

真实感材质外观的表示和高效渲染技术研究现状及展望

陶成之, 孙奇, 过洁*, 袁军平, 周辰熙, 何雪滟, 范之闽, 史鹏程, 郭延文

(计算机软件新技术全国重点实验室(南京大学) 南京 210033)
(guojie@nju.edu.cn)

摘要: 在虚拟场景的组成中, 除了三维几何模型之外最重要的要素就是物体表面的材质外观, 对材质进行基于物理的建模和真实感绘制是保证虚拟场景真实感的重要手段。然而, 由于现实世界材质外观本身的多样性和复杂性, 迄今为止对真实感材质的研究一直是计算机图形学领域的热点和难点。文中总结了材质外观的近期相关工作, 从材质的表示建模和材质的真实感绘制 2 大方向展开讨论; 进一步, 将材质模型分为表达范围广的通用材质模型和针对毛发及布料等材质的特殊材质模型 2 大类; 并将材质绘制方法分为用于离线渲染的点采样优化和用于实时渲染的材质预过滤 2 种; 最后指出材质研究可能的 3 个发展方向: 神经网络材质、波动光学材质和材质的统一标准, 为未来该领域的研究提供思路。

关键词: 真实感绘制; 材质; 表面微结构; 毛发渲染; 皮肤渲染; 布料渲染; 重要性采样; 纹理预过滤

中图法分类号: TP391.41 **DOI:** 10.3724/SP.J.1089.2024.2024-00145

Current Status and Prospect of Research on Modeling and Rendering Techniques for Realistic Materials

Tao Chengzhi, Sun Qi, Guo Jie*, Yuan Junping, Zhou Chengxi, He Xueyan, Fan Zhimin, Shi Pengcheng, and Guo Yanwen

(State Key Laboratory for Novel Software Technology (Nanjing University), Nanjing 210033)

Abstract: In the composition of virtual scenes, besides three-dimensional geometric models, the most important element is the appearance of object surfaces. Physically-based modeling and realistic rendering of materials are crucial means to ensure the realism of virtual scenes. However, due to the diversity and complexity of real-world material appearance, research on realistic materials has been a hot and challenging topic in the field of computer graphics. In this paper, we summarize numerous relevant works on material appearance, categorizing them into two main aspects: appearance modeling and realistic rendering of materials. Furthermore, material models are divided into two major categories: general material models with broad representational space and special material models tailored for materials such as hair and fabric. Material rendering methods are also classified into two types: point-sampling optimization for offline rendering and material pre-filtering for real-time rendering. Finally, three potential directions for material research are pointed out: neural network materials, wave optics materials and a unified standard of material, providing insights for future research.

收稿日期: 2024-03-25; 修回日期: 2024-07-30. 基金项目: 国家自然科学基金重点项目(62032011). 陶成之(1992—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为真实感渲染、材质估计; 孙奇(2000—), 男, 硕士研究生, CCF 学生会员, 主要研究方向为真实感渲染、材质估计; 过洁(1986—), 男, 博士, 长聘副教授, 博士生导师, CCF 高级会员, 论文通信作者, 主要研究方向为计算机图形学、虚拟现实; 袁军平(2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机图形学; 周辰熙(2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机图形学; 何雪滟(2000—), 女, 硕士研究生, CCF 学生会员, 主要研究方向为计算机图形学; 范之闽(2002—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为真实感渲染; 史鹏程(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为真实感渲染; 郭延文(1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 会员, 主要研究方向为计算机图形学。

in this field.

Key words: realistic rendering; material; surface microstructure; hair/fur rendering; skin rendering; cloth rendering; importance sampling; texture prefiltering

随着几十年来计算机技术的发展，当前的图形渲染技术不管是在生成图片质量还是运算效率上都有了很大的进步，已成功地应用在三维电脑游戏、影视动画特效、智能家居设计、虚拟现实和增强现实等领域。目前，人们对数字化内容的真实感要求逐渐提高，对于一些模拟现实环境或以现实环境为基础的场景，希望渲染出来的结果能够达到以假乱真的效果；而对于一些非现实的场景，利用基于物理的真实感渲染方法也能够生成具有更加良好可信观感的结果。

材质是真实感渲染的一大核心部分，直接影响物体表面在最终渲染结果中的呈现。随着人们对渲染真实度的不断追求，对材质建模和渲染的正确性要求也越来越高，需要科研人员对材质进行更加深入的研究。此外，材质的正确渲染涉及光学、物理和生物等多个学科的交叉，而不仅仅局限于计算机科学和数学。因此，材质的研究是一个非常复杂的问题。

建模和绘制是计算机图形学研究的 2 大核心问题，本文将从这 2 个方面对真实感材质的研究工作进行整理和讨论。这 2 个方面紧密关联，因为许多绘制方面的优化是针对特定材质模型提出的，所以本文在讨论材质模型时也会提及一些针对性的优化渲染方法。

目前已有许多不同类型的材质模型，每个模型都有其自身的适用范围。材质模型通常通过双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)^[1]或双向散射分布函数(bidirectional scattering distribution function, BSDF)^[2]描述材质表面与光线的交互行为。由于通用材质模型能够表现真实世界中大部分物体的材质外观，如 Microfacet 模型，因此本文将从传统显式建模的材质模型和基于现实材质测量数据的数据驱动材质模型 2 个角度对通用材质模型进行展开讨论。此外，还有一些材质模型具有很强的针对性，能够表现一些较为特别的材质，如毛发和布料，本文将这种类型的材质称为特殊材质模型。虽然特殊材质模型的适用范围不如通用材质模型广泛，但这类模型能够渲染出通用模型无法展现的真实材质效果。本文介绍毛发、皮肤、布料、亮片和颗粒 5 种

特殊材质模型；主要针对用于表面渲染的材质模型，而不会对用于体积渲染的参与性介质进行详细讨论，仅在如皮肤、颗粒等从体积渲染推导而来的材质模型中提及。

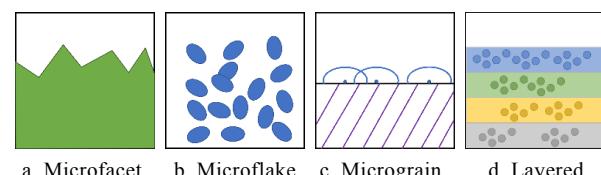
材质的高效渲染也是一个需要研究的重要课题，本文将对采样优化和预过滤这 2 个通用的材质渲染优化技术进行讨论。在以光线追踪为主的离线渲染中，提升材质采样效率的首要方法就是重要性采样，面对各种不同材质模型，尤其是隐式材质模型，如何进行高效采样是一个需要深入研究的问题。此外，在以光栅化为主要方法的实时渲染中，纹理预过滤是提升材质渲染效果的关键手段，本文将从传统的预过滤方法和利用神经网络的预过滤方法 2 个角度展开讨论。通过对上述工作的分析和讨论，对材质建模与绘制的核心技术进行系统的梳理，为今后对材质的研究提供有价值的探索方向。

1 通用材质模型

通用材质模型能够描述大部分的现实材质类型，本文将从通用材质模型为切入点，介绍材质建模的一般方案。根据定义方式不同，将其分为形式化定义的参数材质模型和由数据驱动的材质模型。

1.1 参数材质模型

考虑主流的研究方向，本节将参数材质模型分为 Microfacet, Microflake, Micrograin 和 Layered 材质 4 种，如图 1 所示。



a. Microfacet b. Microflake c. Micrograin d. Layered

图 1 4 种参数材质模型

1.1.1 Microfacet 模型

Microfacet 模型是一种用于材质建模的经典模型，其核心思想是假设物体的表面由许多微小的、理想的反射面(称为 Microfacet)组成，如图 2 所示。其中， ω_m 表示 Microfacet 法线方向， n 表示宏观

表面法线方向,这些 Microfacet 的法线分布不均匀,会导致宏观上的高光反射效果。Microfacet 模型通过对宏观表面法线的 1 阶统计描述 Microfacet 的法线分布,从而能够模拟光线在真实物体表面的复杂反射、折射和散射行为。

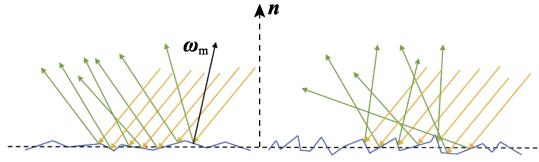


图 2 Microfacet 模型示意图

常见的 Microfacet 模型 BRDF 形式^[3]为

$$f_r(\omega_o, \omega_i) = \frac{\text{NDF}(\omega_h) G(\omega_o, \omega_i) F(\omega_o)}{4(n \cdot \omega_o)(n \cdot \omega_i)}.$$

其中, ω_o 表示光线出射方向; ω_i 表示光线入射方向; ω_h 表示半程向量; n 表示宏观表面的法线方向; 法线分布函数(normal distribution function, NDF)定义 Microfacet 法线在各个方向上的分布状况,直接影响反射光的分布; 几何遮蔽与阴影 G 项模拟 Microfacet 的互相遮挡,影响光线的反射和透射; 菲涅尔效应 F 项描述光线进入不同介质时反射率随着入射角度不同时的变化情况,能够模拟不同视角下材质外观的变化。NDF 是 Microfacet 模型中最重要的组成部分之一,它直接影响反射光的分布特性,所以在早期的 Microfacet 模型中就对此进行了研究^[4-5]。比较知名的 G 项是 V-Groove 表面^[6]和 Smith 表面^[7],其中,V-Groove 表面使用球状高斯分布描述 V 形 Microfacet 的互反射,近似建模了几何自阴影;而 Smith 表面对基于高斯统计描述的几何表面,提出一个通用的理论模型来描述表面的几何自阴影。2 种理论均在后续得到扩展^[8-11],而最近更多的研究是基于 Smith 模型展开的。

早期的 Microfacet 模型受限于 NDF 比较单一,难以刻画不同类型的材质细节,且几何遮蔽与阴影项难以反映 NDF 的变化。菲涅尔项虽然具有一定的通用性,但是缺乏描绘彩虹等高频效果的能力。针对以上局限性,近些年涌现许多基于 Microfacet 理论的研究成果。

Ribardière 等^[12]提出一种通用的 NDF,称为 Student's T 分布,它通过参数 γ 控制 NDF 的特征。当 $\gamma=2$ 时,Student's T 包含 GGX 分布^[5];当 $\gamma \rightarrow \infty$ 时,Student's T 趋向于 Beckmann 分布^[4]。进一步,Ribardière 等^[13]提出一种更为通用的分段线性表示的 NDF,结合相应的重要性采样方法和

Smith^[7]的阴影遮蔽项,该方法可以设计多瓣 NDF 并支持任何法线分布的近似表示。图 3 所示为同一场景中,使用不同的 NDF 生成了截然不同的 BSDF。

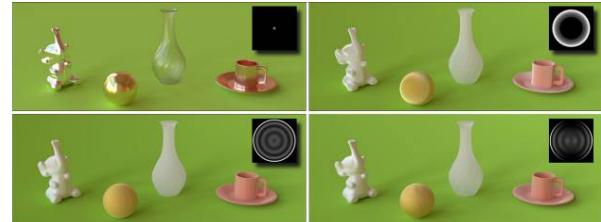


图 3 不同 NDF 生成 BSDF 的渲染效果^[13]

Heitz 等^[14]在 Beckmann 和 GGX Microfacet 分布下,分别提出了相应的 NDF 重要性采样方法,有效地降低了 Microfacet 模型下蒙特卡罗渲染的方差,如图 4 所示;之后,进一步完善了该方案在 GGX Microfacet 分布下的采样方法,并提出高效且精确的例程^[15],提高了相关场景的渲染效果和效率。

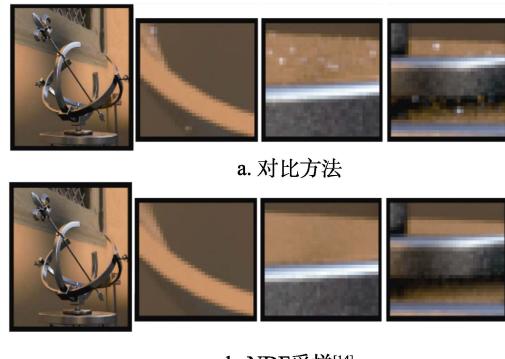
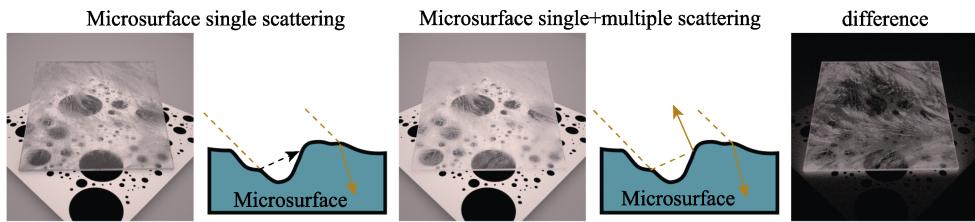
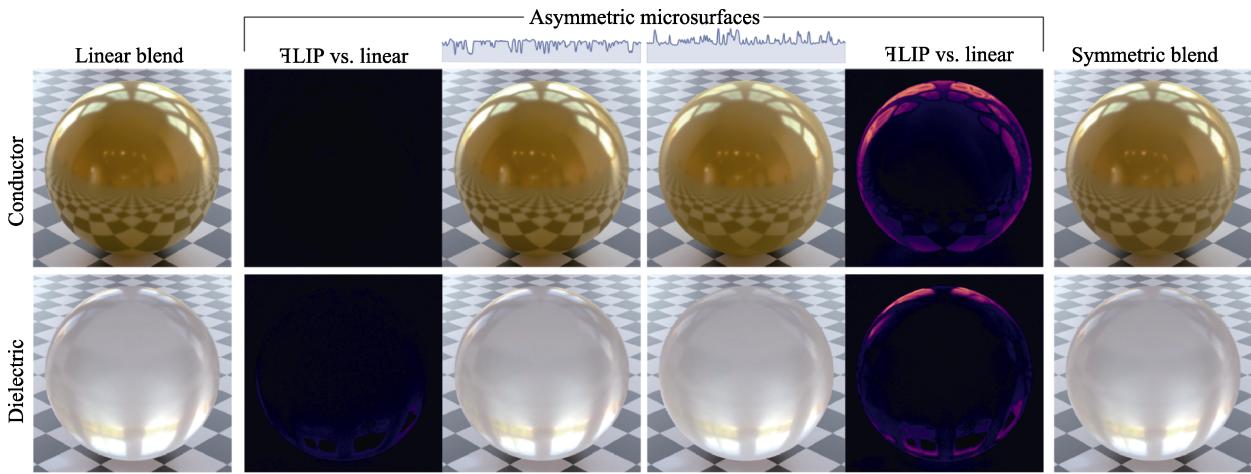


图 4 Heitz 等的 NDF 采样方法渲染效果对比^[14]

Heitz 等^[16]推导了基于 Smith Microfacet 模型的 BSDF 缺失的多次散射部分,如图 5 所示,将 Smith 模型的 Microfacet 散射视为 Microflake 体积散射的特例,通过额外的约束将体积转换为表面,推导得到的 BSDF 是互易的、能量守恒的,并支持流行的各向异性参数化 NDF(如 Beckmann 和 GGX)。

d'Eon 等^[17]扩展了 Smith 模型^[7],提出的粗糙表面反射模型能够高效、准确地模拟来自高度场的多重散射。该模型基于分层 Smith Microfacet 理论,使用组合 NDF 的新方法,利用新的非对称算子支持了高度可变的法线和材质属性。图 6 所示为非对称混合算子使用相同的混合 NDF(粗糙度分别为 0.02 和 0.8 的 GGX)下,创建的 2 个新的 Microfacet BSDF,其中,第 3 列和第 4 列为混合后得到的新 BSDF。

图 5 GGX 分布介质板单次散射与多重散射对比^[16]图 6 非对称混合算子得到新的 BSDF^[17]

Belcour 等^[18]提出一种 Microfacet 理论的扩展, 使用一个 Airy 反射项代替菲涅尔项来体现薄膜干涉导致的虹彩, 能够渲染任意粗糙基底层上不同厚度的薄膜(如油、油脂、酒精等)产生的虹彩效果. 图 7 所示为利用薄膜干涉在皮革材料上呈现了明显的虹彩效果.

得益于 Microfacet 材质的通用性, 工业界广泛使用该模型模拟不同类型的材质. Burley 等^[19-20]先后提出迪士尼原则的 BRDF 和 BSDF, 能够使用统一的一套参数表现包括次表面散射在内的复杂材质外观, 如图 8a 所示.

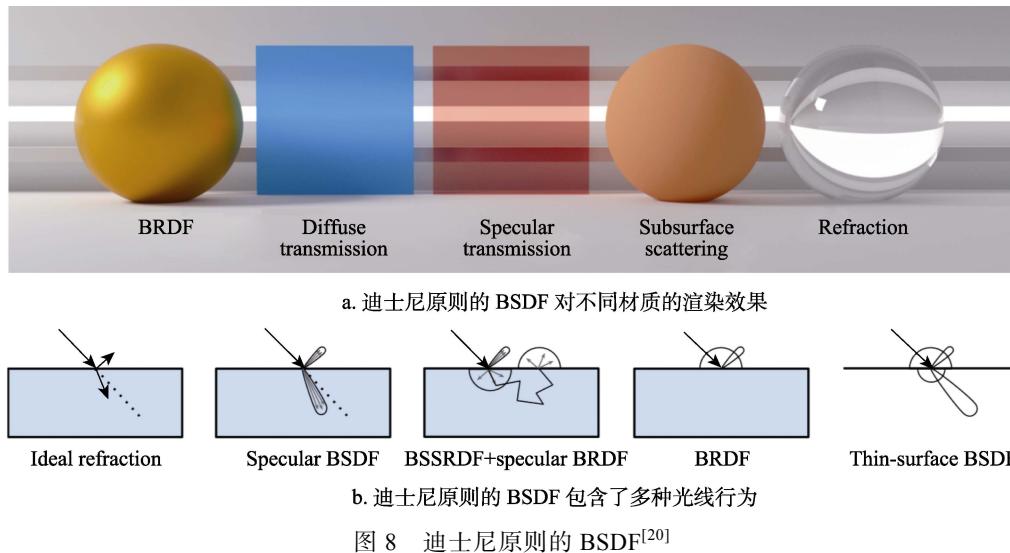
迪士尼原则的 BRDF 和 BSDF 近似处理了光线在物体表面的多种行为, 如图 8b 所示, 其针对

漫反射进行明确的近似, 在 BRDF 中采用标准 Lambert 漫反射模型, 在 BSDF 中则额外增加了次表面散射项. 针对镜面反射, 迪士尼原则的 BRDF 和 BSDF 使用 Microfacet 模型进行处理, 结合对现实世界镜面反射的 NDF 项、G 项和 F 项的观察, 采用包括 GGX^[5], Smith^[7]模型在内的多种近似方案.

1.1.2 Microflake 模型

经典的 Microfacet 模型以及体积模型难以处理像织物、珠光等具有各向异性结构的体积或半透明材质. 为了解决这一问题, Jakob 等^[21]对各向异性的辐射传递方程进行推导, 提出 Microflake 材质模型. 该模型底层反射单元是一个基于双面镜面反射的片状模型, 这些片元被称为“Microflake”.

图 7 皮革材料上薄膜干涉的虹彩效果^[18]

图 8 迪士尼原则的 BSDF^[20]

Microflake 的朝向遵循已知的方向分布信息, 通过模拟这些片元的分布来准确地定义参与介质的各向异性性质。用 Microflake 定义的体积介质具有相位函数 $f_p(\omega_i \rightarrow \omega_o)$ 和方向相关的消光系数 $\sigma_t(\omega)$ 。其中, 相位函数应满足互易性和能量守恒, 即 $\sigma_t(\omega_i)f_p(\omega_i \rightarrow \omega_o) = \sigma_t(\omega_o)f_p(\omega_o \rightarrow \omega_i)$, 且 $\int_{S^2} f_p(\omega_i \rightarrow \omega_o) d\omega_o = 1$; 而消光系数应该是对称的, 即 $\sigma_t(\omega) = \sigma_t(-\omega)$ 。Microflake 模型最开始只用于体渲染, 后续才引入到表面渲染。

图 9 所示为由非球形粒子组成的各向异性参与介质的情况, 其中, 平行于颗粒朝向的光线(右图)受到的阻挡会比垂直于颗粒朝向的光线(左图)少得多, 所以右图对应的消光系数 $\sigma_t(\omega)$ 会较低。

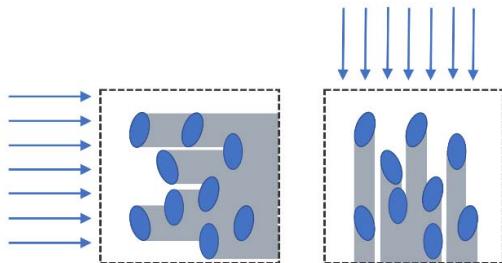
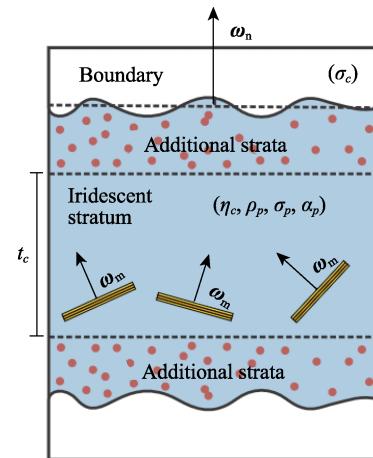


图 9 非球形粒子介质在不同方向的表现

Microflake 模型被证明在表现诸多类型的材质上具有优势。Zhao 等^[22]基于 Microflake 模型构建一个能够处理纤维各向异性的体散射模型, 结合 CT 扫描得到的材质模型参数, 该模型能够成功地表现纤维和织物的细节; Heitz 等^[23]提出对称 GGX(SGGX) 分布来表示各向异性参与介质的空间变化特性, 使 Microflake 分布可以使用 3×3 的正定矩阵有效地进行描述; Loubet 等^[24]扩展了 Microflake

模型, 通过附加参数表征微观尺度的自阴影现象, 所提出的 Microflake 模型能够成功地表现密集树叶和天鹅绒材质, 并能够基于该模型完成准确的体渲染下采样。

Guillén 等^[25]使用分层 Microflake 模型表现珠光材料, 珠光聚合物被建模成介质层的堆叠, 每个介质层充满了由 Microflake 模型表示的各向异性的介质, 该模型再现了珠光材料与光线的交互。图 10 所示为层和板块结构及其关键参数, 其中最下面的附加层是可选的, 并且也可能不是珠光材料。

图 10 珠光分层 Microflake 材质模型示意图^[25]

Wang 等^[26]提出了 SpongeCake 材质模型, 其同样利用分层 Microflake 模型构建, 每层都是体散射介质。SpongeCake 省略了层与层之间的反射和折射界面, 无论体积层的数量多少, 总能得出单次散射的精确解。如图 11 所示, 单次散射的最终结果是光线在不同层中的散射事件结果的总和。而对于多次散射, SpongeCake 模型采用一种近似方法,

通过增加一个带有修改参数的单次散射波瓣以及一个 Lambertian 波瓣来模拟多次散射效应，使用一个参数映射神经网络找到新增加的散射波瓣和 Lambertian 波瓣的参数，以接近多次散射的效果。

Wang 等^[26]证明，利用 SGGX 表示的 Microflake 层和其他具有适当参数的体素层，能够实现许多

常见材质的渲染效果；通过 Microflake 的方向映射还能够实现法线映射效果，从而能够避免标准法线映射中常见的伪影问题；通过不同的参数设置，SpongeCake 能够处理多种类型的材质，如塑料、木材和布料等。图 12 所示为上述 Microflake 模型的渲染效果。

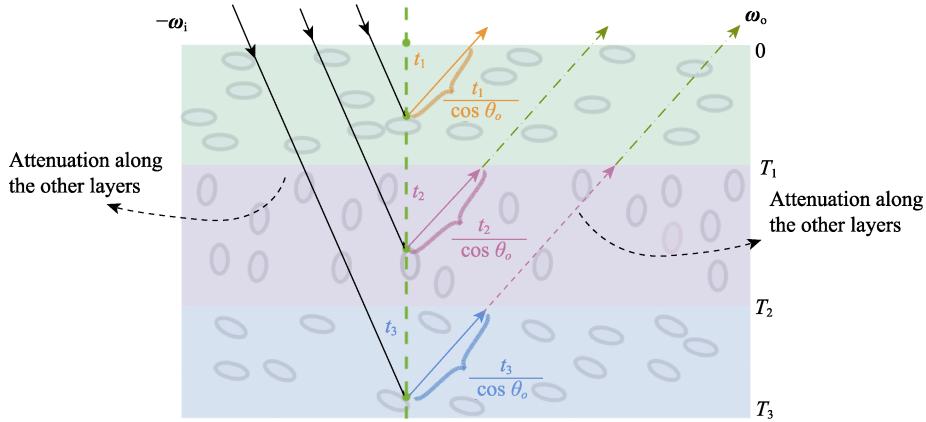


图 11 光线单次散射示意图^[26]

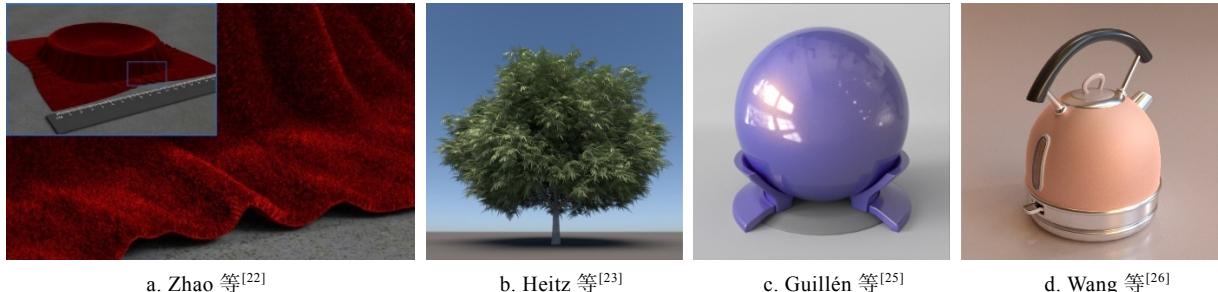


图 12 Microflake 模型的渲染效果

1.1.3 Micrograin 模型

Micrograin 材质模型是一种用于模拟多孔隙材质的高效渲染技术，其建立在物理基础上。与其他基于 Microfacet 或微片元的表示方法不同，该方法明确地模拟了微晶粒的分布，具有将结构和反射特性解耦的优势。

Mérillou 等^[27]率先提出在已定义的 BSDF 模型上增加孔隙度的经验修正方法，考虑圆柱形孔隙，增加了一个与孔隙中的多重反射相对应的漫反射扩散波瓣。Lucas 等^[28]引入一个用于渲染多孔层的新 BSDF 模型，基于椭圆形不透明微晶粒的分布扩展了 GGX 分布^[5,29]以处理孔隙。如图 13 所示，多孔层被建模为不透明的半椭球在任意平整材质上的分布。

Micrograin 模型的目标是描述多孔层和平整材质结合产生的 BRDF，公式为

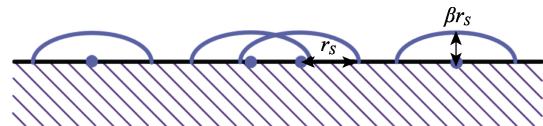


图 13 Micrograin 模型示意图^[28]

$$f_t(\omega_i, \omega_o) = w^+(\omega_i, \omega_o) f_r^S(\omega_i, \omega_o) + (1 - w^+(\omega_i, \omega_o)) f_r^B(\omega_i, \omega_o).$$

其中， $f_r^S(\omega_i, \omega_o)$ 表示多孔层 BRDF 项； $f_r^B(\omega_i, \omega_o)$ 表示平整层 BRDF 项； w^+ 表示从入射方向 ω_i 到出射方向 ω_o 的光路中只与表面微晶粒相互作用的光路比例。

Micrograin 模型利用距离场统计推导出相应的 NDF 和几何衰减系数，并用与视角和光线相关的填充因子来混合多孔层和基底层，与数值模拟相比，所有推导项都显示出极佳的一致性。该模型

解耦了结构参数和反射率参数, 无论选择哪种微粒反射度, 都可以得到光线单次散射的解析解; 其次, 经典纹理贴图(反照率、粗糙度等)很容易与该模型结合使用; 最后, 该模型的 BRDF 参数是线性的, 可以直接使用经典的 Mipmapping^[30]进行多尺度渲染。图 14 所示为一些该模型的材质渲染效果。

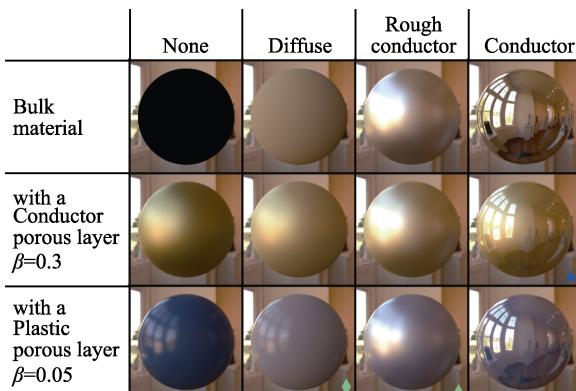


图 14 Micrograin 模型渲染效果^[28]

1.1.4 Layered 材质模型

Layered 材质模型是一种用于模拟具有多层复杂结构的高效模型。对于没有明确界限的复杂材质, 如油漆的涂层、人类皮肤的多层结构等, 难以通过单一的材质模型进行刻画。而利用 Layered 模型可以在一定程度上简化材质的复杂程度, 在不同的层之间模拟光的反射、折射和散射, 实现这些复杂材质的渲染效果。

Layered 材质模型大体分为 3 种类型。

(1) 近似 Layered BSDF 模型。表现物理正确的 Layered 材质外观需要求解复杂的一维辐射传递模型^[31-32]。为了减少计算负担, 大多数 Layered BSDF 模型采用了该模型的近似, 简化了 Layered 材质内部的光线传输计算。例如, 考虑多重散射的高计算开销, 一些 Layered BSDF 模型缺少层内多重散射的适当评估^[31,33], 还有一些模型直接忽略了单一层内的散射事件^[34-38]。

Layered 材质模型中的一个代表性成果是 Belcour^[39]提出的统计方法, 将表面反射率近似为由方向反射率、入射方向和粗糙度得出的多波瓣的总和。如图 15 所示, Layered BSDF 的方向统计量(能量、平均值和方差)通过投影平面表示。后续的许多工作致力于扩展该统计方法来处理各向异性^[40-41]、漫反射表面^[42]或任意散射体积^[43]。

(2) 基于预计算的 Layered BSDF 模型。通用 Layered BSDF 模型的设计难点在于正确计算 Layered 结构内的多重散射。实现高效地评估的一

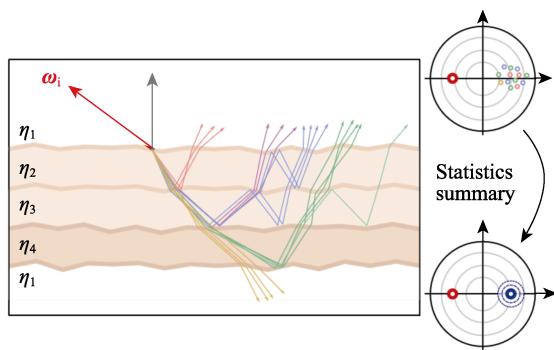


图 15 Layered BSDF 的反射方向统计^[39]

种可行方案是预算算材质的角度分布, 并将其紧凑存储。Jakob 等^[44]提出首个基于预算的通用 Layered BSDF 模型, 将 Layered 材质 BSDF 视为层运算符和界面运算符的组合, 如图 16 所示。该模型依赖昂贵的傅里叶基函数制表来表达反射方程, 可认为是 Stam^[45]提出的离散方法的扩展。Ergun 等^[46]基于该模型进行扩展, 能够根据油漆成分生成汽车油漆的外观; Zeltner 等^[47]后来又扩展了该系统, 使其支持各向异性表面。尽管这些模型在运行时精度高、效率高, 但由于每个材料的预算时间长、存储开销大, 因此它们对于空间变化的结构通常并不实用; 同时, 预算模型还很容易出现振铃伪影, 在从掠射角方向观察时尤为明显。

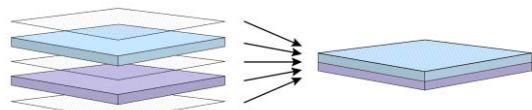


图 16 通用 Layered BSDF 模型示意图^[44]

(3) 随机游走 Layered BSDF 模型。另一种用于准确评估具有任意成分的 Layered BSDF 的策略是使用蒙特卡罗模拟, 其自然考虑了所有可能的光传输路径^[48], 能够得到准确无偏的渲染结果。但由于大量散射发生在层界面或内部介质层, 蒙特卡罗模拟直接用于 Layered 材质的渲染成本过高。Guo 等^[49]提出一种无位置的蒙特卡罗方法, 将 Layered BSDF 定义为对路径集合的积分

$$f_l(\omega_i, \omega_o) = \int_{\Omega(\omega_i, \omega_o)} f(\bar{x}) d\mu(\bar{x}).$$

其中, \bar{x} 表示光路; $f(\bar{x})$ 表示光路贡献率; $\Omega(\omega_i, \omega_o)$ 是符合起始方向 $-\omega_i$ 和结束方向 ω_o 的光路集合; $\mu(\bar{x})$ 表示光路的空间度量。该方法利用针对 Layered 材料上下文的路径空间简化方法, 具有一定的通用性, 但存在高方差和收敛时间长的问题。图 17 所示为无位置的蒙特卡罗方法的渲染结果, 还

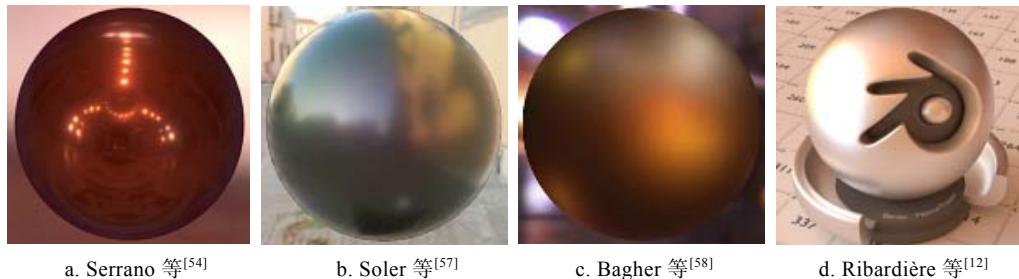
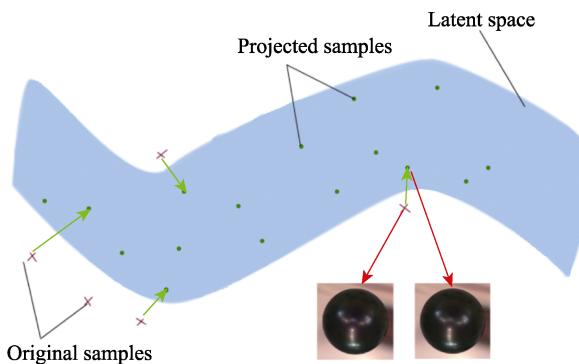


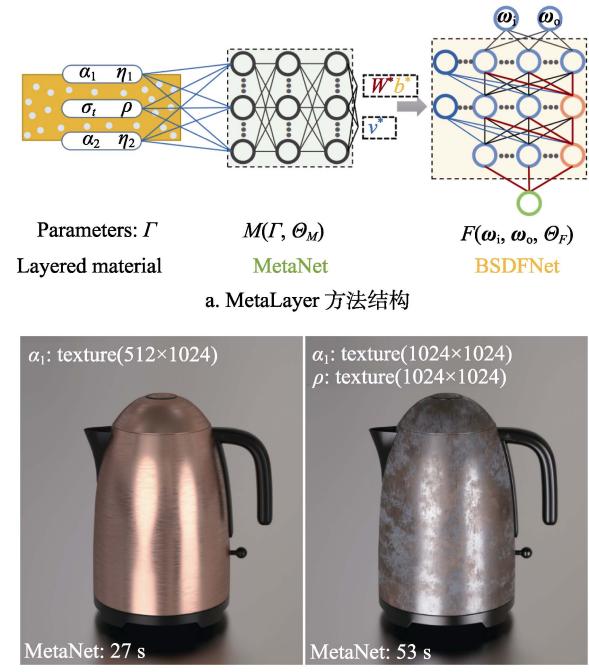
图 18 基于数据驱动的传统方法的渲染效果展示

端到端训练的神经网络可以从一张或少量输入图片中恢复物理上可信的材质图^[59-60]. 受到卷积神经网络的启发, Hu 等^[61]采用深度自动编码器学习高维 BRDF 数据集中测量数据的潜在空间, 如图 19 所示. 自动编码器以测量所得 BRDF 的完整数据作为输入, 通过将瓶颈层限制为低维度, 实现了对测量所得 BRDF 数据集的降维目标.

图 19 潜在空间映射关系示意图^[61]

Kuznetsov 等^[62]将传统的 Mipmapping 方法^[30]中的纹理金字塔推广到神经纹理金字塔, 并结合全连接网络实现对材质的 7 维查询, 包括位置、传入和传出方向, 以及所需的滤波器内核大小等, 从而将传统 Mipmapping 方法推广到法线、自阴影、纤维或更复杂的微观结构上. MetaLayer 方法^[63]则引入元学习的思想, 其中包含 1 个 BSDFNet 结构和 1 个 MetaNet 结构. 如图 20a 所示, BSDFNet 将 Layered 材质编码为隐式神经表达, 而 MetaNet 则建立每种材质的物理参数与其相应神经表示的权重之间的映射. 这种权重生成方案允许跨网络层共享权重, 保留材质的高频光照信息, 同时支持材质编辑.

在基于端到端训练的材质渲染中, 研究人员引入一种用神经网络辐射场(neural radiance fields, NeRF)表示方法. ReRF-Texture 方法^[64]将场景分解为微观结构纹理和底层基本形状, 使用底层基本

图 20 MetaLayer 方法的示意图与效果图^[63]

形状上的潜在特征来有效地学习具有微观结构的纹理, 并将这些特征输入到同时训练的 NeRF 解码器中, 以表达丰富的材质外观.

第 2 类基于深度学习的方法利用材质数据中的低维潜在空间, 智能地降低材质表达的部分信息量, 包括基于测量的 BRDF^[61,65-66]、空间变化的 BRDF(SVBRDF)^[67-68]、双向纹理函数(BTF)^[62,69-70]等材质表达方式.

Fan 等^[65]提出一套 BRDF 框架, 使用神经网络将不同的 BRDF 转化为相应的潜在向量表示, 然后使用一个分层神经网络对潜在向量执行分层操作. 通过分层神经网络取代昂贵的随机游走, 为 Layered BRDF 提供了一种简单、无噪声且高效的评估方案. Kuznetsov 等^[71]提出一种能够正确地处理材质轮廓和视差效果的神经网络架构, 将表面曲率信息作为输入, 同时对神经网络查询得到的

输出进行扩展，除反射率外还返回透明度值，可以正确地渲染出材质的轮廓效果以及复杂的微观信息。使用特定神经网络压缩原始高维材质数据后，将其映射到低维潜在子空间；但这些潜在空间通常缺乏物理参数，无法进行直观的材质编辑或有效的逆渲染^[72]。

1.2.3 数据驱动材质模型与参数材质模型对比

与基于解析或统计的参数材质模型相比，数据驱动材质模型编码了真实世界的材质，更好地保证了材质的物理真实性。因为不需要运行时通过计算模拟光线与表面的交互，计算效率比解析模型高且稳定，不会因为如消光系数等参数的变化而变低。数据驱动材质模型也有着很多弊端，如存储消耗大，即使这些模型都对数据进行了压缩，但相比只需要存参数的参数材质模型仍需要大量存储空间。

基于真实世界数据的模型难以编辑调整，虽然有些工作提供了可编辑的参数^[61]，但这些参数不是很直观，难以交给美工来使用。由于基于深度学习的方法无法保证材质模型的能量守恒，因此网络可能会产生无法预料的误差。

目前材质测量的数据仍然较为缺乏^[73]，导致很难生成泛化性较高的模型，因此模型表达的材质空间并不能超出数据库内的那些材质。特别是 Layered 材质因为缺乏测量数据，许多工作拟合的是参数材质模型生成的结果^[61,63,65]，或者是用几何加光线追踪来模拟的目标材质^[62,71]，它们与真实世界的材质有着一定的差别。

2 特殊材质模型

虽然通用材质模型能够真实地模拟自然界中大部分材质的外观效果，但是它们简化了许多复杂材质的模型建构，对于一些特殊的材质，基于简化假设的通用材质模型的表现力就显得不足。特殊材质往往有许多复杂空间细节，如毛发的圆柱状多层结构、布料的层次编织结构、亮片材质的闪烁复杂细节、颗粒材质的多重颗粒堆叠结构，需要从建模角度加入考虑才能表现出更真实的材质效果；而皮肤材质主要涉及光线进入物体内部的次表面散射，用基于近表面光线交互的通用材质模型也是难以表达的。对于这些材质，可以采用定制化的建模手段获得更精准和高效的外观效果模拟。本节介绍几种针对这些特殊材质的高效模型。

2.1 毛发材质

目前，毛发渲染的主流方式是基于 Marschner 等^[74]提出的模型，其将毛发建模为粗糙电介质圆柱体，将光线与毛发的交互分解为多个散射波瓣，如图 21 所示。该模型将光线方向分解为极角与方位角上的散射，计算方式为

$$f(\omega_i, \omega_o) = M(\theta_i, \theta_o)N(\phi_d)A(\omega_i, \omega_o).$$

其中， ω_i 与 ω_o 分别表示光线入射方向与出射方向； θ_i 与 θ_o 表示光线入射方向与出射方向在圆柱体侧面上的投影角度，也称纵向角； ϕ_i 与 ϕ_o 表示光线入射方向与出射方向在圆柱体横截面上的投影角度，也称方位角； M 项表示纵向散射函数，并用高斯函数建模纵向散射，通过实际出射角度与理想光滑情况的出射角度的差计算 BSDF，粗糙度作为高斯函数的方差，d'Eon 等^[75]指出，使用高斯函数并不满足能量守恒，为此提出一种能量守恒并且易于采样的纵向散射函数； N 项表示方位散射函数，这是从圆柱体模型的横截面方向考虑的散射，由于横截面被认为是圆形，方位散射只依赖于入射方位角 ϕ_i 和出射方位角 ϕ_o 的夹角 $\phi_d = |\phi_o - \phi_i|$ ，方位散射函数使用高斯函数建模，针对基于高斯的方位散射存在计算慢、无法以解析的方式进行积分和逆采样的问题，Chiang 等^[76]提出基于逻辑斯谛分布函数的方位散射函数； A 项代表光线在毛发内部被介质吸收的部分，其假设毛发内部是均匀介质，毛发的颜色就是由内部介质属性决定。

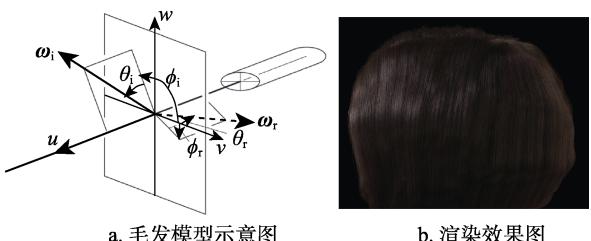


图 21 Marschner 等^[74]提出的毛发模型

在 Marschner 等^[74]模型的基础上，Yan 等^[77]提出双圆柱毛发模型，引入新的散射波瓣来模拟更真实的动物毛发。如图 22a，该模型考虑了毛发内部的髓质，髓质引入了新的光线反射和传输路径。与人类头发相比，动物毛发的髓质成分更多，外观更柔和。该模型可以捕捉到动物毛发中明显的扩散与饱和的外观，这是传统毛发渲染模型无法做到的，如图 22b 所示。Xia 等^[78]提出了基于波动光学的毛发渲染模型，从光线在毛发表面散射的波动属性出发，可以渲染毛发上的彩色闪光。

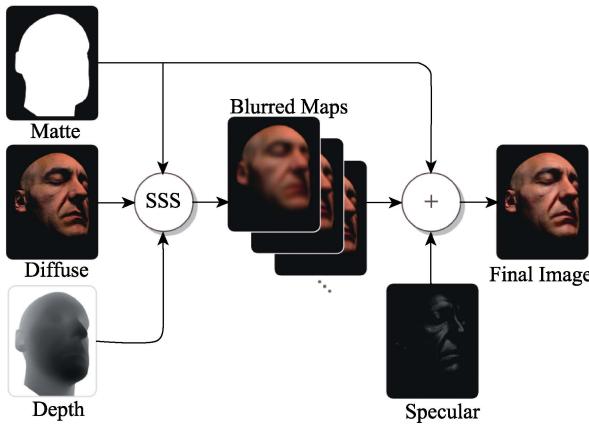


图 24 屏幕空间次表面散射算法流程示意图^[85]

流程示意图。在计算时，该算法对标记的像素做若干次高斯卷积操作，卷积核大小根据像素深度及其导数确定。

2.3 布料材质

布料渲染涉及不同方面，包括几何表示、着色模型、外观捕捉和匹配以及层次结构；其中，着色模型分为基于曲线和基于表面 2 类。基于曲线的模型直接对组成织物的丝线进行建模，用曲线形式地生成布料的几何结构，可以直接控制每根丝线的颜色和光泽度属性，从而渲染出精确的编织结构；但是，这些复杂细节带来了大量存储需求和算力需求，难以快速进行有效的渲染。基于表面的模型则将布料建模为一个二维平面，将复杂的光线几何交互效果用 BRDF 或 BSDF 等表面模型表示，再利用纹理来表达丝线结构，可以有很高的渲染效率；但是，这种建模方式缺乏较多细节，如丝线之间的阴影遮蔽，渲染的真实感相对较弱。

Sadeghi 等^[86]通过测量不同布料的散射特性，提出一种基于曲线的布料渲染模型，将布料建模为一组曲线，将散射分解为表面散射项和介质散射项，图 25 所示为该模型渲染效果。其中，表面散射项公式为

$$f_{r,s}(t, \omega_i, \omega_r) = F_r(\eta, \omega_i) \cos(\phi_d/2) g(\gamma_s, \theta_h);$$

介质散射项公式为

$$f_{r,v}(t, \omega_i, \omega_r) = F_t(\eta, \omega_i) F_v(\eta', \omega_r) \cdot \frac{(1-k_d) g(\gamma_v, \theta_h) + k_d}{\cos \theta_i + \cos \theta_r} A.$$

其中， t 表示布料线条切线方向； F_r 和 F_t 分别表示表菲涅尔的反射与折射项； ϕ_d 表示光线在圆柱体横截面的投影方位角； g 表示高斯函数； γ_s 与 γ_v 分别表示表面散射与介质散射中的高斯函数参数， k_d 表示一个可调节的各向同性参数； A 表示一个



图 25 Sadeghi 等^[86]的布料模型渲染图

可调节的颜色参数； θ_i 与 θ_r 分别表示光线的入射方向与出射方向在圆柱体侧面的投影纵向角。

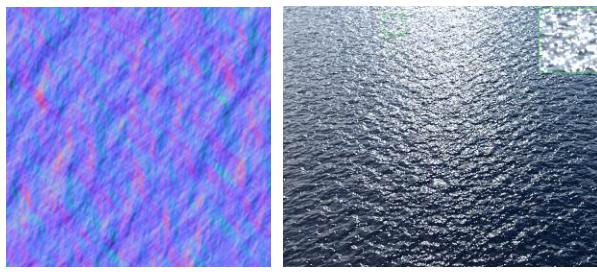
Zhao 等^[87-88]利用单个图案样例来还原具有重复图案的布料，并提出一种基于预算布料渲染方式，利用布料的可重复性和运行时动态生成布料结构，加快了渲染速度。

Irawan 等^[89]采用基于表面的方式渲染布料，尽管这种模型描绘了一些重要的布料特征，如各向异性高光，但它缺乏包括阴影和遮蔽效应以及透射在内的重要特征。Zhu 等^[90]提出一种基于表面的布料着色模型，与其他基于表面的模型相比，该模型可以处理更多的布料类型，包括针织和薄织布料；并考虑布料的多种高光和阴影遮蔽效果，由一个微观尺度上用于建模层级散射和透射的 BSDF 模型，和一个介观尺度上精确处理阴影遮蔽的 BSDF 模型组成。朱浩栋等^[91]针对内嵌金属丝、侧光织物、镭射和闪粉 4 种布料，提出了一系列针对性的模拟与修正方法；并分别探索了记录和模拟金属丝形状的额外纹理数据、修正侧光织物散射光强度的方法、将镭射颜色与观察角相关联的技术，以及随机生成闪粉位置的计算模型，这些方法在提高服装面料数字化渲染真实感方面都取得了显著进展，如图 26 所示。

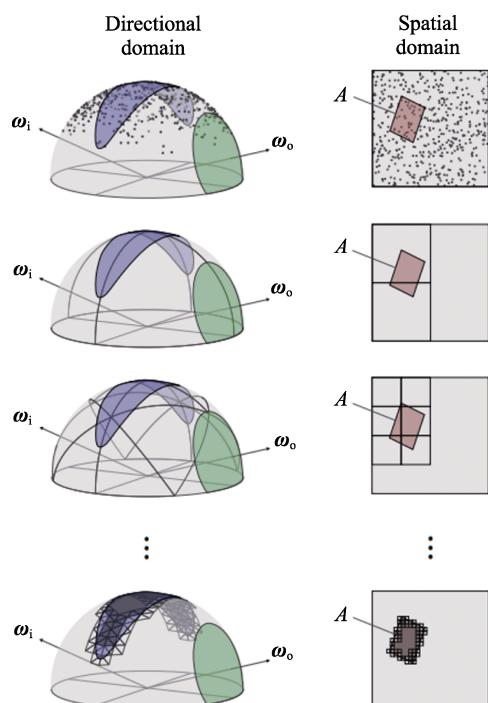
在实时渲染中，Wu 等^[92]提出一种纤维级别的



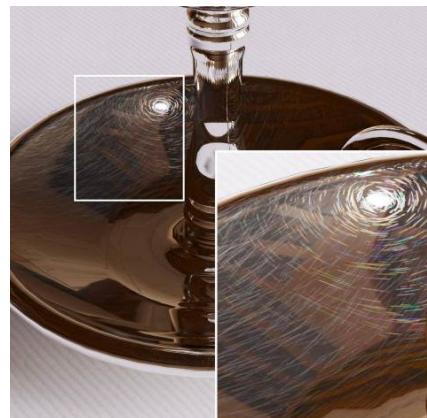
图 26 朱浩栋等^[91]的布料模型渲染图

图 30 显式模型的法线贴图和效果图^[95]

模型，通过一个随机模型生成产生亮片效果的薄片。如图 31 所示，给定光线入射方向和出射方向后，通过不断地在空间和方向上进行细分，确定目标区域内的法线方向分布。该模型可产生闪光和空间噪声，在不同的光照条件和观看距离下均能表现正确，并具有时间连续性，能够在运动中表现正确。Zirr 等^[99]将 Jakob 等^[93]的模型引入实时渲染。Raymond 等^[100]用噪声函数产生划痕的分布来建模划痕材质。Kuznetsov 等^[101]则使用生成对抗网络(generative adversarial network, GAN)生成 patch-NDF 分布。

图 31 Jakob 等^[93]的模型示意图

由于亮片材质的细微结构尺度较小，因此导致光的衍射等现象。Werner 等^[102]基于用线性方程组表达表面散射行为的 Harvey-Shack 理论提出一种材质模型，用于建模划痕材质上的彩虹颜色，如图 32 所示。Guo 等^[103]在随机离散 Microfacet 模型^[93]的基础上

图 32 Werner 等^[102]的衍射亮片材质模型效果图

上建模薄膜干涉的效果。Yan 等^[104]基于波动光学对由离散高度场刻画的镜面微结构构建着色模型。

2.5 颗粒材质

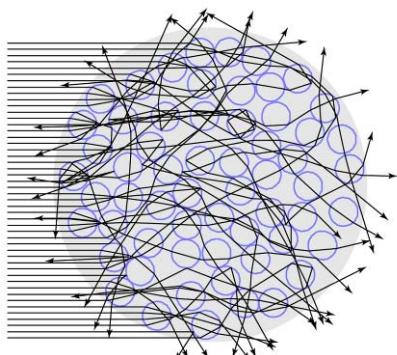
颗粒材质在现实世界中十分常见，如雪、沙子、盐等，如图 33 所示。不同于一般的表面材质，这些材质通常由大量细小颗粒堆叠构成；且不同于传统介质渲染中对散射颗粒的尺度假设，颗粒材质中的颗粒尺寸通常被认为是肉眼可见的。因此，如何在多尺度上对颗粒材质进行建模与渲染，是该材质的研究热点。

图 33 颗粒材质效果图^[105]

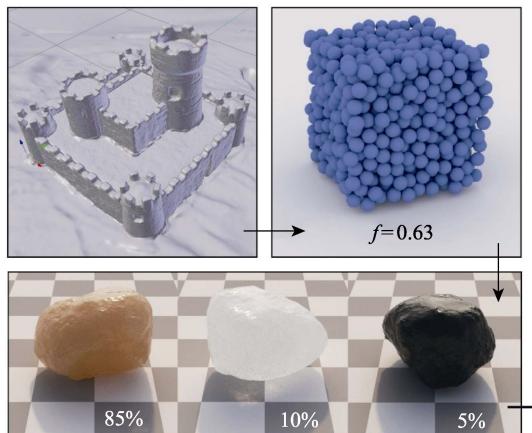
Moon 等^[106]首次提出颗粒材质渲染的问题，将由大量紧密堆积的散射体组成的结构称为离散随机介质，如图 34 所示。由于颗粒的肉眼可见性，传统的介质渲染方法并不适用。为了避免对组成颗粒材质的颗粒进行显式的光线追踪，通过预计算，将颗粒材质中的光线传输统计性质记录在壳传输方程(shell transport functions, STFs)中，公式为

$$T_r(x, \omega; y, \omega') = p((y, \omega') | (x, \omega)).$$

其中， T_r 表示半径为 r 的 STF，可以理解为光线在颗粒材质中从点 x 向方向 ω 传播，经过在颗粒中的传播过程，最终在点 y 处向方向 ω' 传播时首次离开以 x 为球心、 r 为半径的球的概率。

图 34 颗粒材质示意图^[106]

针对 Moon 等^[106]的方法需要对每种颗粒材质进行单独的预计算的问题, Meng 等^[107]提出一种对颗粒材质进行程序化建模的方法, 通过指定不同类型颗粒的几何、材质性质和密度, 对颗粒材质在多个尺度上的散射性质进行描述; 同时, 根据条件在 3 种光线传输模型中自动切换(显式路径追踪、体积路径追踪和基于扩散的近似), 以达到多尺度上的高效渲染, 如图 35 所示。为了保证细节的可见性, 该方法需要在低阶散射时对颗粒材质中的颗粒进行显式光线追踪, 导致出现性能瓶颈的问题。为了解决这个问题, Müller 等^[105]提出 PPT (proxy path tracing) 方法, 同时对 Meng 等^[107]的方法进行拓展, 支持颗粒材质的参数(如不同颗粒的密度、堆积率及尺寸等)随时间和空间发生变化。Zhang 等^[108]则提出改进方法, 支持颗粒性质的连续性变化与空间上复杂的非均匀分布。

图 35 颗粒材质程序化建模方法示意图^[107]

3 材质模型的高效渲染方法

真实感渲染不仅对模拟光线与物质相互作用的材质模型精度要求很高, 还需确保这些模型能

够被高效地渲染。虽然求解渲染方程中的积分时, 被积函数中包含着色点材质的散射属性, 但是完全独立于材质模型求解积分在很多情况下会效率低下。这促使人们针对材质模型开发特定的采样策略, 或采用预过滤技术来近似估计某一区域内的积分值, 以优化渲染流程的整体性能。

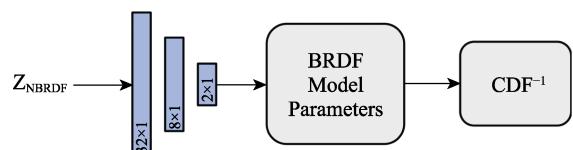
3.1 点采样

蒙特卡罗方法通常要求材质在某个着色点处可以对入射光线方向进行重要性采样, 且采样分布 p 与 BSDF f_s 近似成正比

$$p(\omega_i | \mathbf{x}, \omega_0) \propto f_s(\mathbf{x}, \omega_i, \omega_0).$$

其中, \mathbf{x} 表示着色点, ω_i 和 ω_0 表示出射和入射方向。重要性采样对于实现高效的无偏渲染至关重要, 除非材质非常粗糙, 否则使用均匀采样会导致较高的估计方差。

显式模型通常可以按照解析公式进行重要性采样, 而隐式材质模型则无法使用这样的方式, 所以设计隐式材质模型的采样策略是一个重要的问题。一些工作用若干解析的波瓣来拟合 BSDF, 以这些波瓣为概率密度函数(probability density function, PDF)进行采样实现对 BSDF 的重要性采样。Sztrajman 等^[109]对每个空间位置拟合一个 Blinn-Phong 模型, 从局部特征向量通过神经网络预测参数。如图 36 所示, 将材质的潜在代码 Z_{NBRDF} 通过多层感知器(multilayer perceptron, MLP)预测一个 Blinn-Phong 模型的参数来拟合材质, 进而解析地计算逆累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)。Fan 等^[65]对每个空间位置和入射角度拟合一个 Lambertian 和一个各向同性高斯波瓣的混合模型, 能准确地拟合更多类型的材质。Xu 等^[110]将模型进一步扩展为使用一个 Lambertian 和 2 个轴对齐各向异性高斯波瓣, 并且直接通过最大化样本似然进行训练, 在增强模型表达能力的同时避免了预定义的学习指标的限制。

图 36 Sztrajman 等^[109]方法示意图

还有一些工作使用一种可逆生成模型正则化流方法^[111], 学习一个简单基本分布和目标分布之间的相互映射, 并用其进行采样。Xie 等^[112]用带有条件仿射变换的正则化流拟合多次散射的 Microfacet

对于材质的渲染, 通常的预算算方法是对材质贴图进行预过滤, 允许对贴图的范围采样, 直接获取像素覆盖范围的平均结果。

Mipmapping 方法^[30]就是典型的预过滤方法, 通过预先过滤原始纹理贴图来生成一系列不同分辨率大小的贴图, 在渲染时, 根据相机和表面的距离选择合适的贴图。但是, 直接对贴图进行过滤, 再在过滤后的结果上计算局部光照方程是不精确的。因为光照方程是非线性的, 涉及自遮蔽、自阴影、反射方程等因素, 所以很多工作采用了更复杂的预过滤方法来应对这个非线性的问题。

传统的线性 Mipmapping 方法不能很好地处理非线性的 BRDF 和法线贴图。LEAN 方法^[123]利用 Beckmann Microfacet 模型的高斯分布数学性质进行过滤。Xu 等^[124]用 vMF 分布表示每个像素的有效 BRDF, 利用这种表示的线性性质对这些

分布进行插值, 实现 Mipmapping。但是, 传统预过滤方法^[124-128]都忽略了自遮蔽和自阴影效果。LEADR^[129]是 LEAN 方法的扩展, 其中加入从 Microfacet 模型推导的阴影遮蔽项, 提升了材质渲染结果的真实感。Wu 等^[130]用三角网格建模小尺度几何, 通过在网格面上随机采样并计算采样点的可见性, 实现了考虑遮蔽和阴影的材质过滤。

Wu 等^[131]利用一种新型 SVBRDF 表示, 针对引入位移映射定义几何细节的表面材质进行预过滤处理, SVBRDF 被分解为一个空间变化 NDF(SVNDF)和一个缩放函数, 可以在降低位移贴图分辨率的同时, 准确地获得微观上阴影、遮蔽及内反射效果的变化; 这个缩放函数原本是六维的, 他们进一步提出一种分解方法, 将其分解成二维的空间函数和四维的方向函数, 减少了计算和存储开销, 如图 38 所示。

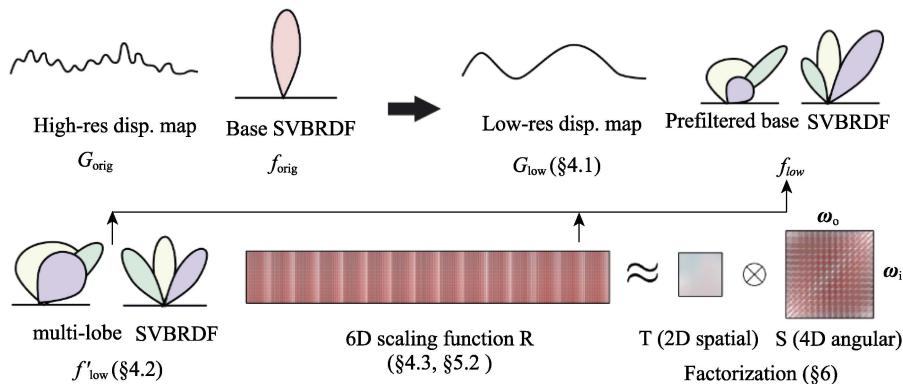


图 38 位移映射材质预过滤方法示意图^[131]

Atanasov 等^[132]把半法向空间进行分箱, 将过滤问题转变成积分直方图的计算, 并且提出逆向分箱映射方法来解决传统积分直方图的内存占用问题。该工作可以用于任意粗糙度的 Beckmann Microfacet 模型, 并且渲染速度比以往工作也有显著提升, 如图 39 所示。

对于 SVBRDF, 高童等^[133]综合考虑 SVBRDF 贴图中各个分量的贡献度进行过滤, 以及纹素整

体的最终渲染贡献, 在混合 vMF 分布上加入权重分量来拟合法向的分布, 权重由漫反射和高光反射的亮度之和定义; 还改进了 k 中心算法, 使生成的 Mipmap 中每个层级都更加接近原始贴图。

3.2.2 神经预过滤

得益于神经网络强大的表达能力, 利用神经网络进行的材质纹理预过滤方法已经能够生成很高质量的结果。受到经典的 Mipmapping 方法^[30]启发, 许多神经预过滤方法都以此作为起点。Vaidyanathan 等^[134]将潜在向量组织为特征金字塔结构, 包含多个特征级别, 在每个特征级别中由 2 个不同分辨率的特征网格存储潜在向量; 每个特征级别实际负责表示多个实际的 mip 级别, 在查询时从特征网格中获取潜在向量, 交给一个负责全部 mip 级别的全局解码器来解码得到实际使用的纹理数据。这种做法同样会导致各级各纹素之间的不连续性, 因此该工作使用随机过滤方法而不是插值, 避免



图 39 Atanasov 等^[132]的预过滤方法渲染对比

了三线性插值导致多次采样的开销。图 40 所示为施加不同滤波方法的结果。



图 40 使用不同滤波方法的对比^[134]

同样是基于 Mipmapping 的思想, Gauthier 等^[135]针对法线贴图在较高 mip 级别中丢失细节的问题, 提出使用神经网络将法线贴图的信号转换为各向异性的粗糙度表示, 使用 2 个 MLP 对纹理进行下采样, 迭代地生成下一级神经纹理, 而在查询时使用三线性插值。

神经材质已经成为一种高效表达材质模型的常见做法。为了高效地在不同尺度上渲染时尽可能地保留材质的细节表现, 人们逐渐开始重视对神经材质的预过滤处理。

Fan 等^[65]把每组纹素(指一组纹理每个层级中都取同一个纹理坐标的纹素)的参数所确定的 BRDF 都转换成潜在向量, 最终组成一个潜在纹理; 之后按照传统 Mipmapping 方法生成潜在纹理金字塔并在渲染时用于过滤。Kuznetsov 等^[62]用不同层级的神经纹理组成的神经纹理金字塔代替先

前的编码器结构, 在训练时优化金字塔中的每层神经纹理, 而不是像传统方法那样通过计算均值得到下一级纹理。经典 Mipmapping 方法要求进行插值的纹素之间具有一定的连续性, 而训练出来的神经纹理金字塔结果实际上在各层和各纹素之间是独立的, 导致渲染时会产生很多噪声; 为此, 该方法额外在每轮训练时对神经纹理施加一次高斯模糊, 并随训练过程动态地调整模糊程度, 最终实现了较高质量的材质表示, 其效果如图 41 所示。

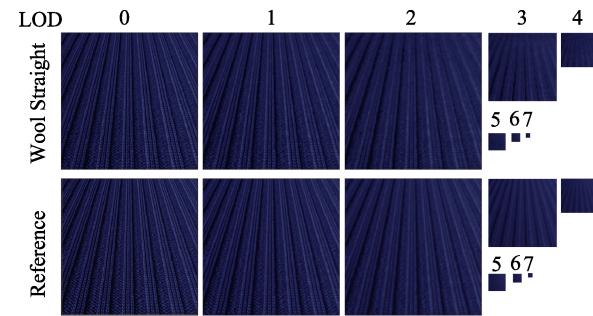


图 41 NeuMIP(上)和参考基准(下)对比^[62]

Baatz 等^[136]用 NeRF 的思想处理表面材质, 概念上类似于体积纹理, 实现了对草地、毛发等复杂材质的高效表示和预过滤。如图 42 所示, 通过在网络结构中额外引入滤波半径作为输入, 并在训练时通过光线微分方法得到需要的滤波半径, 同时对参考图片施加相应的模糊处理作为训练目标, 最终效果与 NeRF 相关变种 Mip-NeRF^[137]相当, 如图 43 所示。

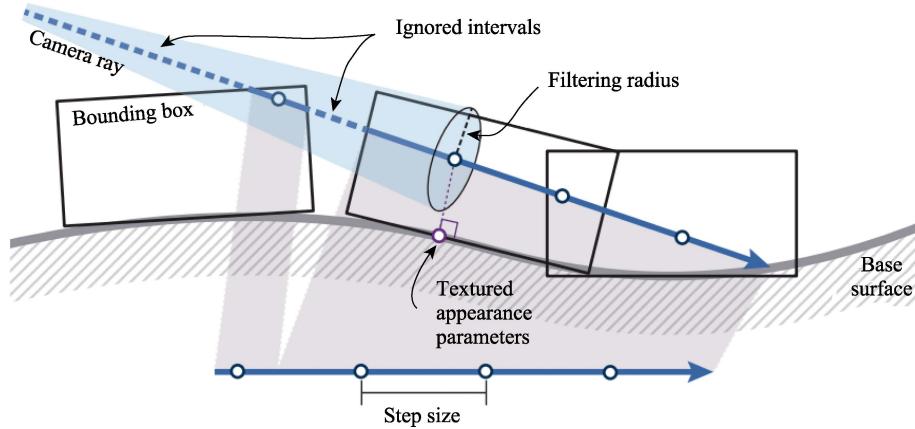


图 42 考虑滤波半径的光线步进过程示意图^[136]

结合神经网络和稀疏体素网格表达整个场景尺度下的材质模型时, 还可以借助远场假设实现预过滤^[138-139], 即假定一个体素的位置是充分远的, 让网络学习这个体素的相关贡献时可以认为

仅与方向有关, 最终得到的网络实际上正好是表示了体素贡献在空间上的一种平均; 结合不同分辨率的体素网格, 整个系统就具有了对场景材质预过滤的能力。Weier 等^[138]使用稀疏体素存储场景

- 10th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 1983: 1-11
- [31] Hanrahan P, Krueger W. Reflection from layered surfaces due to subsurface scattering[C] //Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 1993: 165-174
- [32] Pharr M, Hanrahan P. Monte Carlo evaluation of non-linear scattering equations for subsurface reflection[C] //Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 2000: 75-84
- [33] Gu J W, Ramamoorthi R, Belhumeur P N, et al. Dirty glass: rendering contamination on transparent surfaces[C] //Proceedings of the 18th Eurographics Conference on Rendering Techniques. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2007: 159-170
- [34] Dai Q, Wang J P, Liu Y M, et al. The dual-microfacet model for capturing thin transparent slabs[J]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(7): 1917-1925
- [35] Guo J, Qian J H, Guo Y W, et al. Rendering thin transparent layers with extended normal distribution functions[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2017, 23(9): 2108-2119
- [36] Weidlich A, Wilkie A. Arbitrarily layered micro-facet surfaces[C] //Proceedings of the 5th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australia and Southeast Asia. New York: ACM Press, 2007: 171-178
- [37] Weidlich A, Wilkie A. Exploring the potential of layered BRDF models[C] //Proceedings of the ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Courses. New York: ACM Press, 2009: Article No.7
- [38] Weidlich A, Wilkie A. Thinking in layers: modeling with layered materials[C] //Proceedings of the SIGGRAPH Asia 2011 Courses. New York: ACM Press, 2011: Article No.20
- [39] Belcour L. Efficient rendering of layered materials using an atomic decomposition with statistical operators[J]. ACM Transactions on Graphics, 2018, 37(4): Article No.73
- [40] Weier P, Belcour L. Rendering layered materials with anisotropic interfaces[J]. Journal of Computer Graphics Techniques, 2020, 9(2): 37-57
- [41] Yamaguchi T, Yatagawa T, Tokuyoshi Y, et al. Real-time rendering of layered materials with anisotropic normal distributions[C] //Proceedings of the SIGGRAPH Asia 2019 Technical Briefs. New York: ACM Press, 2019: 87-90
- [42] de Dinechin H, Belcour L. Rendering layered materials with diffuse interfaces[J]. Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques, 2022, 5(1): Article No.13
- [43] Randrianandrasana J, Callet P, Lucas L. Transfer matrix based layered materials rendering[J]. ACM Transactions on Graphics, 2021, 40(4): Article No.177
- [44] Jakob W, d'Eon E, Jakob O, et al. A comprehensive framework for rendering layered materials[J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(4): Article No.118
- [45] Stam J. An illumination model for a skin layer bounded by rough surfaces[C] //Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques 2001. Heidelberg: Springer, 2001: 39-52
- [46] Ergun S, Önel S, Öztürk A. A general micro-flake model for predicting the appearance of car paint[C] //Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering: Experimental Ideas & Implementations. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2016: 65-71
- [47] Zeltner T, Jakob W. The layer laboratory: a calculus for additive and subtractive composition of anisotropic surface reflectance[J]. ACM Transactions on Graphics, 2018, 37(4): Article No.74
- [48] Novák J, Georgiev I, Hanika J, et al. Monte Carlo methods for physically based volume rendering[C] //Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2018 Courses. New York: ACM Press, 2018: Article No.14
- [49] Guo Y, Hašan M, Zhao S. Position-free Monte Carlo simulation for arbitrary layered BSDFs[J]. ACM Transactions on Graphics, 2018, 37(6): Article No.279
- [50] Xia M Q, Walter B, Hery C, et al. Gaussian product sampling for rendering layered materials[J]. Computer Graphics Forum, 2020, 39(1): 420-435
- [51] Gamboa L E, Gruson A, Nowrouzezahrai D. An efficient transport estimator for complex layered materials[J]. Computer Graphics Forum, 2020, 39(2): 363-371
- [52] Nielsen J B, Jensen H W, Ramamoorthi R. On optimal, minimal BRDF sampling for reflectance acquisition[J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(6): Article No.186
- [53] Xu Z X, Nielsen J B, Yu J Y, et al. Minimal BRDF sampling for two-shot near-field reflectance acquisition[J]. ACM Transactions on Graphics, 2016, 35(6): Article No.188
- [54] Serrano A, Gutierrez D, Myszkowski K, et al. An intuitive control space for material appearance[J]. ACM Transactions on Graphics, 2016, 35(6): Article No.186
- [55] Matusik W, Pfister H, Brand M, et al. A data-driven reflectance model[J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 759-769
- [56] Wills J, Agarwal S, Kriegman D, et al. Toward a perceptual space for gloss[J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(4): Article No.103
- [57] Soler C, Subr K, Nowrouzezahrai D. A versatile parameterization for measured material manifolds[J]. Computer graphics forum, 2018, 37(2): 135-144
- [58] Bagher M M, Soler C, Holzschuch N. Accurate fitting of measured reflectances using a shifted gamma micro-facet distribution[J]. Computer Graphics Forum, 2012, 31(4): 1509-1518
- [59] Guo J, Lai S, Tao C, et al. Highlight-aware two-stream network for single-image SVBRDF acquisition[J]. ACM Transactions on Graphics, 2021, 40(4): Article No.123
- [60] Li Z Q, Sunkavalli K, Chandraker M. Materials for masses: SVBRDF acquisition with a single mobile phone image[C] //Proceedings of the 15th European Conference on Computer Vision. Heidelberg: Springer, 2018: 74-90
- [61] Hu B Y, Guo J, Chen Y J, et al. DeepBRDF: a deep representation for manipulating measured BRDF[J]. Computer Graphics Forum, 2020, 39(2): 157-166
- [62] Kuznetsov A, Mullia K, Xu Z X, et al. NeuMIP: multi-resolution neural materials[J]. ACM Transactions on Graphics, 2021, 40(4): Article No.175
- [63] Guo J, Li Z R, He X Y, et al. MetaLayer: a meta-learned BSDF model for layered materials[J]. ACM Transactions on Graphics, 2023, 42(6): Article No.222

- 助设计与图形学学报, 2022, 34(9): 1313-1322)
- [134] Vaidyanathan K, Salvi M, Wronski B, *et al.* Random-access neural compression of material textures[J]. ACM Transactions on Graphics, 2023, 42(4): Article No.88
- [135] Gauthier A, Faury R, Levallois J, *et al.* MIPNet: neural normal-to-anisotropic-roughness MIP mapping[J]. ACM Transactions on Graphics, 2022, 41(6): Article No.246
- [136] Baatz H, Granskog J, Papas M, *et al.* NeRF-tex: neural reflectance field textures[J]. Computer Graphics Forum, 2022, 41(6): 287-301
- [137] Barron J T, Mildenhall B, Tancik M, *et al.* Mip-NeRF: a multiscale representation for anti-aliasing neural radiance fields[C] //Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2021: 5855-5864
- [138] Weier P, Zirr T, Kaplanyan A, *et al.* Neural prefiltering for correlation-aware levels of detail[J]. ACM Transactions on Graphics, 2023, 42(4): Article No.78
- [139] Bako S, Sen P, Kaplanyan A. Deep appearance prefiltering[J]. ACM Transactions on Graphics, 2023, 42(2): Article No.23
- [140] Bar C, Alterman M, Gkioulekas I, *et al.* A Monte Carlo framework for rendering speckle statistics in scattering media[J]. ACM Transactions on Graphics, 2019, 38(4): Article No.39
- [141] Steinberg S, Yan L Q. Rendering of subjective speckle formed by rough statistical surfaces[J]. ACM Transactions on Graphics, 2022, 41(1): Article No.2