡罗参考数据; 上述方法旨在提高 BSSRDF 模型的精度. Frisvad 等^[14]和 Frederickx 等^[15]的方法中增加并改进了入射光的角度分布.

Křivánek 等^[16]提出一种基于零方差理论的方法, 用于减少无偏蒙特卡罗方法中的采样方差; 基于零方差理论, Herholz 等^[17]提出一套一致的体积路径构建方法; d'Eon 等^[18]提出广义辐射传输的零方差理论, 可以更好地考虑边界附近的重要性变化. 当前, Vicini 等^[19]利用机器学习直接对曲面研究中的 BSSRDF 进行重要性采样; Deng 等^[20]通过学习体积中辐射分布的自适应近似表征, 加速次表面传输. 虽然计算介质内部传输过程能获得理论上最准确的渲染结果, 但是其渲染计算开销极大, 难以达到实时交互的要求.

1.2 实时渲染方法

Borshukov 等^[21]最早使用高斯滤波对皮肤纹理进行模糊, 以模拟次表面散射效果; 后续有很多类似的技术, 它们的思路都是通过对皮肤纹理进行模糊处理来近似次表面散射. 在此基础上, d'Eon 等^[22]结合 QD 的思路, 使用多个可分离高斯函数拟合扩散分布函数, 以获得更加精确和高质量的渲染结果. 因为每个皮肤纹理需要单独运算, 所以渲染的时间开销会随着渲染物体的数量而显著增加. Jimenez 等^[23-25]提出屏幕空间方法解决了这一问题, 使得渲染时间只取决于屏幕空间的大小; 在此基础上, 研究人员提出了一系列对屏幕空间方法进行优化的技术^[26-28]. 此外, 有限元和有限差分^[29-30]也可用于支持任意的非平面的几何表面的次表面散射. Penner 等^[31]提出的预积分皮肤着色(pre-integrated skin shading, PISS)考虑了阴影和曲率对次表面散射效果的影响, 通过对不同曲率和角度的次表面散射结果进行预计算并生成 LUT, 进一步提高了渲染速度. Kolchin^[32]使用主曲率和主方向光向量函数表征散射光; 其在之后的工作^[33]中使用贝塞尔方程求解球面上的漫反射剖面, 但形式过

于复杂且无法计算多层曲面的解析解. Kubo 等^[34]使用简易的高斯函数表达曲面上散射光分布, 函数方差由曲率和散射参数决定.

尽管现有的实时方法已经能够获取较为逼真的次表面散射效果, 但其中大多数方法均基于一些严格假定, 如平面几何和高散射系数等, 而实际情况与假设条件的差异会导致渲染时出现一些明显错误, 特别是在几何特征违反平面性时. 相比之下, 本文方法能够更准确地表现非平面几何的散射特性, 同时使用透射光散射以正确地表现薄层的散射效果.

1.3 BSSRDF

BSSRDF 用于计算光由入射点 x_i 进入介质后在出射点 x_o 处的散射光强, 公式为

$$S(x_i, \omega_i; x_o, \omega_o) = \frac{dL_o(x_o, \omega_o)}{d\Phi_i(x_i, \omega_i)}.$$

其中, $L_o(x_o, \omega_o)$ 表示出射辐亮度; $\Phi_i(x_i, \omega_i)$ 表示入射通量. BSSRDF 需要根据完整的辐射传输方程计算

$$(\omega \cdot \nabla) L(x, \omega) = -\sigma_t L(x, \omega) + \sigma_s \int_{4\pi} p(\omega, \omega') L(x, \omega') d\omega' + Q(x, \omega) \quad (1)$$

其中, $\sigma_s \int_{4\pi} p(\omega, \omega') L(x, \omega') d\omega'$ 表示来自其他方向散射能量; $-\sigma_t L(x, \omega)$ 表示吸收和散射的损耗.

式(1)是一个复杂的积分微分方程, 使用消光系数 σ_t 、散射系数 σ_s 和相位函数 $p(\omega, \omega')$ 描述了光在介质内的传输情况. 通过将辐射传输方程在球谐函数中展开, 截断至 N 阶并施加能量守恒来获得 P_N 近似. 对于高散射系数介质, 当 $N=1$ 时得到扩散近似的形式, 介质内任意位置的辐照度为

$$L(x, \omega) = \frac{1}{4\pi} \phi(x) + \frac{3}{4\pi} \omega \cdot E(x),$$

且光通量满足经典扩散方程

$$D \nabla^2 \phi(x) = \sigma_a \phi(x) - Q_0(x) + 3D \nabla \cdot \mathbf{Q}_1(x) \quad (2)$$

其中, $\phi(x) = \int_{4\pi} L(x, \omega) d\omega$ 表示光通量; $D = 1/3\sigma_t'$ 为扩散常数.

式(2)通常没有解析解, 但当介质中的光源为各向同性的点光源时, 经典扩散方程有一个简单形式的近似解

$$\phi(x) = \frac{\Phi}{4\pi D} \cdot \frac{e^{-\sigma_{tr} r(x)}}{r(x)} \quad (3)$$

其中, $\sigma_{tr} = \sqrt{3\sigma_a \sigma_t'}$ 表示有效传输系数.

通常, 实时渲染算法假设光线以垂直角度入

射到介质表面, 使用式(3)形式的点光源近似入射光, 式(3)表明, 光强度在介质内部和传播距离有关, 呈指数衰减, 使得 BSSRDF 在介质表面表现为关于入射点径向对称的函数, 如图 1 所示. BSSRDF 由多重散射项和单次散射项组成, 实际应用中, 为了简化计算往往忽略单次散射项, 则多次散射项表示为

$$S_d(x_i, \omega_i; x_o, \omega_o) = \frac{1}{\pi} F_t(x_i, \omega_i) R(\|x_i - x_o\|_2) F_t(x_o, \omega_o).$$

其中, F_t 表示菲涅耳项; $R(\|x_i - x_o\|_2)$ 表示径向对称的扩散函数. 对于半无限厚度均匀介质, 需要加上适当的边界条件, 边界条件为净入射通量等于出射通量的反射分量, 整理化简后的边界条件为

$$\phi(r) - 2AD \frac{\partial \phi(r)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

其中, $A = 1 + F_{dr}/1 - F_{dr}$. 式(4)表示光通量在边界外 $2AD$ 处的光通量为 0, 该边界条件没有解析解. Farrell 等^[10]提出一种近似解, 利用 2 个点光源即偶极子近似体积光源分布. 介质下方的正光源表示进入介质的入射光, 负光源放置在介质上方. 正负光源关于外推距离 $2AD$ 对称, 以满足式(4)的边界条件.

* 负光源

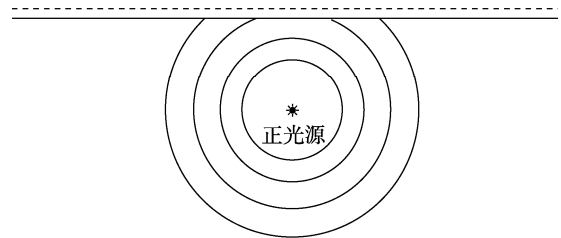


图 1 偶极子方法示意图

通过边界条件可以计算多次散射项

$$R_d(r) = -D \frac{(\mathbf{n} \cdot \nabla \phi)(x_s)}{d\Phi_i(x_i)} \quad (5)$$

当介质存在下边界时, 需要放置更多组光源来同时满足上下边界条件. 当模型由多层介质组成时, 需要先单独计算不同层的漫反射率和透射率, 然后通过卷积计算得到总漫反射率.

2 本文方法

2.1 单层曲面双向散射分布函数

上文中对介质散射情况的讨论都基于介质表

面为平面的前提. 如果材质表面为曲面, 则散射分布会发生变化, 原因如下: (1) 曲面改变了任意出射点的边界条件; (2) 曲面上的光传播距离受到单层厚度的影响, 当介质层较薄时, 光的扩散角度会受到一定的限制. 因此需要重新分析曲面的散射分布.

大多数曲面中, 由于次表面散射发生在较小的尺度范围内, 因此可以近似为规则球面上的散射, 如图 2 所示. 在 Jensen 等^[9]的平面模型中, 漫反射剖面 $R(d)$ 仅与出射点和入射点的距离有关; 而对于规则球面, 用出射点与入射点的球心张角代替距离将有利于多层曲面的卷积计算. 因此, 本文使用角度参数的漫反射剖面 $R(\theta)$, 并用偶极子理论重新计算漫反射剖面 $R(\theta)$.

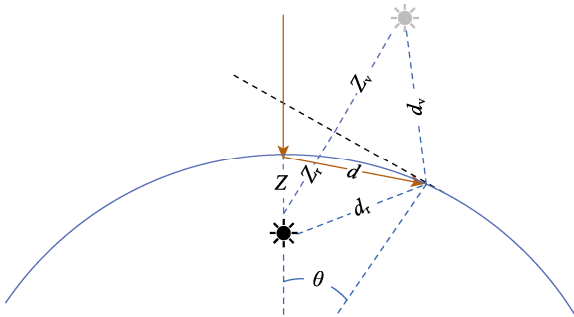


图 2 曲面散射示意图

图 2 所示为曲面散射光照模型, 其中, 橙色实线表示光线路径, 黑色虚线表示出射点切平面. 对于弧面上任意出射点, 通过几何计算可以得到新的正源深度 $Z_r = R - (R - Z) \cdot \cos \theta$. 其中, Z 表示原始正源深度; R 表示圆弧半径; θ 表示入射点与出射点的圆心角. 出射点处的光通量等于正负源光通量之和, 公式为

$$\phi(\theta) = \frac{\Phi}{4\pi D} \left(\frac{e^{-\sigma_u d_r}}{d_r} - \frac{e^{-\sigma_u d_v}}{d_v} \right) \quad (6)$$

其中, d_r 表示出射点到正源的距离; d_v 表示出射点到负源的距离. 将式(6)代入式(5), 得到漫反射剖面为

$$R(\theta) = \frac{\alpha'}{4\pi} \cdot \left[(\sigma_u d_r + 1) \frac{e^{-\sigma_u d_r}}{\sigma'_t d_r^3} + z_v (\sigma_u d_v + 1) \frac{e^{-\sigma_u d_v}}{\sigma'_t d_v^3} \right] \quad (7)$$

式(7)适用于仅包含上边界的半无限介质. 对于图 3 所示的具有下边界的薄介质层, 部分光通量会穿透介质层在下表面散射, 需要额外放置一对镜像

的极子满足下边界条件. 4 个极子使得下边界外 $2AD$ 位置(如图 3 下方虚线所示)的光通量为 0, 重新满足上边界条件需要放置更多的镜像极子. 当极子数量足够多时, 可近似为同时满足上下边界条件. 单层介质的反射剖面公式为

$$R(\theta) = \sum_{i=-n}^n \frac{\alpha' z_{r,i} (1 + \sigma_u d_{r,i}) e^{-\sigma_u d_{r,i}}}{4\pi d_{r,i}^3} - \frac{\alpha' z_{v,i} (1 + \sigma_u d_{v,i}) e^{-\sigma_u d_{v,i}}}{4\pi d_{v,i}^3}.$$

其中, i 表示极子对序号, 数量为 $2n+1$. 同理, 可以计算穿过介质的光通量 $T(\theta)$.

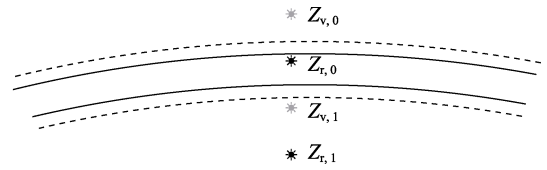


图 3 薄层曲面多极子模型

完整的 BSSRDF 模型是扩散近似和单次散射项的总和. 然而由于实时计算单次散射项通常比较困难, 因此大部分现有实时次表面算法忽略了单次散射项贡献. 本文将单次散射项放在预积分阶段进行计算, 在提高散射精度的同时不会额外增加实时计算开销. 弧面任意入射点的单次散射贡献计算公式为

$$L_o^{(1)}(x_o, \omega_o) = \frac{\sigma_s(x_o) Fp(\omega_i \cdot \omega_o)}{\sigma_{tc}} \cdot e^{-s'_i \sigma_i(x_i)} e^{-s'_o \sigma_i(x_o)} L_i(x_i, \omega_i).$$

其中, s'_i 和 s'_o 分别表示入射方向和出射方向的路程. 通过对整个弧面积分, 可以得到总的单次散射贡献.

2.2 多层皮肤漫反射剖面

Donner 等^[35]使用多极子模型计算具有不同光学参数的多层介质散射效应. 本文对多层曲面的扩散轮廓和透射分布函数进行讨论, 并以 Donner 等^[35]的 3 层皮肤模型作为实验模型. 计算多层的总漫反射剖面时, 需要对 2 层漫反射剖面进行卷积, 包括单层反射剖面 $R(\theta)^+$ 和透射剖面 $T(\theta)^+$, 以及光从介质层下方入射时的 $R(\theta)^-$ 和 $T(\theta)^-$. 散射范围受到介质层厚度的影响, 如图 4 所示, 使得 3 层皮肤模型中上面 2 层较薄层的漫反射剖面集中在较小的偏移角度范围内, 当曲率变小逐渐趋向平面时, 这种现象会消失. 注意, 因为第 3 层是无

限厚度的介质, 没有下边界, 所以对于第 3 层的漫反射剖面分布范围没有太大影响。

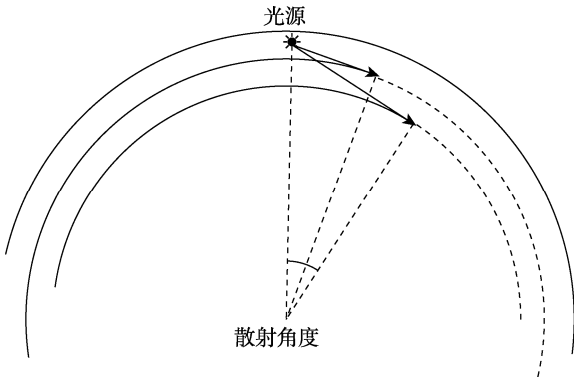


图 4 不同曲率的扩散角度

多极子模型假设出射光都是漫反射形式, 同时假设入射角度对介质的反射或透射没有影响。因此, 2 层之间的光线的所有相互作用都是由于多重散射引起的, 并且 2 个不同层的散射剖面 and 透射剖面可以通过卷积的方式相互结合。

给定 2 个单层的透射剖面 T_1 和 T_2 , 可以通过将 T_1 和 T_2 卷积获得总透射剖面

$$T_{12}(r) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T_1(r') T_2(r'') dx' dy' = T_1(r) * T_2(r) \quad (8)$$

使用傅里叶变换将式(8)变为乘积后并最终化简, 得到 2 层总透射剖面为

$$T_{12} = T_1 \cdot T_2 / (1 - R_2 \cdot R_1).$$

同理, 计算出 2 层漫反射剖面为

$$R_{12} = R_1 + \frac{T_1 R_2 T_1}{1 - R_2 R_1}.$$

重复上述卷积计算, 可以得到任意层数的扩散分布。当曲率较大时, 卷积之后漫反射剖面的形状与平面的漫反射剖面稍有不同。这是因为受到扩散角度影响, 卷积后的漫反射剖面在靠近源处分布更为集中, 图 5 所示为皮肤的 3 层总漫反射剖面。可以看出, 与基于高斯和的漫反射剖面^[11]相比, 较小的 r 值代表更高的曲率。对于不同曲率下的扩散横截面, 其下方应用均方根误差(root mean square error, RMSE)对 2 种方法的计算误差进行了量化对比, 并以蒙特卡罗方法计算的结果作为对照标准。从图 5a 可以看出, 当曲率较大时, 本文方法计算的曲面反射剖面与平面反射剖面形状存在明显差异。这是因为受到外围较小扩散角影响, 导致多层漫反射剖面分布更加靠近光源附近; 与蒙特卡罗参考对比, 高斯和方法的误差较大, 本文方法更接近蒙特卡罗参考。从图 5a~图 5c 可以看出,

在小曲率状态下, 红色通道的计算误差更显著; 高斯和方法倾向于对红色通道的扩散范围给出过高的估计; 随着曲率的降低, 本文方法始终表现出较低的误差, 且不同曲率下的误差并无显著变化, 相比之下, 高斯和方法呈现的误差随着曲率的减少逐渐缩小, 最终与本文方法达到一致的精度。

2.3 预积分曲面漫反射剖面贴图

影响曲面散射效果的主要因素是曲率和光照角度, 本文参考 Penner 等^[31]中的预积分思路, 将曲率和光照-法线夹角作为考虑漫反射衰减的 2 个参数。用预积分的方式提前生成一个可以在实时渲染时使用的 LUT, 这种方法在实时渲染时不需要额外的渲染通道, 通过片元着色器就可以实现, 能够有效地减少渲染时间开销。实际渲染时分为预积分和实时渲染 2 个阶段。在预积分阶段计算不同曲率的半球面散射情况, 以出射点为中心计算整个半球面其他位置对该点的次表面散射光贡献。假设选取的出射点为 A, 光照和出射点法线的夹角为 φ , 其他位置的与该点的弧度角为 θ , 则半球面区域对点 A 的总散射光贡献为

$$\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos(\varphi + \theta) \cdot R(\theta) d\theta \bigg/ \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} R(\theta) d\theta.$$

其中, $R(\theta)$ 为第 2.1 节中得到漫反射剖面, 分母为保证能量守恒的归一化项。以曲率和 $N \cdot L$ 作为参数计算不同条件下的散射光, 并集成到一张纹理图中。实时渲染阶段中, 在世界空间计算出着色点的法线、坐标和 $N \cdot L$; 然后在片元着色器中使用内置函数 `fwidth(normal)/fwidth(cordinate)` 计算得到曲率; 最后以曲率和 $N \cdot L$ 为参数, 使用 `texture_2D` 函数对 LUT 采样, 获得着色点处次表面散射光。

2.4 透射光散射贡献

前文方法讨论了较小范围的次表面散射特性, 主要针对入射光在介质正面的散射情况。但是, 若要正确地表现材料特殊情况下的散射特性, 如背面光线穿过手掌这样的情况, 则需要考虑透射光的散射贡献。如图 6 所示, 计算透射光散射需要对所有与出射光线相交的入射光进行积分。

为了简化入射位置 x_i 的计算, 离线渲染技术通常会忽略入射处折射。为了提高计算精度, 本文同时考虑入射处的折射, 使用斯涅尔定律计算入射光线通过介质的真实折射距离, 公式为

$$s_i' = s_i |\omega_i \cdot n_i| \bigg/ \sqrt{1 - (1/\eta)^2 (1 - |\omega_i \cdot n(x_i)|)^2}.$$

其中, s_i 表示直线入射距离; η 表示介质相对折射

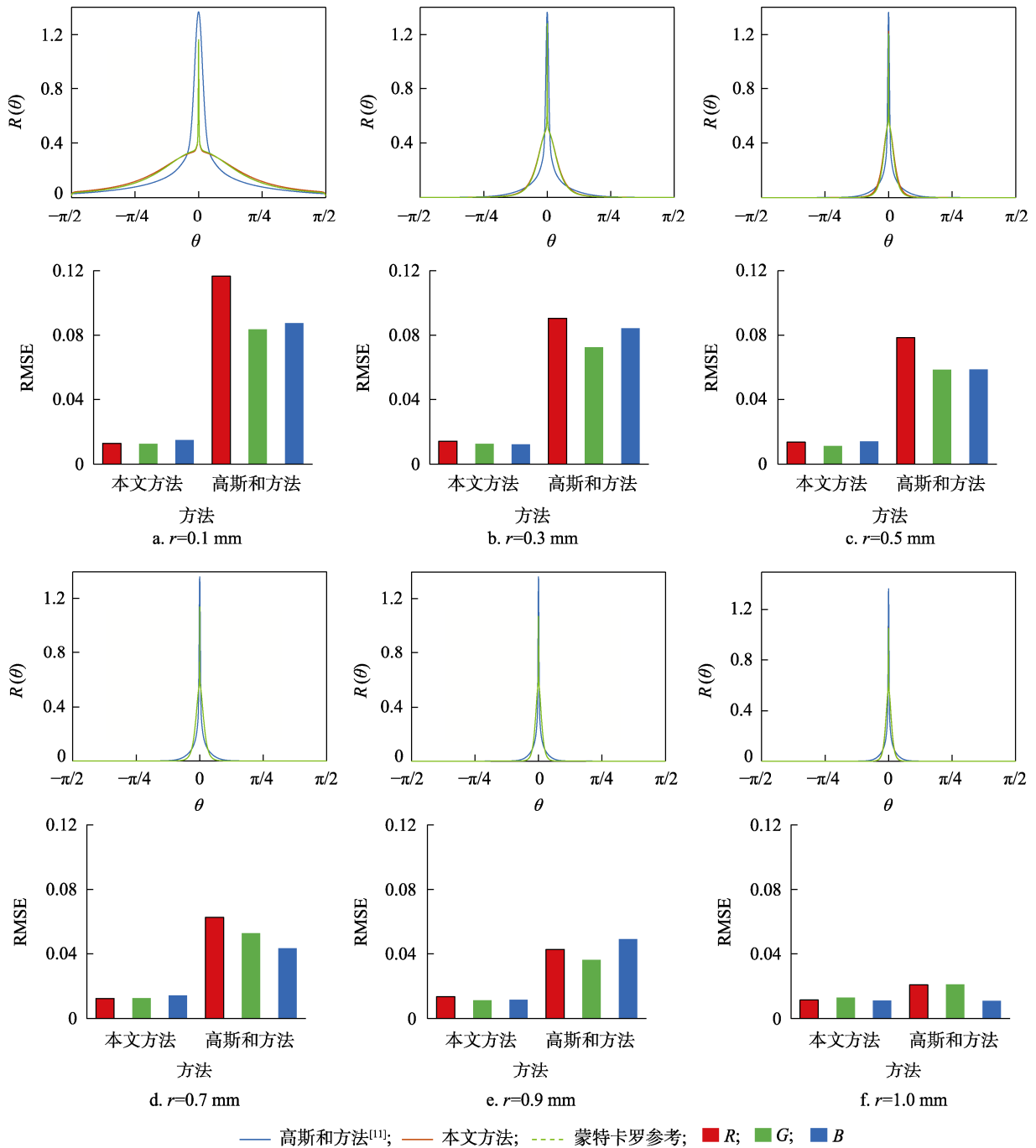


图5 不同方法在不同曲率下总散射剖面误差对比

率. 与第 2.3 节类似, 将入射点附近曲面近似为规则半球面, 整个半球面上的透射光散射贡献的计算公式为

$$L_0^{(1)}(x_0) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sigma_s Fp(\omega_i \cdot \omega_o)}{\sigma_{tc}} \cdot e^{-\sigma_t \left(y + \frac{\sin \theta \cdot r}{\sin \psi} - \frac{\sin \theta \cdot r}{\tan \psi} - r + \cos \theta \cdot r \right)} \cdot d\theta =$$

$$e^{-\sigma_t \cdot y} \cdot k \sum_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} e^{-\sigma_t \left(\frac{\sin \theta \cdot r}{\sin \psi} - \frac{\sin \theta \cdot r}{\tan \psi} - r + \cos \theta \cdot r \right)}.$$

其中, $k = \sigma_s Fp(\omega_i \cdot \omega_o) \cdot e^{-\sigma_t \cdot d} / \sigma_{tc}$; y 表示出射点沿着观察方向的深度. 由于预积分阶段无法提前获得入射点距离出射点的深度, 因此将 y 项从积分中提取, 在片元着色器中得到深度信息后, 将 y 作为系数进行计算. 实时渲染时, 使用阴影贴图技术实时计算沿视线方向的介质深度.

2.5 平均曲率计算及修正

在实时渲染的片元着色器阶段计算着色点曲率, 并使用着色点处曲率对 LUT 采样, 但这种方

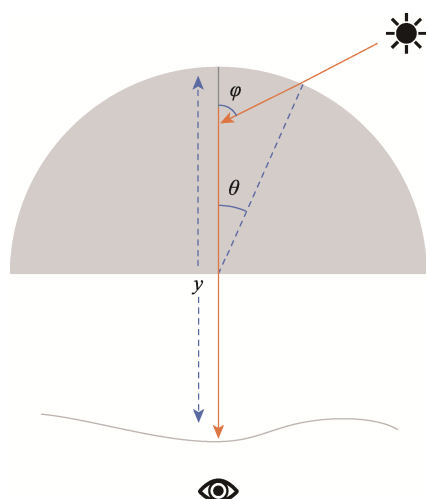
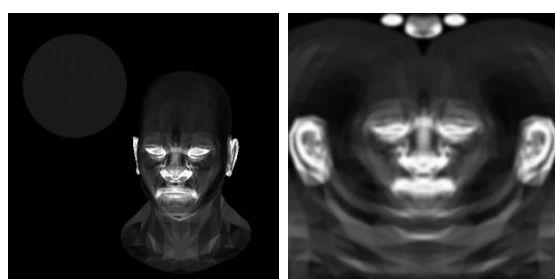


图 6 透射光曲面积分

法有时会存在较大误差. 这是因为模型表面并非总是平滑曲面, 对于一些曲率快速变化的区域, 这样的采样方式将导致散射光产生不连续的伪影. 为了获得散射点附近的平均曲率, 与贴图模糊技术的思路类似, 本文提出一种更加准确方法: 在第 1 个通道中, 计算模型各着色点的曲率并将其渲染到临时缓存对象中; 在第 2 个通道中, 使用高斯滤波处理曲率贴图. 由于高斯滤波基于邻域权重的平均, 因此能够消除曲率贴图上的噪点, 获得更准确的平均曲率信息, 图 7 所示为曲率修正示意图.



a. 初始曲率

b. 修正曲率

图 7 曲率修正示意图

最终, 处理后的曲率贴图不仅反映着色点的局部曲率, 而且包含了着色点周边区域的平滑化曲率信息, 即散射范围内曲率的加权平均.

3 实验及结果分析

本文实验的硬件参数如下: Intel Core i7-9750H @2.60 GHz CPU, NVIDIA GeForce RTX 2070 GPU; 实时渲染环境为 OpenGL 4.6. 介质的散射系数和吸收系数参考 Jensen 等^[9]的工作. 图形渲染分辨率为

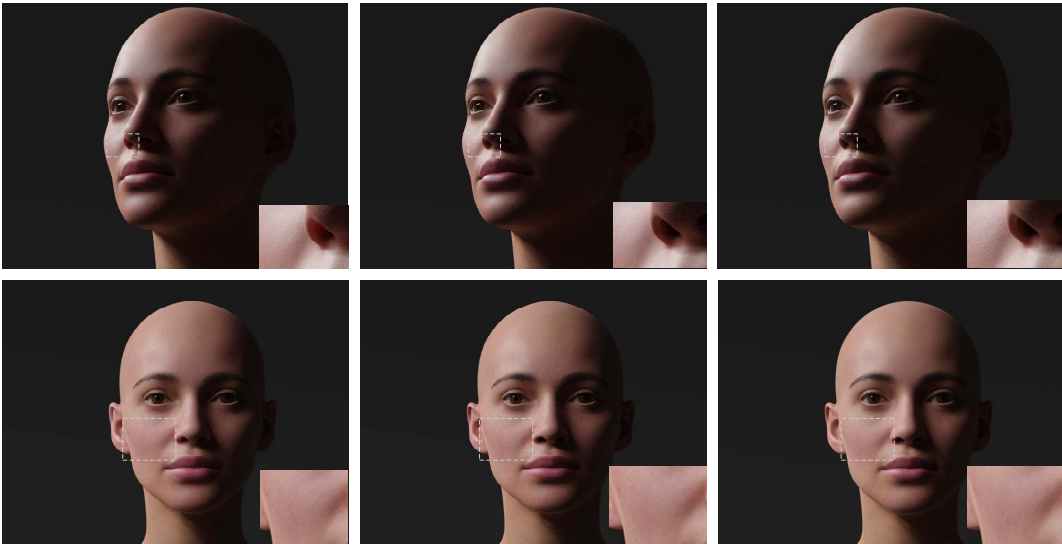
1024×768 像素或 1920×1080 像素. 实验对比方法有 PISS^[31]、蒙特卡罗光线追踪(Monte Carlo, MC)、基于曲率的反射函数(curvature-dependent reflectance function, CDRF)^[34]、表面曲率效应(surface curvature effects, SCE)^[33]和可分离次表散射(separable subsurface scattering, SSS)^[25].

3.1 多层曲面次表面散射

3 种方法在不同曲率情况下的渲染差异如图 8 所示. 图 8b 为本文的重建散射, 图 8a 加入了透射光散射(translucent scattering, TS), 图 8c 为 PISS^[31]方法. 图 8 中第 2 行图像展示了 3 种算法对于平滑曲面的散射光渲染差异, 误差主要体现在颜色方面. 如第 1 节所述, PISS^[31]方法的误差主要表现为低估曲面上散射光的扩散范围, 导致散射光颜色整体偏暗, 本文方法则能较好地还原皮肤的泛红特征. 对于平滑曲面, 2 种方法的阴影过渡效果都相对平滑. 对于耳部这类曲率较复杂的区域, 本文方法能够改善阴影边缘处散射光的生硬特征, 提升散射颜色质量, 使得阴影过渡更柔和. 图 8 中第 1 行展示了大曲率的散射效果, 可以看到, 图 8a 在加入了透射光散射后能够准确表现鼻子处的半透明效果, 更贴近真实皮肤的外观. 以 MC 方法作为参考标准, 分析人脸模型的渲染误差, 结果如表 1 所示. 表 1 使用平均绝对误差(mean absolute error, MAE)、峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)和结构相似性(structural similarity, SSIM)这 3 个指标评价渲染精度. 其中, PSNR 通过计算峰值信号与噪声之间的比率来评估图像质量, 能够直接反映图像失真程度; SSIM 指标基于人眼的视觉感知特性, 其评价结果往往与人眼的主观感受更为一致. 可以看出, 本文方法对模型不同角度的渲染精度均有提升.

3.2 漫反射剖面精度对比

对 3 层皮肤模型总漫反射剖面的可视化结果如表 2 所示. 可以看出, 本文方法使用多极子重建, 得到的漫反射剖面在扩散范围上更接近于 MC 方法的参考结果, 因为本文考虑了单次散射的贡献, 所以能够准确地表现出源点附近的高亮峰值. 对 3 种方法在不同光学参数情况下的精度对比如图 9~图 10 所示. σ_a/σ_s 分别为 0.10 和 0.05. 高比值情况下, CDRF^[34]方法的散射光衰减过快, 本文方法则保持了较好的精度. 低比值情况下, 由于使用了点源近似, 本文方法和 SCE^[33]方法在源点附近存在一些误差. 相较于 CDRF^[34]方法, 本文方法和 SCE 方法因为考虑了曲面边界条件, 在 2 种情况下



a. 本文方法+TS b. 本文方法 c. PISS^[31]

图 8 不同方法对皮肤次表面散射渲染效果

表 1 不同方法对皮肤渲染误差分析

方法	正面			侧面		
	MAE↓	PSNR/dB↑	SSIM↑	MAE↓	PSNR/dB↑	SSIM↑
本文方法+TS	0.051	32.13	0.986	0.043	34.81	0.994
本文方法	0.057	31.37	0.992	0.054	33.02	0.990
PISS ^[31]	0.058	31.65	0.985	0.093	30.09	0.923

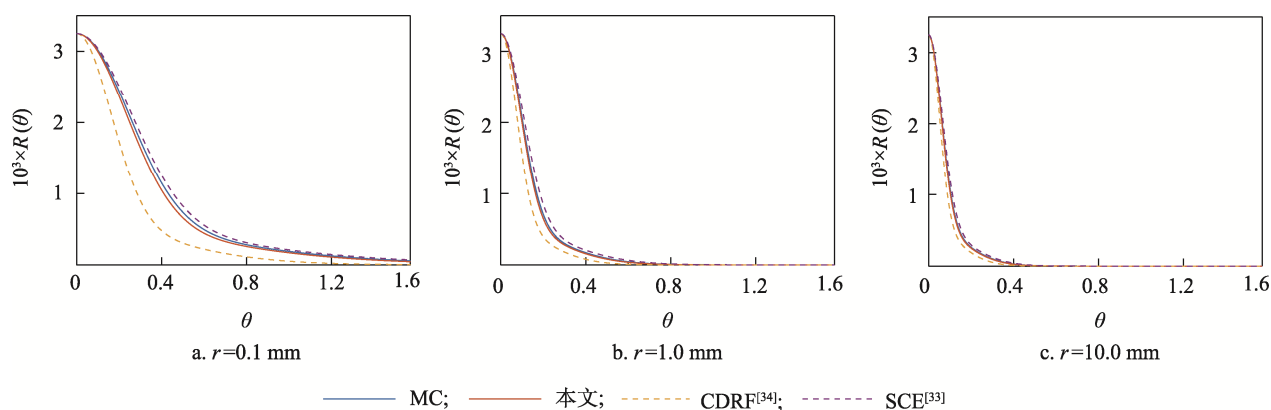
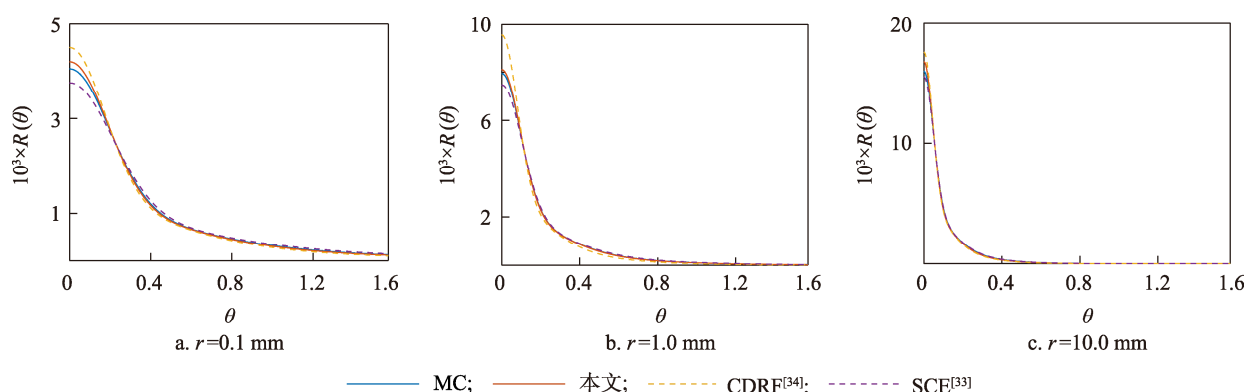
注. 粗体表示对应指标最优值.

表 2 不同方法漫反射剖面可视化对比

对比方法	总漫反射剖面	红色漫反射剖面	绿色漫反射剖面	蓝色漫反射剖面
本文				
PISS ^[31]				

都能更好地匹配 MC 参考值. 将漫反射剖面按 3 个曲率范围划分, 并与 CDRF^[34]方法、SCE^[33]方法进行对比, 使用均方根误差(root mean square error, RMSE)评估漫反射剖面误差, 使用 SSIM 指标评估可视化结果误差, 结果如表 3 所示. 可以看出, 与 SCE^[33]方法相比, 本文方法在 RMSE 和 SSIM 指

标的精度并无显著差异, 但比 CDRF^[34]方法精度更高. 本文方法、CDRF^[34]方法和 SCE^[33]方法的总平均散射范围分别比参考标准高出 2.42%, 11.42% 和 6.93%. 本文方法在各曲率区间的平均散射范围精度略高于 SCE^[33]方法和 CDRF^[34]方法, 相较 SCE^[33]方法, 其总体渲染精度接近, 但计算复杂

图 9 $\sigma_a/\sigma_s=0.10$ 时不同方法曲面漫散射剖面精度对比图 10 $\sigma_a/\sigma_s=0.05$ 时不同方法曲面漫散射剖面精度对比表 3 不同方法曲面漫反射剖面误差对比($\sigma_s=1 \text{ mm}^{-1}$, $\sigma_a=0.1 \text{ mm}^{-1}$)

半径范围/mm	方法	RMSE(散射剖面) ↓	SSIM(可视化结果) ↑	与参考标准相比散射范围变化/%
0.1~1.0	本文	0.031	0.921	+2.73
	CDRF ^[34]	0.042	0.887	+7.31
	SCE ^[33]	0.030	0.915	+3.73
1.0~10.0	本文	0.033	0.937	-1.54
	CDRF ^[34]	0.047	0.890	+2.78
	SCE ^[33]	0.035	0.922	+1.94
10.0~20.0	本文	0.027	0.933	+1.23
	CDRF ^[34]	0.031	0.930	+1.33
	SCE ^[33]	0.024	0.936	+1.26

注: 粗体表示在对应曲率区间该指标的最优值。

度明显低。

3.3 透射光贡献

图 11 所示为 3 幅 Stanford bunny 模型的渲染效果, 其中, 图 11a 所示为使用第 2.2 节的多极子曲面模型渲染效果, 图 11b 所示为使用第 2.4 节的透射光模型渲染效果, 图 11c 所示为图 11a 和图 11b 的 2 种散射光结合的渲染效果。可以看出, 仅使用多极子模型能够捕捉到表层的小尺度散射效果, 模型表现出较为柔和且低透明度的视觉外观,

其更易于表现大理石这类透光较低的材料; 透射光模型则能够较好地表现出背面光源的大范围散射效果, 更易于表现类似玉石这类透明度高的材料; 图 11b 中透射光能够更好地表现出耳朵和尾巴等较薄区域的散射特性; 图 11a 和图 11c 的差异主要体现在中部区域, 增加了透射光贡献后, 使得模型背面的光扩散到了模型的中间部分, 进一步模糊了兔子阴影边界。实际渲染时, 可以通过手动调整 2 种光的比例来达到特定的半透明特征,

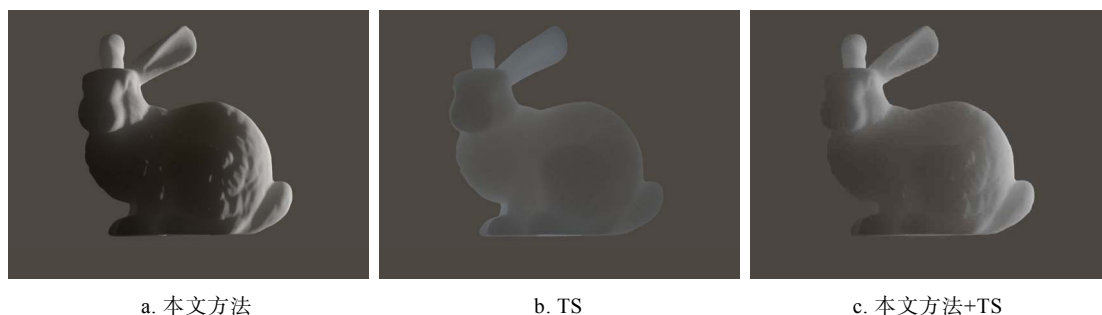


图 11 透射光效果

尽管在物理层面会丢失一部分准确性,但仍然能够捕捉令人信服的视觉效果,如散射光在阴影区域的渗透,以及高频几何特征的模糊。

3.4 算法性能分析

表 4 所示为本文与主流实时次表面方法的性能对比,测试使用 *adreno650* GPU,频率为 490 MHz。因为 3 种方法的渲染速度取决于屏幕中半透明材质的片元数量,所以测试了半透明材质在不同屏

幕占比情况下的性能差异,并使用内存读写带宽以及单帧时长作为性能指标。可以看出,得益于预计算过程以及较少的渲染通道,本文方法的性能指标略优于 *SSS*^[25]方法。相较于 *PISS*^[31]方法,由于本文的透射光渲染通道增加了额外的贴图读取开销,同时需要调用深度缓存数据,因此本文方法读写带宽略高于 *PISS*^[31]方法,但其对薄层这类特殊区域的渲染质量提升非常显著。

表 4 不同方法在不同屏幕占比下渲染性能对比

方法	屏幕占比 30%			屏幕占比 60%		
	读取带宽/(GB·s ⁻¹)	写入带宽/(GB·s ⁻¹)	帧时长/ms	读取带宽/(GB·s ⁻¹)	写入带宽/(GB·s ⁻¹)	帧时长/ms
本文	10.31	0.92	7.2	13.15	1.12	11.1
<i>PISS</i> ^[31]	8.64	0.75	6.8	11.47	1.04	10.2
<i>SSS</i> ^[25]	14.71	1.21	10.1	17.54	1.37	14.6

4 结 语

次表面散射光是影响真实感渲染的重要因素之一,实时渲染研究中有许多简单高效的算法能够表现出这种半透明特征。针对主流的算法依赖平面漫反射剖面计算散射光,对复杂曲率表面渲染精度不高的问题,本文结合多极子模型的精确建模能力,重建曲面的漫反射剖面,考虑单次散射项,解决了已有方法在曲率较大区域散射光颜色失真的问题,获得了更加真实柔和的渲染效果;通过优化平均曲率计算,在渲染阶段改用带有局部曲率信息的数据进行采样,提高表面曲率不连续区域的渲染精度;在预积分阶段额外计算透射光贡献,进一步增加薄层的散射效果。实验结果表明,本文方法能够较大程度地提高复杂曲面的渲染精度。

与现有预积分方法相比,虽然本文方法对曲面次表面散射有较大改进,但渲染质量与光线追踪仍存在一定差距。在渲染半透明材质方面,光线追踪具有天然优势,硬件的发展使得实时光追技

术具备更多应用可能性。如何将现有的光栅化渲染技术与实时光追结合,是未来的一个重要研究方向。

参考文献(References):

- [1] Jensen H W, Legakis J, Dorsey J. Rendering of wet materials[C] //Proceedings of the 10th Eurographics conference on Rendering. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 1999: 273-282
- [2] Jensen H W, Christensen P H. Efficient simulation of light transport in scenes with participating media using photon maps[C] //Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 1998: 311-320
- [3] Donner C, Jensen H W. Rendering translucent materials using photon diffusion[C] //Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2008 Classes. New York: ACM Press, 2008: Article No.4
- [4] Krishnaswamy A, Baranoski G V G. A biophysically-based spectral model of light interaction with human skin[J]. Computer Graphics Forum, 2004, 23(3): 331-340
- [5] Donner C, Jensen H W. A spectral BSSRDF for shading human skin[C] //Proceedings of the 17th Eurographics Conference on

- Rendering Techniques. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2006: 409-417
- [6] Hemenger R P. Optical properties of turbid media with specularly reflecting boundaries: applications to biological problems[J]. *Applied Optics*, 1977, 16(7): 2007-2012
- [7] Wang J P, Zhao S, Tong X, *et al.* Modeling and rendering of heterogeneous translucent materials using the diffusion equation[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(1): Article No.9
- [8] Wang L V. Rapid modeling of diffuse reflectance of light in turbid slabs[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1998, 15(4): 936-944
- [9] Jensen H W, Marschner S R, Levoy M, *et al.* A practical model for subsurface light transport[C] //Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 2001: 511-518
- [10] Farrell T J, Patterson M S, Wilson B. A diffusion theory model of spatially resolved, steady-state diffuse reflectance for the noninvasive determination of tissue optical properties *in vivo*[J]. *Medical Physics*, 1992, 19(4): 879-888
- [11] d'Eon E, Irving G. A quantized-diffusion model for rendering translucent materials[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(4): Article No.56
- [12] Christensen P H. An approximate reflectance profile for efficient subsurface scattering[C] //Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2015 Talks. New York: ACM Press, 2015: Article No.25
- [13] Habel R, Christensen P H, Jarosz W. Photon beam diffusion: a hybrid Monte Carlo method for subsurface scattering[J]. *Computer Graphics Forum*, 2013, 32(4): 27-37
- [14] Frisvad J R, Hachisuka T, Kjeldsen T K. Directional dipole model for subsurface scattering[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2014, 34(1): Article No.5
- [15] Frederickx R, Dutré P. A forward scattering dipole model from a functional integral approximation[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(4): Article No.109
- [16] Křivánek J, d'Eon E. A zero-variance-based sampling scheme for Monte Carlo subsurface scattering[C] //Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2014 Talks. New York: ACM Press, 2014: Article No.66
- [17] Herholz S, Zhao Y Y, Elek O, *et al.* Volume path guiding based on zero-variance random walk theory[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2019, 38(3): Article No.25
- [18] d'Eon E, Křivánek J. Zero-variance theory for efficient subsurface scattering[M] //Keller A, Gauthron P, Vorba J, *et al.* SIGGRAPH 2020 Courses: Advances in Monte Carlo Rendering: the Legacy of Jaroslav Křivánek. New York: ACM Press, 2020: 45-76
- [19] Vicini D, Koltun V, Jakob W. A learned shape-adaptive subsurface scattering model[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2019, 38(4): Article No.127
- [20] Deng H, Wang B B, Wang R, *et al.* A practical path guiding method for participating media[J]. *Computational Visual Media*, 2020, 6(1): 37-51
- [21] Borshukov G, Lewis J P. Realistic human face rendering for "The Matrix Reloaded"[C] //Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2005 Courses. New York: ACM Press, 2005: Article No.13-es
- [22] d'Eon E, Luebke D. Advanced techniques for realistic real-time skin rendering[J]. *GPU Gems 3*, 2007, 3: 293-347
- [23] Jimenez J, Sundstedt V, Gutierrez D. Screen-space perceptual rendering of human skin[J]. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2009, 6(4): Article No.23
- [24] Jimenez J, Gutierrez D. Faster rendering of human skin[C] //Proceedings of the 18th Spanish Computer Graphics Conference. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2008: 21-28
- [25] Jimenez J, Zsolnai K, Jarabo A, *et al.* Separable subsurface scattering[J]. *Computer Graphics Forum*, 2015, 34(6): 188-197
- [26] Mertens T, Kautz J, Bekaert P, *et al.* Efficient rendering of local subsurface scattering[J]. *Computer Graphics Forum*, 2005, 24(5): 41-49
- [27] Shah M A, Kontinen J, Pattanaik S. Image-space subsurface scattering for interactive rendering of deformable translucent objects[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2009, 29(1): 66-78
- [28] Mikkelsen M S. Skin rendering by pseudo-separable cross bilateral filtering[R]. Santa Monica: Naughty Dog Inc, 2010
- [29] Wang Y J, Wang J P, Holzschuch N, *et al.* Real-time rendering of heterogeneous translucent objects with arbitrary shapes[J]. *Computer Graphics Forum*, 2010, 29(2): 497-506
- [30] Li D P, Sun X, Ren Z, *et al.* TransCut: interactive rendering of translucent cutouts[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2013, 19(3): 484-494
- [31] Penner E, Borshukov G. Pre-integrated skin shading[M]. Wellesley: A K Peters, 2016: 41-55
- [32] Kolchin K. Curvature-based shading of translucent materials, such as human skin [C] //Proceedings of the 5th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australia and Southeast Asia. New York: ACM, 2007: 239-242
- [33] Kolchin K. Surface curvature effects on reflectance from translucent materials[OL]. [2024-02-27]. <https://arxiv.org/abs/1010.2623>
- [34] Kubo H, Dobashi Y, Morishima S. Curvature-dependent reflectance function for interactive rendering of subsurface scattering[J]. *International Journal of Virtual Reality*, 2011, 10(1): 45-51
- [35] Donner C, Jensen H W. Light diffusion in multi-layered translucent materials[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 1032-1039