

基于梯度信息的绘制方法



论文作者签名: _____

指导教师签名: _____

论文评阅人 1: 秦学英 教授 山东大学
评阅人 2: 陈彦云 研究员 中科院软件所
评阅人 3: 夏时洪 研究员 中科院计算所
评阅人 4: 隐名评阅
评阅人 5: 隐名评阅

答辩委员会主席: 彭群生 教授 浙江大学理学院
委员 1: 梁荣华 教授 浙江工业大学计算机学院
委员 2: 冯结青 教授 浙江大学计算机学院
委员 3: 金小刚 教授 浙江大学计算机学院
委员 4: 刘新国 研究员 浙江大学计算机学院

答辩日期: 2013年6月

Rendering Methods Based on Gradient Information



Author's signature: _____

Supervisor's signature: _____

Thesis reviewer 1: Xueying Qin Professor Shangdong University

Thesis reviewer 2: Yanyun Chen Researcher Chinese Academy of Sciences

Thesis reviewer 3: Shihong Xia Researcher Chinese Academy of Sciences

Thesis reviewer 4: Anonymous

Thesis reviewer 5: Anonymous

Committee of oral defence:

Chair: Qunsheng Peng Professor Zhejiang University

Members:

Ronghua Liang Professor Zhejiang University of Technology

Jieqing Feng Professor Zhejiang University

Xiaogang Jin Professor Zhejiang University

Xinguo Liu Researcher Zhejiang University

Date of oral defence: June 2013

浙江大学研究生学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 浙江大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：

签字日期：

年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 浙江大学 有权保留并向国家有关部门或机构送交本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 浙江大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索和传播，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期：

年 月 日

签字日期：

年 月 日

摘 要

梯度描述了在函数定义域内函数值随自变量变化的趋势，蕴含了函数的连续性信息。该连续性信息可以是随时间、空间变化，也可能是随某些控制参数变化。利用该连续性信息，我们可以更加深入地分析和理解函数，进而更好地解决实际问题。

在计算机图形学中，梯度信息得到了广泛的应用。例如：在图像编辑（如：分割、修复和拼接等）中，像素之间的梯度常被用来约束编辑结果的光滑度。同样的，在三维几何形变中，一种能够有效保持局部形变光滑性的方法就是将形变过程放到梯度域中进行。而在绘制中，基于梯度的自适应采样和插值方法能够极大地节省时间开销，甚至达到实时效果。

本文探索了梯度在绘制领域几种不同问题中的应用：基于梯度的插值加速问题、梯度域的高频分量分析问题以及全局优化中使用梯度作为平滑约束项的问题。论文的主要研究成果包括：

- 提出一种利用GPU通用并行计算以及基于图像梯度插值的快速绘制参与介质单散射效果的算法。光线在参与介质中的散射是自然界中常见的一种现象，如：阳光下的雨雾、阴霾以及沙尘暴。但光线与参与介质粒子交互过程非常复杂。要真实地模拟这一过程需要花费很大的时间开销，传统的串行算法通常只能进行离线绘制。我们提出一个并行绘制框架，利用GPU的通用并行计算性能快速地绘制参与介质单散射效果。并且，我们基于图像空间的梯度信息，提出一种快速插值方法，降低了计算复杂度，最终达到可交互级别的绘制效率。
- 提出一种基于梯度的增强绘制算法。从图像梯度增强算法得到启发，我们将梯度增强的思想扩展到三维增强绘制。增强的基本原理是提取输入信号的高频分量并放大，从而使得原信号的细节更加明显。我们通过计算绘制结果相对三维空间以及图像空间的梯度，并叠加到原绘制结果中，对三维绘制结果进行增强。同时，我们还分析绘制方程中各项（几何、可见性以及高光等）的梯度对增强结果的影响，并且保留关键因素去除不重要的因素。由于我们的算法考虑了三维空间到二维成像平面投影变换的梯度，因此比前人算法能更好地处理模型掠射角区域的增强。
- 提出一种从单张图像获取三维场景材质风格的算法。为几何场景设计材质是一件耗

时、费力的工作。我们利用反绘制以及全局优化技术探索从单张样本图像中全自动地获取材质风格并迁移到三维场景的方法。在该算法中,我们首先利用反绘制技术为场景中的每个物体从样本图像提取多个候选材质属性。然后定义一个衡量绘制结果与样本图像风格差异的目标函数,并且定义相邻物体间材质的梯度作为平滑约束项。通过利用禁忌搜索方法最小化目标函数,我们从多个候选材质属性中选取一组最优材质。实验表明,我们的算法在少量人工交互下使绘制结果仍然能在一定程度上保持与样本图像的材质风格一致。

- 提出一种基于图像的烟雾效果绘制算法。目前,虚拟现实应用常常要求将虚拟的物体添加到真实场景中。而如何将烟雾等参与介质散射效果添加到实际拍摄图像中仍然是一个有待解决的问题。我们的算法以单张室内或室外图像作为输入,首先利用少量用户交互对图像中场景的光照和几何信息进行估计。然后通过对透光度和反射光照的分解,我们定义透光度图和散射图,并利用基于物理的绘制引擎进行绘制。最后,结合输入图像和透光度图以及散射图合成具有烟雾效果的图像结果。我们的算法能够处理室内或室外场景。由于对场景的光照进行了估计,所以我们的算法能够生成光源周围的光晕或由方向光源形成的光柱等现象。

关键词: 梯度, 单散射, 增强绘制, 材质风格, 混合现实, 图像合成

Abstract

Gradient describes the variation trend of a function, and indicates the continuity of the function which may vary with time, space or other parameters. With this continuity information, we can get further and deeper understanding of the underlying functions enabling us to achieve better results.

In computer graphics, researchers have taken advantages of gradient in solving various problems. For instance, it is usual to take into account the gradient of images in image editing (e.g. segmentation, inpainting and stitching et. al). Similarly, in 3D geometric deformation, an effective and important method is to perform the deformation in gradient domain. In addition, in photo-realistic and real-time rendering, gradient based adaptive sampling and interpolation are critical strategies to reduce time cost.

In this dissertation, we study the application of gradient information in several related problems, including gradient based interpolation for acceleration, gradient domain analysis of high frequency signals and employment of gradient term as a smoothing constraint in optimization. Our main contribution is as follows:

- Propose a method for fast rendering of participating media with single scattering effect by exploiting the computational parallelism of GPU and a gradient based interpolation method in image space. Scattering is a common natural effect with light traveling through various media, such as fog, haze and dust. However, the interaction between light and particles within media is very complex, which costs a lot of time to simulate physically. Therefore, traditional methods usually achieve it in an offline process. We propose a parallelized framework to render single scattering effect efficiently on GPU. In addition, we employ an image space interpolation process based on the gradient of sample points for acceleration. Consequently, the rendering efficiency is improved to interactive frame rate.
- Propose a gradient based enhancement rendering method. Inspired by the gradient based enhancement approach in image processing, we extend the gradient enhancement idea to 3D rendering. The fundamental principle of enhancement technique lies in exaggerating the high

frequency component of the input signal, which makes the details more obvious. We evaluate the gradient of rendering result with respect to 3D space and image space coordinates and add it to the original rendering result for enhancement. Furthermore, we analyze the influence of the gradient of each term in rendering equation upon the enhanced result respectively. Thus, we discard the minor terms and retain the critical terms. Since our method take into account the gradient of projection transform, it can handle enhancement in grazing area better than previous methods.

- Propose a method to extract the material style from a single image and transfer it to a 3D model. Material design usually costs a lot of time and labors. We present a new method for automatically extracting material style from a sample image for 3D scenes. Our method takes advantage of inverse rendering technique and optimization approach for material transfer. Given a 3D scene and a sample image, we first obtain some candidate materials using inverse rendering techniques under a set of pre-determined views. Then, we define an objective function for estimating the difference of the material style between the sample image and the synthesized images rendered with candidate materials. In addition, we define the gradient of material for each object in the scene and add it to the objective function as a smooth term. Finally, we select the best material from candidate materials by optimizing the objective function with the Tabu Search method. Our user study shows that our method can produce rendering results with material style similar to the sample image with minimal user assistance.
- Propose a method to insert foggy effects into real photographs. Recently, virtual reality applications usually require inserting virtual objects into real photographs. However, inserting participating media scattering effects, such as fog and haze, into real photographs is still a problem. Our method takes a single interior or exterior photograph as an input. We first estimate the illumination and geometry of the underlying scene with minor user assistance. According to the decomposition of transmittance and reflective radiance, we define the transmittance map and reflective map. We then rendering them using physically based rendering engine. Finally, we produce the foggy result by combing the input photograph, the transmittance map and the reflective map. Our method can handle both the interior and exterior

photographs. Since our method estimates the illumination of the underlying scene, it can produce glow and shaft of light effect.

Keywords: gradient, single scattering, enhancement, material style, mixed reality, image synthesis

目 次

摘要 I

Abstract III

1 绪论 1

1.1 梯度 2

1.1.1 函数的线性逼近 3

1.1.2 本文方法中的应用 3

1.2 相关工作 4

1.2.1 参与介质散射绘制 4

1.2.2 表意绘制 10

1.2.3 基于图像的材质获取及绘制 13

1.3 本文章节安排 16

2 基于梯度插值的单散射并行绘制 17

2.1 散射光能传播模型介绍 18

2.1.1 自发光 18

2.1.2 吸收 18

2.1.3 散射 19

2.1.4 相位函数 19

2.1.5 辐射传输方程 20

2.1.6 参与介质模型 22

2.2 并行绘制框架 23

2.3 GPU实现 24

2.3.1 GPU与CPU架构对比 24

2.3.2 Nvidia CUDA通用计算平台 26

2.3.3 GPU并行计算原语 26

2.3.4 本章算法的GPU并行实现 27

2.4 基于梯度的图像空间插值 28

2.4.1 均匀参与介质插值 28

- 2.4.2 非均匀参与介质插值 30
- 2.5 实验结果 31
- 2.6 小结 34
- 3 基于梯度分析的增强绘制 36
 - 3.1 图像梯度增强介绍 36
 - 3.2 梯度增强绘制理论 37
 - 3.2.1 投影变换的梯度 37
 - 3.2.2 绘制结果在三维空间的梯度 39
 - 3.2.3 点光源情况分析 39
 - 3.2.4 环境光照情况推广 43
 - 3.3 基于法向梯度的三维形状描述符 43
 - 3.3.1 定义 43
 - 3.3.2 映射函数 45
 - 3.4 实现细节及分析 46
 - 3.4.1 投影变换 47
 - 3.4.2 高光 48
 - 3.4.3 阴影 48
 - 3.4.4 环境光照 49
 - 3.5 实验结果 50
 - 3.5.1 与前人方法对比 51
 - 3.5.2 用户调查 51
 - 3.5.3 更多结果 55
 - 3.6 小结 55
 - 3.6.1 局限性与未来工作 55
- 4 基于反绘制和梯度优化的材质风格获取 60
 - 4.1 算法框架介绍 60
 - 4.2 反绘制拟合材质 62
 - 4.3 全局优化 65
 - 4.3.1 禁忌搜索 65
 - 4.3.2 代价函数 66

4.3.3 解空间邻居关系 67

4.4 实验结果 68

4.4.1 用户调查 70

4.4.2 算法局限性 72

4.5 小结 73

5 基于图像的烟雾效果绘制 75

5.1 算法框架 75

5.2 反射光能和透光度的分解 76

5.2.1 光能传播模型回顾 76

5.2.2 理论公式推导 77

5.3 实现细节 81

5.3.1 室内场景光照和几何估计以及光柱效果模拟 81

5.3.2 室外场景光照和几何估计 83

5.4 实验结果 86

5.4.1 验证实验 86

5.5 小结 86

5.5.1 局限性与未来工作 87

6 总结与展望 88

6.1 本文工作总结 88

6.2 未来工作展望 90

参考文献 91

攻读博士学位期间主要研究成果 101

致谢 102

图 目 录

图 1.1 参与介质散射绘制在数字娱乐中的应用 5

图 1.2 计算机图形学中光能与参与介质微粒的交互示意图 6

图 1.3 传统绘制结果与线绘制结果对比 10

图 1.4 传统绘制结果与增强绘制结果对比 11

图 1.5 曲率大的表面比平面反射更大范围的入射光示意图 12

图 1.6 精确材质采集设备 14

图 2.1 光能与参与介质之间的交互种类 18

图 2.2 单散射与多散射 20

图 2.3 光能在参与介质中传播时与参与介质的交互 21

图 2.4 并行算法流程图 23

图 2.5 CPU与GPU硬件架构比较 24

图 2.6 计算前缀和与并行删除操作 27

图 2.7 相邻像素点散射光路 29

图 2.8 不同属性参与介质单散射绘制结果 32

图 2.9 不同散射系数的非均匀参与介质单散射绘制结果 32

图 2.10 不同吸收系数的非均匀参与介质单散射绘制结果 33

图 2.11 不同相位函数参数的非均匀参与介质单散射绘制结果 33

图 2.12 离线绘制结果与本文实时绘制结果的对比 33

图 2.13 更多参与介质单散射绘制实验结果 35

图 3.1 三维梯度增强绘制算法流程图 36

图 3.2 基于梯度的图像增强 37

图 3.3 投影变换示意图 38

图 3.4 可见性函数梯度示意图 42

图 3.5 形状描述符的可视化结果 44

图 3.6 幂函数映射曲线 45

图 3.7 在不同细节层次上的增强绘制结果 46

图 3.8	在Lambert光照模型下, 传统绘制结果与梯度增强绘制结果的比较	47
图 3.9	在Phong光照模型下, 传统绘制结果与梯度增强绘制结果的比较	48
图 3.10	在图像空间计算阴影梯度	48
图 3.11	阴影梯度增强绘制结果	49
图 3.12	不同程度的阴影梯度增强绘制结果	50
图 3.13	采用点光源、Lambert和Phong光照模型与前人方法方法的比较	52
图 3.14	采用点光源、Phong光照模型与前人方法方法的比较	53
图 3.15	采用环境光照、Phong光照模型与前人方法方法的比较	54
图 3.16	用户调查实验统计结果	54
图 3.17	采用光源照、Lambert和Phong光照模型梯度增强绘制结果	57
图 3.18	采用环境光照、Ashikmin材质模型梯度增强绘制结果	58
图 3.19	梯度增强绘制结果中的反着色现象	59
图 4.1	材质风格获取算法流程图	61
图 4.2	对三维场景采样多个视图结果	62
图 4.3	使用聚类和未使用聚类材质拟合结果比较	62
图 4.4	反绘制拟合过程	63
图 4.5	用不同的聚类数目拟合材质	64
图 4.6	从单视图反绘制拟合材质	66
图 4.7	单视图与多视图材质获取比较	68
图 4.8	与三维模型场景相似的样本图像作为输入的实验结果	69
图 4.9	与三维模型场景不相似的样本图像作为输入的实验结果	70
图 4.10	室外场景实验结果以及人工交互高光处理	71
图 4.11	用户调查实验结果	71
图 4.12	视图采样以及样本图像对结果的影响	72
图 5.1	基于图像的烟雾效果绘制框架	76
图 5.2	光源和物体都在参与介质中时的光能传播示意图	78
图 5.3	公式推导中的符号标记	79
图 5.4	烟雾绘制与室内场景融合结果	80
图 5.5	太阳光方向的优化、光柱包围体及其绘制结果	82

图 5.6 烟雾绘制与室内场景图像融合结果 85

图 5.7 均匀参与介质真实感绘制结果与基于图像绘制结果的比较 86

图 5.8 非均匀参与介质真实感绘制结果与基于图像绘制结果的比较 87

表 目 录

表 2.1 运行时间统计（单位：毫秒） 31

表 3.1 运行时间统计（单位：毫秒） 50

表 4.1 运行时间统计（单位：秒） 68

第1章 绪论

计算机图形学作为计算机科学邻域最活跃的分支之一在最近的几十年中得到了飞速的发展。随着全球信息化时代的到来,其应用领域遍布人们日常生活的各个部分。无论是在工业设计、制造还是在医学、教育、娱乐等领域处处能见到计算机图形学的身影。其根本原因在于,人类在认知世界时最熟悉和自然的方式是通过视觉观察获得信息,而计算机图形学则是研究如何将数据或信息以图形、图像的形式传递给人们。通过图形、图像形式的传递,能够加深人们对信息内容的理解,进而方便了人们的日常生活和工作。

绘制是图形学中研究如何将三维物体以二维图像的方式显示给用户的技术。早期人们将绘制技术分为追求逼真刻画真实世界场景的真实感绘制和追求高速、可交互的实时绘制。真实感绘制技术^[1-3]由于考虑了全局光照明(global illumination)效果(其中包括阴影、物体表面多次反射以及焦散等效果),其绘制结果可以与实际拍摄的图像相媲美。但真实感绘制技术相对复杂,而早期的图形硬件GPU(Graphic Processing Unit)灵活度低无法用来加速全局光照明计算,因此绘制一张真实感的图像需要花费很长时间。实时绘制虽然能够利用GPU加速达到每秒30帧以上的绘制效率,但它只支持局部光照明(local illumination)效果。其绘制结果相对粗糙,使得人眼能够立即分辨出是计算机合成的结果。

随着绘制理论的快速发展,真实感和实时绘制邻域在最近几年的发展中逐渐融合。其中,基于梯度的插值是一种常见的加速手段。在真实感绘制中,由于有些函数计算复杂度高而且耗时,因此为了简化计算过程我们常选择一些稀疏的采样点计算函数值以及梯度,然后对其它的点根据采样点的值以及梯度进行快速插值计算。最著名的利用梯度信息加速全局光照明计算的方法是反射辐照度缓存(irradiance caching)^[4]。起初,Ward等提出的反射辐照度缓存^[5]并没有利用梯度信息进行插值,而是直接加权平均。后来经过实验他们发现高阶的梯度信息能够更加准确的对原函数进行逼近,于是他们在后来的方法^[4]中加入了梯度信息的计算。在随后基于反射辐照度缓存发展的辐照度缓存(radiance caching)^[6,7]也同样利用了梯度信息进行插值。并且,Jarosz等将这一方法推广至参与介质散射绘制^[8]。此外,在参与介质单散射实时绘制中,也有方法利用梯度信息插值^[9]进行加速。另一种重要的加速方法是进行预计算。基于预计算的全局光照明方法^[10-12]将绘制过程中需要重复计算的部分预先计算好并存储下来,然后在实时绘制时直接使用,减少计算量。

随着绘制技术的进一步发展,人们已经不仅仅满足于利用计算机将虚拟场景以贴近真实世界的方式展现在屏幕上。现实生活中的各种应用要求通过绘制传达特定或更多的信息。于是,表意绘制在近几年逐渐被计算机图形绘制研究者们所关注。表意绘制在日常生活中应用广泛,例如:考古学家常采集古董表面细微的几何数据进行可视化、分析以辨别古董产生的年代;在医学领域医生常利用表意绘制对人体器官的扫描数据进行可视化以确定器官病变的位置和原因;在地图导航领域人们也常利用它生成使用户更容易注意的导航标记。传统的表达式绘制大多基于非真实感的绘制技术,例如:线绘制或风格化的绘制方法。这些方法能够很好地将物体的几何特征以及风格化信息传递给用户,但它们缺少对物体表面材质和光照信息的表现。增强绘制基于真实感绘制技术,通过物体表面曲率等信息改变入射光、材质以及遮挡关系将物体的几何细节更加清晰地展示给用户。在人眼视觉感知研究以及增强绘制领域,利用梯度信息进行分析是一种重要的分析手段。通过梯度分析,一些计算机视觉以及人眼感知的研究表明:物体表面纹理和着色信息的梯度是人眼识别物体形状的重要依据^[13]。而且,利用梯度信息提取高频信息还可以对绘制流程^[14]以及采样理论^[15]进行分析,并在绘制过程中根据分析结果指导采样。此外,利用梯度信息对图像进行增强是图像处理中重要的增强方法。它的原理是利用梯度信息提取原图像中的高频细节部分,然后叠加到原图像对其放大,从而使得图像细节更清晰。

综上所述,计算机图形学绘制技术至今经历了三十多年的发展,随着需求和目标的变化出现了各种不同的解决方法。函数的梯度信息是这些方法中常用的问题解决辅助工具。本文针对目前绘制领域中的参与介质单散射绘制、增强绘制以及基于图像的材质获取等问题,从不同的角度探讨利用梯度信息的解决方法。在本章接下来的内容中,我们首先简要介绍梯度的定义、函数的线性逼近以及本文利用梯度信息解决的几个问题,然后介绍本文的相关工作,最后提出本文在后面章节的内容安排。

1.1 梯度

在向量微积分中,一个标量函数的梯度是一个向量场。向量场的方向表示了该标量函数增长率最大的方向,而向量场的模表示了增长率。在简单一维情况情况下,空间中任何数量的变化可以表示成一个斜线,梯度代表该斜线的倾斜度及方向。而对于多维函数,梯度可以表示成对各个维度求偏导之和。若令标量函数 $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ 的梯度表示为 ∇f ,其中 ∇ 表示微分算子。那么在直角坐标系中,该梯度可以表示成为对各个分量求偏导的

和:

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x_1} \mathbf{e}_1 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \mathbf{e}_n$$

其中, $\mathbf{e}_n$ 表示 x_n 的单位方向。而函数 f 在某一点 $\mathbf{x}$ 沿任意一个方向 $\mathbf{v}$ 的方向导数 $D_{\mathbf{v}}f(\mathbf{x})$ 可表示为该点的梯度与该方向的点积:

$$D_{\mathbf{v}}f(\mathbf{x}) = (\nabla f(\mathbf{x})) \cdot \mathbf{v}$$

对于向量函数 $\mathbf{f}(\mathbf{x})$, 其梯度可用雅克比矩阵 (Jacobian Matrix) 表示:

$$\begin{aligned} \nabla \mathbf{f} &= \frac{\partial(f_1, f_2, f_3, \dots, f_n)}{\partial(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

1.1.1 函数的线性逼近

对于定义在欧式空间中的任意标量函数 f , 它在点 $\mathbf{x}_0$ 附近任意一点 $\mathbf{x}$ 的最好线性逼近可以用在 $\mathbf{x}_0$ 处的函数值及其梯度表示:

$$f(\mathbf{x}) \approx f(\mathbf{x}_0) + (\nabla f)_{\mathbf{x}_0} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)$$

其中, $(\nabla f)_{\mathbf{x}_0}$ 表示点 $\mathbf{x}_0$ 处的梯度, $(\cdot)$ 表示向量点积运算。上式等价于函数 f 在点 $\mathbf{x}_0$ 处的泰勒级数 (Taylor series) 前两项。由于函数梯度具有最好线性逼近的性质, 所以它常被用来插值计算复杂函数。

1.1.2 本文方法中的应用

本文利用梯度信息解决了绘制领域中的几个不同问题: 利用梯度信息插值加速参与介质单散射并行绘制、利用梯度信息进行增强绘制以及利用梯度信息优化从单张图像获取的材质风格。在解决这些问题时, 我们分别从不同的角度运用了梯度信息:

- 本文在利用GPU并行计算对参与介质单散射绘制加速的基础上, 在图像空间对场景进行采样和基于梯度的插值, 简化计算过程, 提高绘制效率。
- 本文将梯度增强的思想从图像处理扩展到增强绘制中, 并且通过分析各个梯度项对增强效果的影响, 找出其中重要因素和次要因素。

- 本文在求解从单张图像获取三维场景材质风格问题时, 为了使得三维场景中相邻物体获取的材质更加相近, 将相邻物体的材质梯度作为平滑约束项加入到目标函数中, 并通过最小化目标函数获取最优材质。

1.2 相关工作

1.2.1 参与介质散射绘制

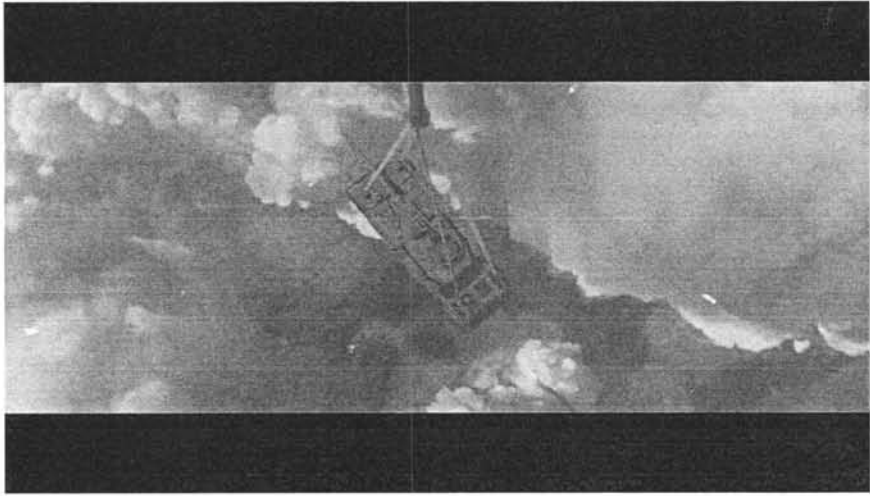
参与介质 (participating media) 散射绘制是计算机图形学绘制领域中重要的组成部分。它模拟了光能在参与介质中传播时, 参与介质中的微小粒子对光能发生作用的情况。参与介质散射绘制能够模拟真实世界中的许多自然现象, 如: 云雾、烟尘等。在绘制结果中加入参与介质散射现象能够更加真实地模拟自然场景, 提高绘制结果的真实感。例如最近很受欢迎的3D电影“Avatar”在其虚拟场景中加入了許多对雾和云的绘制效果, 如图 1.1。此外, 参与介质散射绘制在医学成像, 驾驶模拟训练以及数字媒体娱乐等领域起到了重要作用。

光能和参与介质之间的交互非常复杂, 要完全物理真实地模拟这一过程难度很大。其中包括两个主要原因。一是光能和参与介质的交互不仅仅发生在参与介质的边界处, 而且在参与介质中的每一点都有可能发生。因此, 我们需要知道参与介质内每一点的光学属性, 而且必须计算光能在穿过参与介质过程中的变化。(图 1.2 显示了计算机图形学中, 光线与参与介质中的微小粒子交互模型的示意图。当光线穿过参与介质时, 它在参与介质中某一点是否发生散射的概率取决于该点的局部参与介质属性。)二是参与介质中的粒子对不同波长的光能的作用效果不同。但是不同波长光能之间的转换在可见光范围内几乎可以忽略。因此, 在计算机图形学参与介质散射绘制中, 我们通常忽略了不同波长的光能带来的差异。

在过去的三十年中, 许多图形学研究者参与介质散射绘制领域提出了各种不同的方法。其中, Blinn是第一个将参与介质散射可视化引入计算机图形学绘制领域的研究者。他在1982年的论文^[17]中提出了一种可视化土星表面大气光环的方法。他的方法假设大气中的粒子为均匀分布的球形微粒, 并用解析的方法解决了光能在介质中的传输方程。但是这一方法对光能在参与介质中的散射做了大量简化, 只考虑了来自光源的光照能量经过一次散射后对射入视点的光能的影响, 忽略了光能在参与介质中多次散射的过程。这类方法被称为单散射。单散射只能模拟稀薄、散射率(在参与介质模型中散射率被定义为在参与介质中发生散射的某一点, 被散射、吸收的光能占射入该点光能的比例)较低的参与介



(a) “Avatar” 中的雾绘制



(b) “Avatar” 中的云绘制

图 1.1 参与介质散射绘制在数字娱乐中的应用，引自 [16]。

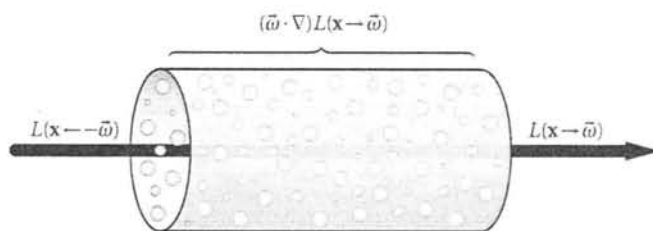


图 1.2 计算机图形学中光能与参与介质微粒的交互示意图。

质，例如雨雾、大气等。对于散射率较高的参与介质必须考虑其中多次散射的过程，例如云。Jensen在1998年的论文^[18]中将著名的全局照明方法Photon Mapping推广至参与介质散射绘制。这一方法不仅能模拟参与介质多散射过程，而且实现了参与介质中的全局照明，如物体表面与参与介质之间的相互辉映以及透射物体造成的焦散现象。该方法与许多其他的多散射绘制方法一样，都包含了两个过程：计算参与介质中散射光过程和可视化过程。Photon Mapping方法在第一步中使用光子（photon）模拟光能在参与介质中的散射过程。它的主要思想是将光源射出的光能用光子表示，并利用光子在参与介质中的传播模拟光能在参与介质中的多散射，然后将光子存储下来。在第二步中，使用光线递进算法（ray marching）进行可视化。当光线在参与介质中递进时，不仅计算来自光源的单散射光照，而且来自光子的多散射光照。结合单散射和多散射，Photon Mapping算法实现了光能在参与介质中传播的全局照明计算。在参与介质散射绘制领域，还有许多单散射和多散射绘制方法。Cerezo等在2005年发表的论文^[19]对这个领域的算法进行了总结。

最近，随着GPU的快速发展，其计算能力得到了大量提升。人们在追求计算机绘制结果的真实感的同时，也对绘制效率提出了实时的需求。因此，许多研究者们将目光投向了参与介质散射实时绘制领域。借助GPU强大的并行计算性能，许多研究者提出了不同的参与介质实时绘制算法。其中，单散射实时绘制成为了过去几年的研究热点。其主要原因是单散射绘制是多散射绘制的近似简化，更容易达到实时，而多散射由于复杂度太高要达到真正的实时绘制效率仍然是一个难题。在接下来的内容中，本文在最近提出的单散射实时绘制方法中选取与本文方法相关的算法进行详细介绍。

1.2.1.1 参与介质单散射实时绘制

在单散射实时绘制算法中，我们根据参与介质属性和绘制效果的不同将其分为均匀参与介质绘制、非均匀参与介质绘制以及针对阴影和焦散等特定效果的绘制分别进行介绍。

- 均匀参与介质的单散射实时绘制算法通常为了寻求参与介质单散射绘制的解析解，将参与介质密度分布假设为均匀分布进行简化。解析算法的基本思想是将单散射传输方程进行变形，然后用插值或近似函数简化积分项计算过程。Sun等在2005年发表的论文^[20]中提出一种方法将计算参与介质中单散射的积分式进行变量替换，使得被积函数只包含一个积分变量，即简化被积函数。然后，他们将该积分公式分解成仅依赖于参与介质光学属性的解析式和可预计算的二元积分式两部分，并将二元积分式的结果预计算好存储到一个二维纹理中。在实时绘制时，首先根据参与介质的光学属性快速地计算解析式部分，然后通过查表得到预计算积分式结果，从而可以达到实时绘制参与介质单散射的效果。该算法相比于OpenGL提供的烟雾效果，能够更真实地展现沉浸在参与介质中的光源周围散发的光晕以及参与介质散射对物体表面反射光造成的模糊。但预计算二元积分式需要假设参与介质属性为均匀参与介质、相位函数为各向同性，因此该方法不能解决非均匀以及各向异性的参与介质单散射问题。Hong等在2006年发表的论文^[21]中将Sun的方法进行了改进。Hong将单散射积分式用Lecocq的论文^[22]中提出的角度代换公式进行表示，使得积分变量能够表示为相位函数的入射角参数，从而能够将各向异性相位函数加入到预计算过程中。然后利用勒让德多项式对相位函数进行逼近。在预计算时，同样将与参与介质光学属性无关的积分表达式预计算好并存储在二维纹理中。在实时绘制时，可以根据不同的勒让德多项式系数重构出各向异性程度不同的相位函数，并且根据查表快速计算单散射积分式结果。因此，该方法支持实时修改参与介质的各向异性属性。为了解决预计算问题，Pegoraro等在2009年发表的论文^[23]中首次为单散射传输方程的解推导出一个闭合式（closed-form）表达式。该方法同样首先用变量代换对传输方程中的被积函数进行简化，使得被积函数只包含自然对数的指数函数和多项式函数。然后，对于各向同性的相位函数，可以用Abramowitz等的文献^[24]中提出的复数函数表示指数函数的积分式。对于各项异性的相位函数，则先用泰勒展开式对其进行逼近，然后再用复函数表示积分结果。复函数的求解可采用迭代的方法，并且可用精度控制迭代次数。由于使用了高级数学函数，Pegoraro的方法不需要预计算，并且能够更好地控制函数计算过程对最终结果带来的误差。但是，由于相位函数中包含余弦函数，直接使用泰勒展开式对相位函数的逼近带了一些误差。为了解决这一问题，作者在2010年发表的论文^[25]中提出了一种新的逼近方法。该方法用变量代换消去了相

位函数中的余弦项。然后再使用勒让德多项式基或者泰勒展开式对相位函数进行逼近。该方法比直接用多项式逼近的方法提高了函数逼近的精确度。

- 非均匀参与介质 单散射传输方程在均匀参与介质单散射传输方程的被积函数中增加了计算散射点到光源之间透明度的积分式。在均匀参与介质中, 该积分式退化为散射点到光源的距离与参与介质单位距离透明度的乘积。而增加的积分式使得计算过程更加复杂, 难以用变量代换和预计算以及高级数学函数进行简化。Zhou等在07年发表的论文^[26]中对非均匀参与介质的密度表示形式进行近似。该算法用基于高斯函数分布的三维球形径向基函数拟合非均匀参与介质密度分布函数。因此, 参与介质中两点之间的透明度积分式和单散射传输方程积分式被简化为与各个高斯球的积分求和式。在对每个高斯球沿光线方向做积分时, 该方法用积分中值定理和球心位置对积分式进行近似。最后, 加上参与介质密度近似函数中均匀项的积分结果, 该算法能够实时地绘制非均匀参与介质单散射现象。但是由于在使用积分中值定理进行简化时该算法假设参与介质为具有各向同性相位函数的参与介质, 所以它无法处理各向异性参与介质的情况。同时, 由于使用了基于径向基函数的插值该算法无法处理参与介质密度变化剧烈的情况, 只能用于绘制参与介质中低频的光照变化。Ren等在08年发表的论文^[27]中提出一种基于梯度的插值方法, 使得插值结果能够更好地逼近真实结果。在Ren的算法中, 同样采用了基于高斯的径向基函数表示参与介质密度分布。但在计算单散射光照时, 该算法首先在参与介质中选取部分点计算单散射光照以及梯度信息, 然后用光线递进算法计算射入视点的光照。在计算视线上的点产生的单散射光照时, 该算法能够根据预先计算好的采样点处的单散射光照以及梯度快速地进行插值计算, 因此能够达到实时地绘制效率。由于基于梯度的插值比基于径向基函数的插值更准确, 所以该方法能够更好地绘制非均匀参与介质中单散射的细节信息。但该算法用径向基函数对参与介质密度分布进行近似时假设参与介质具有各向同性的相位函数, 因此它无法处理各向异性的参与介质。
- 单散射阴影 实时绘制算法考虑了场景中的物体对参与介质的遮挡影响。在没有被遮挡的部分, 从光源发出的光能穿越参与介质会形成锥形的光柱 (shaft of light)。这种现象常常出现在光线从窗户或者门缝射入充满灰尘的暗室内的场景。Wyman等在2008年发表的论文^[28]中提出一种将体阴影图算法 (volumetric shadow mapping) 和光线递进算法相结合的方法, 实时地绘制了均匀参与介质中单散射阴影现象。该方

法首先从光源的角度计算阴影图,然后从视点的角度计算单散射光照及阴影。他们根据阴影图将视点角度的像素分为受到阴影影响和没有受到影响两类。对于没有受到阴影影响的像素直接采用Sun等的解析方法^[20]计算单散射光照。对于受到阴影影响的像素,采用数值方法,即光线递进算法,测试是否处于阴影体内同时计算单散射光照。Engelhardt等在2010年发表的论文^[29]中将Wyman等的采样方法进行了改进。他们的方法首先在视点屏幕空间的四条边上均匀采样多个点,然后从光源向每个点发射一条射线,并在每条射线上进行采样,称之为极线采样。对于极线上的每个采样点计算其单散射光照能量,最后利用光线递进计算视点屏幕空间每个像素点的光照值。在进行光线递进计算时,可利用预计算好的极线上的采样点单散射光照能量进行快速双边滤波插值计算。由于在均匀参与介质中单散射光照沿着极线的变化非常平滑,所以利用极线采样和插值能够更好地逼近真实的单散射光照计算结果,并且该方法比Wyman的方法能更好的绘制单散射阴影细节。Baran等在2010年发表的论文^[30]中将极线采样方法进一步做优化,提出一种用树表示的结构加快了求单散射积分的速度。该方法首先分别从光源和视点求取深度和阴影图,然后将这些图归一化到相同的极坐标下。该方法利用树形结构,增量式地计算并记录从视点发射的极线在参与介质中的每个采样点的单散射光照和遮挡信息。在实时绘制时,树形结构使得在求取参与介质中某一点的单散射光照和遮挡时只需要 $O(\log n)$ 的时间复杂度。当计算完每条极线的单散射光照能量后,该方法对其重新采样计算屏幕空间每个像素的单散射光照。Chen等在2011年发表的论文^[31]中提出一种方法将Baran的方法进行改进。Chen将Baran的方法中的阴影图表示成高度图,并基于该高度图提出了一种从视点发射光线与阴影图求交的加速结构。Chen的方法能够更快地计算单散射求积分过程,其中包括对可见性的测试计算。但是该方法同样只能处理各向同性均匀参与介质的单散射情况。

综合上述的各类算法,单散射实时绘制随着GPU的发展逐渐从需要预计算的解析解演变到结合解析解和数值解的混合绘制模式。这是因为起初GPU的计算能力和图形管线灵活度只能支持解析解的绘制计算。然而随着现代GPU统一计算硬件架构和NVidia CUDA等面向通用计算的GPU开发平台的出现,GPU完成复杂计算的能力得到了提升。这使得我们可以利用GPU对单散射实时绘制进行数值求解。在第2章,我们将对如何在GPU上并行地对单散射实时绘制进行数值求解的问题进行探讨,提出一种在GPU上实时绘制单散射效果的并行算法,并利用基于梯度的插值算法进行加速。由于该算法是基于数值解的,所以能够

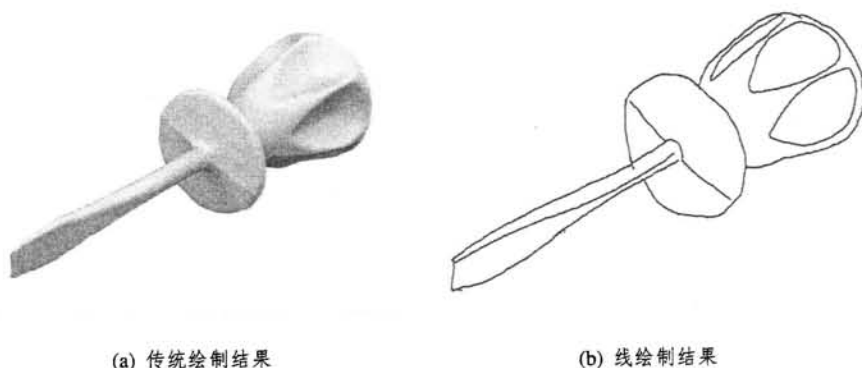


图 1.3 传统绘制结果与线绘制结果对比, 引自 [32]。

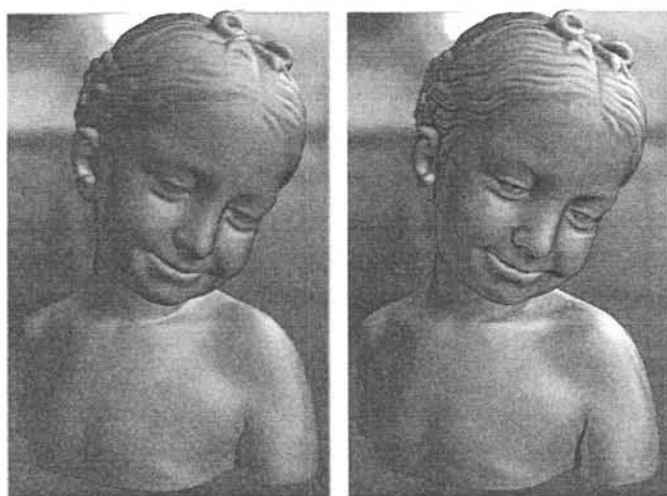
处理各向异性、非均匀的参与介质, 并且支持对光源附近的光晕、阴影等效果的绘制。该算法无需预计算, 因此可以支持对光源、参与介质参数进行实时修改。

1.2.2 表意绘制

表意绘制 (expressive rendering) 研究在过去的十几年中取得了较大进展。与真实感绘制不同的是, 表意绘制的目标并不是利用计算机完全真实地模拟现实世界的场景, 而是用绘制方法将特定或者更多的信息传递给观察者。这些信息可以是: 物体表面几何特征、材质属性以及光照等, 其中物体的几何特征是人眼观察物体时获取的最重要的信息。为了能在绘制结果中更加突出的表现物体的几何特征信息 Saito 等 [33] 在 1990 首次提出了混合式的绘制方法。随后, 又有多种方法结合对物体表面几何特征的提取以及非真实感绘制 [34-40] 将物体的几何特征更好的展示给观察者。线绘制是基于非真实感表意绘制中重要的一种方法。线绘制方法首先从物体的三维几何模型中提取特征线, 然后对这些特征线进行过滤, 最后将保留的线条绘制出来。特征线的提取方法有多种, 物体轮廓线 [41-45] 是最常见的特征线。此外, 还有从物体表面的峰顶和峰谷 (ridge and valley) [46,47] 以及它们之间的斜面 [48] 上提取的特征线。其他的一些方法的利用物体表面高光 [49] 以及 Laplace 算子 [50,51] 获取某些特定的特征。但是, 基于非真实感的表意绘制常常用简单的线条和颜色突出物体的几何特征而忽略了物体的光照和材质信息, 如图 1.3。

1.2.2.1 增强绘制

最近几年提出的增强绘制基于真实的材质和光照, 将物体的几何细节特征更加明显地展示给观察者。在传统的绘制管线和光照模型下, 由于物体表面高光、遮挡以及视线角度



(a) 传统绘制结果

(b) 增强绘制结果

图 1.4 传统绘制结果与增强绘制结果对比, 引自 [52]。

等因素的影响, 许多表面几何特征被模糊甚至消失, 如图 1.4(a)。而增强绘制结合传统的绘制方法, 通过对入射光线、模型几何以及材质的改变更加清晰地将模型的几何以及材质信息传递给观察者, 如图 1.4(b)。本节选取最近提出的方法中与本文方法最相关的几种进行详细介绍。

图像增强是通过在二维空间对图像边缘或高频细节进行提取、增强的方法。这些方法中的一些原理被扩展到了三维绘制中。Tobias 等^[53]在 2008 年提出一种方法, 将著名的 Unsharp Masking 图像增强方法扩展到三维增强绘制。随后 Matthias 等^[54]对该方法进行了评估。Unsharp Masking 方法的思想是通过对原图像进行平滑模糊获得一张低频图像, 然后用原图跟低频图像做减法获得一张高频图像, 最后将高频图像叠加到原图上得到对高频细节增强的图像。在图像增强中, 该过程是在图像空间完成, 而 Tobias 等的方法是在物体空间完成。他们的方法首先在模型的各个顶点上计算反射光照能量, 然后对每个顶点在其一阶邻域范围内进行平滑模糊, 并用原始光照能量减去平滑后的, 最后将得到的高频能量叠加到每个顶点的原始光照能量上, 从而获得增强绘制结果。总体上说, Tobias 等的方法是对反射光照能量的计算结果进行高频分量增强。因此, 该方法考虑了绘制方程中的各个因素对增强结果的影响, 其中包括: 入射光、物体表面材质、物体几何特征以及遮挡关系。但是, 由于该方法直接在反射光照能量的计算结果上进行, 所以它无法单独考虑上述各个因素对增强绘制结果的影响。并且, 增强绘制结果会在一定程度上改变物体表面材质, 这

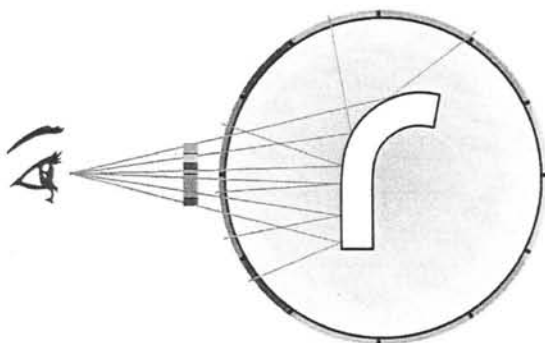


图 1.5 曲率大的表面比平面反射更大范围的入射光示意图, 引自 [52]。

并不是我们所希望的。我们希望在改变物体材质的情况下, 将物体的几何细节特征展示给观察者。因此, 本文的方法不仅同时考虑了绘制方程中各项因素, 并且单独分析了它们对人眼感知物体几何特征带来的影响。

曲率可以用来描述物体表面的凹凸性, 它在一定程度上衡量了物体表面的几何特征。因此, 许多增强绘制方法对物体表面曲率进行分析、提取几何特征、指导增强绘制。Romain等^[52]在2009年提出一种方法, 基于物体表面曲率近似值通过改变入射光线的范围对绘制结果进行增强。该方法的思想来源于Fleming等^[55,56]在研究人眼视觉感知反射物体几何形状时得出的一个结论: 曲率大的表面比平面能将更大范围的环境光反射进入人眼, 如图1.5。基于这一观察, Romain等的方法首先对模型表面几何特征进行分析。通过对物体在当前视点的法向图进行差分求得屏幕空间的主曲率值及方向, 并根据曲率值对入射光方向进行弯曲调整。该方法定义了一个调整函数, 在物体表面曲率大的点增大入射光范围, 反之减少, 使得绘制结果中物体表面的凹凸以及褶皱细节更加明显。该方法可基于真实感绘制绘制结果进行增强, 并且适用于环境光贴图的光源以及较复杂的表面材质。在2010年, 他们对这一方法进行了改进, 提出一种根据屏幕空间曲率值以及材质信息直接对反射光照能量进行调整的方法^[57]。该方法采用了与2009年的方法相同的屏幕空间曲率计算方法, 并根据曲率和材质信息定义了调整函数。该方法同样支持复杂的环境光照和材质^[58]。而本文的方法通过对绘制方程求导除考虑了绘制过程中各项因素, 其中包括Romain等的方法^[57]中考虑的物体表面几何特征、入射光以及材质因素, 还包括遮挡关系以及透视投影的影响。实验表明, 由于本文方法考虑了透视投影的梯度, 使得在物体表面与视线接近平行的掠射角区域 (grazing angle area) 比Romain等的方法^[57]得到更好的增强效果。

梯度分析在很多领域得到了应用。Ravi等^[14]在2007年提出一种利用梯度对绘制过程进行分析的方法,探讨了绘制结果随光源、物体的几何曲率、表面反射属性以及遮挡关系变化的内在关系。并利用分析结果提高了绘制过程中的采样效率。本文提出的方法同样是对绘制方程求梯度,但是本文主要着重于分析绘制方程中各项的梯度对增强绘制结果的影响。Ravi等的方法提供了一个对整体绘制流程进行一阶导数分析的方法,而本文则探讨了对绘制方程求梯度过程中各个细节对结果的影响。最近,Vergne等^[13]提出一种方法,利用在屏幕空间的梯度分析对输入图像中的物体进行重新着色。该方法用单个场景的深度图和法向图作为输入,根据梯度分析结果通过一系列的二维操作对改变物体材质,在不采用三维光照计算情况下达到满足人眼感知需求的效果。但与本文方法不同的是,该方法是在二维平面上进行梯度分析,而本文方法是在三维空间进行分析。

本文将在第3章对三维梯度增强绘制方法进行详细介绍。该方法的主要思想来源于二维图像处理中的梯度增强方法。二维梯度增强首先对图像求梯度,然后将梯度图叠加到原图像上。由于梯度图中包含了原图中的边缘以及变化较大的细节信息,因此叠加后的结果对这些细节部分进行了增强。本文将该思想扩展到三维增强绘制。首先对绘制结果在三维空间求梯度,然后对该梯度求模并叠加到原始绘制结果上。通过将梯度运算符代入绘制方程中展开,本文方法分析了在点光源情况下绘制方程中的各项梯度对增强绘制结果的影响,然后将该方法推广到环境光照以及复杂材质的情况。

1.2.3 基于图像的材质获取及绘制

材质信息是绘制物体过程中不可缺少的组成部分。而要从物体表面获取真实的材质信息并非一件容易的事。物体上某一点的材质信息通常是用一个双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function)表示,如图 1.6(a)。该函数是一个定义在以法向为 z 坐标轴、切平面为 xy 平面的局部坐标系中的分布函数,它描述了从某一入射方向 ω_i 射入的光能被从另一方向 ω_r 射出能量的比例。因此,要获取BRDF信息需要移动光源或物体以产生从不同角度入射的光能,并从不同角度测量反射光能。许多研究者提出了不同的材质数据采集设备和建模算法^[59-62],而它们都需要复杂的可移动光源和拍摄设备,如图 1.6(b)。

反绘制方法常被用来从图像中获取材质信息。它的求解过程与绘制算法正好相反。绘制过程是已知光照、物体几何以及材质信息计算物体表面反射着色,而反绘制是已知物体表面反射着色以及光源、物体几何信息求取物体材质信息的过程。Yu等^[63]在1998年利用已知几何模型和太阳光照从多幅图像中获取室外建筑材质属性。该方法首先在不同的

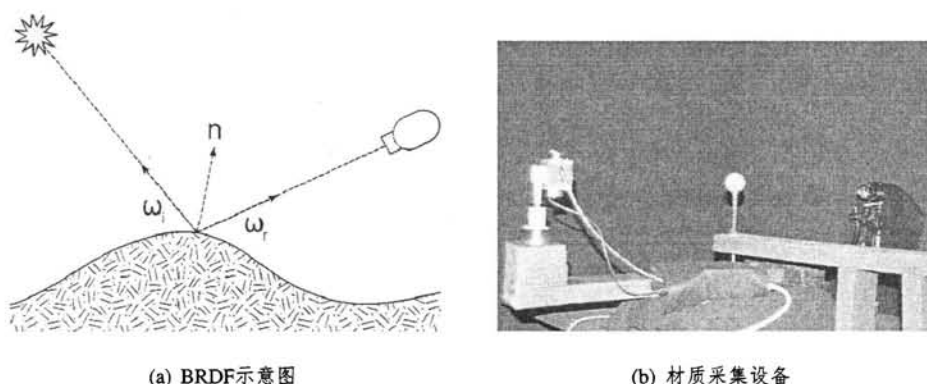


图 1.6 精确材质采集设备，引自 [62]。

时间对太阳、天空以及场景周围的环境拍摄多幅图像，然后用一系列优化方法从场景图像中分解出光照和材质信息。利用不同时间拍摄的太阳光和天空光，该方法能够绘制在不同时间光照下的场景。随后，他们又提出反全局光照明算法^[64]，从已知几何和环境光照的情况下从多幅图像中恢复场景材质信息。该算法不仅计算了来自光源的直接光照而且也考虑了物体之间相互反射的影响。Ravi等^[65]在2001年用球面调和函数表示入射光场和物体材质信息，从而可以用卷积来计算表面反射光照能量。因此，反绘制过程也可被看做一个反卷积的过程进行求解。Fabiano等^[66]在2008年利用已知环境光照和球形物体从单张高动态图中获取材质。随后，他们^[67]对自然世界的环境光进行统计分析，并将该算法推广到未知环境光的情况。另一类方法对物体上的每一点拟合出一个材质属性，即随空间变化的材质属性。其中一些方法^[68-70]利用定义好的基系数的线性组合表示材质属性。Zickler等^[71]在2005年利用径向基函数从光滑表面获取材质。Alldrin等^[72]在2008年利用了更加通用的模型从100多幅图像中恢复材质属性和法向信息。最近，Dong等^[73]利用用户交互以及迭代优化方法对平板形状的物体从单张图像中恢复材质属性和法向信息。

除了上述一些用三维图形技术获取物体材质的方法外，在图像处理中还有两类重要的相关方法，其中之一是颜色迁移算法。颜色转移将一张图像的颜色风格根据亮度分布转移到另一张图像中，它启发了我们将样本图像中的材质风格转移到三维模型中。为了解决图像编辑中将某种颜色映射成另一种颜色的问题，Erik等^[74]在2001年根据彩色图像颜色的标准方差将样本图像的颜色和亮度转移到目标图像中。在2002年Welsh等^[75]将这一工作推广到从彩色图像转移到灰度图像。在随后提出的算法中，有的算法^[76,77]将颜色转移问题转换

为优化问题, 还有基于笔画的算法^[78,79]依赖于用户交互信息辅助解决这一问题。这些算法都需要不同程度的人工交互。实现自动化的算法仍然是一个挑战。

另一类相关的图像处理算法是本征图像分解。本征图像分解将图像颜色分解成反射部分和光照部分。反射部分表示了物体的反射属性, 即物体的材质信息, 光照部分表示了来自光源的亮度信息。Tappen等^[80]在2006年提出了利用颜色信息和训练好的分类器将图像进行本征分解。Li等^[81]在2008年提出的算法利用非局部的纹理信息对图像进行了更加有效的本征分解。Bousseau等^[82]在2009年将人工交互信息加入本征分解的过程中。最近, Carroll等^[83]在2011年提出了一种方法利用人工交互将本征分解中的光照部分进一步分解成直接光照和间接光照, 使得图像编辑更加真实。本征图像分解虽然能够将图像中物体的反射属性的光照属性分离, 但它只能粗略的估计物体的颜色信息, 并不能获取物体的材质属性。

为了从图像中获取三维场景的材质风格, 本文提出一种自动从单张图像获取三维场景材质风格的算法。但与上述方法不同的是, 本文算法并不从单幅图像中获取精确的材质属性, 而是从图像中的获取材质风格并转移到缺少材质属性的三维几何模型上。本文算法首先对三维场景采样多个视图, 利用反绘制技术从样本图像中自动获取材质风格, 并转换到三维场景的各个视图中作为场景中物体的候选材质。然后, 定义候选材质绘制结果与样本图像材质分布差异的目标函数, 其中包含两者色度的均值、方差以及直方图分布的差。最后, 利用禁忌搜索方法优化该目标函数, 从候选材质中选取最合适的一组作为最终结果。本文将在第4章对该方法进行详细介绍。

由于虚拟现实的广泛应用, 将虚拟物体加入真实场景成为目前热门的研究课题。基于图像的绘制技术通过测量设备或多幅图像采集场景中某一点的入射光场, 然后用于绘制虚拟物体。Debevec等^[84]提出一种方法, 利用一个镜面探测球和相机基于物理地采集真实场景的光照图, 并用于虚拟物体重光照计算。随后, Alnasser等^[85]通过采集环境周围一系列的图像并将入射光表示成Chebyshev多项式的形式, 用于漫反射物体绘制。上述方法都是利用真实场景光照绘制虚拟物体, 而Cossairt等^[86]设计了一套设备, 不仅可以采集真实场景的光照对虚拟物体进行绘制, 而且将虚拟场景的光场投射到真实场景, 影响真实物体的光照。他们将一个透镜序列放置在真实场景和拍摄相机以及投影机之间, 利用相机拍摄真实场景的光场, 然后用投影机将虚拟光场投射到真实物体上。Lalonde等^[87]提出一种方法, 结合数据驱动的材质模型以及基于物理的光照模型将从互联网视频中的物体迁移到单张图像或用户自己拍摄的视频中。与传统基于采集设备的方法不同的是, Karsch等在最近发表

的论文中^[88]提出一种方法将虚拟物体插入真实拍摄的照片中。该算法的特点是无需借助任何采集设备也不需要照片中场景的光照和几何知识,仅仅只需要一张输入图像。它的主要思想是通过一个迭代优化过程,获得室内场景照片中场景的光照、几何的近似估计。基于该近似估计利用基于物理的绘制引擎绘制虚拟物体。

虽然在虚拟现实领域中已经有很多研究者提出不同方法将虚拟物体加入真实拍摄场景中,但是如何将虚拟参与介质融合到真实图像中仍然是一个有待解决的问题。Jorge等在2010年提出一种基于图像处理的参与介质编辑方法^[89]。该方法假设输入图像中场景的光照信息是一个常数。这一假设对于在室外天空光下拍摄的图像是合理的,但是对于室内光照并不适合。本文提出一种基于图像的参与介质单散射绘制算法。在该算法中,我们采用基于物理的蒙特卡洛光线跟踪以及光线递进算法计算参与介质散射光照。基于物理的随机算法^[18,90,91]能有效的模拟各种大气现象,如光晕、光柱等现象。这是图像处理方法难以达到的效果。并且,我们将光照和几何估计引入基于室内和室外拍摄图像的参与介质绘制算法中,使得最后合成结果更加真实。本文将在第5章对该方法进行详细介绍。

1.3 本文章节安排

本文接下来的章节顺序安排如下,第2章我们将探讨GPU上并行地对单散射实时绘制进行数值求解的问题,第3章探讨如何将梯度增强思想应用于三维增强绘制,第4章探讨自动从单张图像获取三维场景材质风格问题。第5章探讨基于图像的烟雾效果绘制问题。在上述三章的介绍中,我们将首先介绍问题的研究背景,然后提出解决方法并给出实验结果及讨论。第6章给出总结和展望。

第2章 基于梯度插值的单散射并行绘制

在三维场景中考虑烟尘、霾以及雾等参与介质，真实地模拟它们对光能的散射现象，能够极大地增强绘制效果的真实感。目前，参与介质的绘制不仅能应用在电影和游戏产业，而且在其他相关领域也将发挥积极的作用，例如：在大雾或沙尘暴天气引导交通以及在火灾现场指导人们快速脱险。而这些应用需要更高的绘制效率以达到实时反馈的目的。

传统基于物理的绘制方法在处理参与介质时通常绘制时间很长，绘制一帧往往需要几分钟甚至几小时，达不到实时绘制的效率。其原因主要是参与介质对光能在传播过程中的作用不仅发生在参与介质分布的边缘，而且存在于参与介质空间中的每一点，绘制算法需要考虑在光线穿过参与介质的路径上的每一点处参与介质对光能的光学作用。这是我们对参与介质进行实时绘制的最大难题之一。为了对复杂的散射现象进行简化，我们通常将参与介质的散射现象分为单次散射和多次散射，并分别进行模拟。其中单散射只考虑参与介质对光源直接光照的一次散射，而多散射需要考虑参与介质对物体表面反射光以及参与介质中散射光的再次散射。详细介绍可参考Blinn于1982年发表的绘制方法^[17]。根据属性分布，参与介质可分为均匀参与介质和非均匀参与介质。Kajiya在1984年发表的文献^[92]中提到：参与介质具有一致性是指参与介质的密度不随空间位置变化而改变，即本文中的均匀参与介质。均匀参与介质中的微小粒子在参与介质空间分布是均匀的，因此它对光的散射作用是均匀的。非均匀参与介质中粒子分布随空间位置变化而不同，其中又分均匀变化和非均匀变化的参与介质。传统的蒙特卡洛随机算法可以模拟各种不同属性参与介质并得到精确的计算结果，但是其时间开销远远达不到实时应用的需求。而实时绘制算法通常为了加快绘制速度对参与介质属性或散射现象进行了简化。

本文算法考虑了均匀和非均匀参与介质单散射的情况，利用GPU的并行计算能力加快了绘制速度，同时通过图像梯度空间插值减少了计算量，使得绘制效率达到可交互。该算法的特点是能够模拟各种参与介质中单散射的情况并且无需任何预计算。对于用户对光照和参与介质属性的修改，能实时反馈，其结果可用作参与介质属性编辑的参考。

本章接下来将首先回顾光线在参与介质中传播的理论基础，接着介绍单散射的并行绘制算法以及在GPU上的实现，最后给出一些实验结果并对算法的优缺点及未来工作进行讨论。

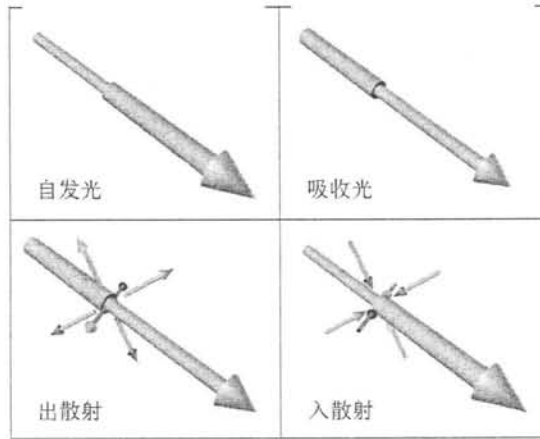


图 2.1 光能与参与介质之间的交互种类。

2.1 散射光能传播模型介绍

在光线跟参与介质交互的过程中主要包含了三种物理现象：自发光、吸收以及散射^[19]。其中，散射包含出散射和入散射两种情况，如图 2.1。

2.1.1 自发光

自发光模拟了自身具有发光特性的参与介质向周围空间传播光能的情况。产生这种现象的主要原因是由于参与介质内部发生某种化学、热学反应，使得其发出了某些可见光，例如：烟花、火焰等。

若用 $L_e(\mathbf{x})$ 表示某条光路上的一点 $\mathbf{x}$ 参与介质自身发射的光能，用 $L(\mathbf{x})$ 表示该点的出射光能量，则该方向的光能变化可以用如下微分方程表示：

$$\frac{dL(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} = L_e(\mathbf{x})$$

2.1.2 吸收

吸收现象是光能在参与介质中传播时最主要的一种现象。当我们透过浓密的大雾或者火焰上滚滚黑烟看其背后的物体时，我们通常发现物体被大雾或浓烟遮挡住了。这是因为当物体表面的反射光线穿过参与介质射向观察者时，参与介质中的粒子吸收了穿过它们的光线的能量。此外，当太阳光穿过云层射到地面上时会出现淡淡的阴影现象，这也是因为云层吸收了太阳光能量。

在模拟吸收现象时，吸收系数常被用来表示参与介质中某处发生吸收现象的概率。若用 $\kappa_a(\mathbf{x})$ 表示参与介质在点 $\mathbf{x}$ 处的吸收系数，则该点的光能变化可用如下微分方程表示：

$$\frac{dL(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} = -\kappa_a(\mathbf{x}) L(\mathbf{x}) \quad (2.1)$$

根据Beer-Lambert定律，参与介质对光能的吸收与距离之间存在一个对数关系。因此，方程 2.1 的解可表示为：

$$L(\mathbf{x}) = L(\mathbf{x}_0) e^{-\int_{\mathbf{x}_0}^{\mathbf{x}} \kappa_a(\mathbf{x}') d\mathbf{x}'}$$

2.1.3 散射

当光能穿过参与介质时，光束可能跟参与介质中的粒子发生碰撞，从而改变光能的传播方向。散射现象对于某条光束上的光能产生了两个方面的影响。当散射现象发生在光束的传播路径上时，它减小了该路径上的光能，被称之为出散射。当其他路径上的光能被散射到当前路径上时，它增加了当前路径上的光能，被称之为入散射。

若用 $\kappa_s(\mathbf{x})$ 表示在参与介质中点 $\mathbf{x}$ 处发生散射现象的概率，即散射系数，则光能在点 $\mathbf{x}$ 处由于吸收和出散射现象造成的衰减变化可以用如下微分方程表示：

$$\begin{aligned} \frac{dL(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} &= -\kappa_t(\mathbf{x}) L(\mathbf{x}) \\ &= -(\kappa_a(\mathbf{x}) + \kappa_s(\mathbf{x})) L(\mathbf{x}) \end{aligned}$$

其中， $\kappa_t(\mathbf{x})$ 被称为衰减系数。根据Beer-Lambert定律，光能从点 $\mathbf{x}_0$ 到点 $\mathbf{x}$ 传播路径上的衰减可表示为：

$$\begin{aligned} L(\mathbf{x}) &= \tau(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}) L(\mathbf{x}_0) \\ &= e^{-\int_{\mathbf{x}_0}^{\mathbf{x}} \kappa_t(\mathbf{x}') d\mathbf{x}'} L(\mathbf{x}_0) \end{aligned}$$

其中， $\int_{\mathbf{x}_0}^{\mathbf{x}} \kappa_t(\mathbf{x}') d\mathbf{x}'$ 被称为光学厚度， $\tau(\mathbf{x}_0, \mathbf{x})$ 被称为透光度。

2.1.4 相位函数

在模拟光能在参与介质中传播时，除了需要考虑光能在某条光路上的衰减还要考虑其他光路上的散射光能入射到当前光路造成光能增强的情况。因此，在模拟散射现象时，我们用相位函数描述散射光能分布情况。相位函数 $\rho(\omega_o, \omega_i)$ 描述了在发生散射的某一点处，从 ω_o 方向射出的光能与从 ω_i 方向入射的光能之比。相位函数类似于表面反射模型中

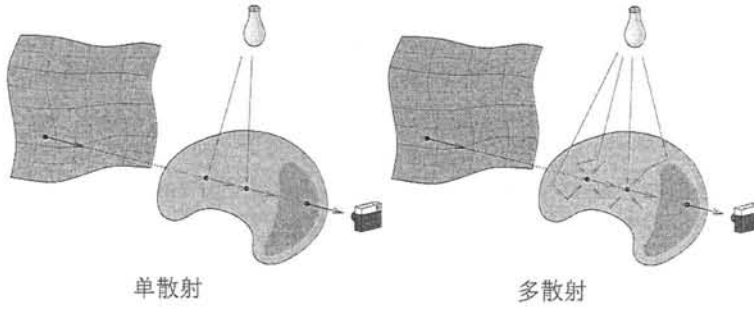


图 2.2 单散射与多散射。

的BRDF（双向反射率分布函数），它定义了从某一入射方向射入的光能会发生散射时随出射方向变化的概率密度分布函数。

在计算机图形学中，已经有研究者提出了许多不同的相位函数。如同表面反射模型中的纯漫反射模型和具有方向性的反射模型，相位函数分为简单的各向同性和各向异性两种。各向同性的相位函数描述了各个散射方向的能量分布均匀的散射模型。该函数为一常量：

$$\rho(\omega_o, \omega_i) = \frac{1}{4\pi}$$

在模拟各向异性参与介质时，常用的一种相位函数是Heney和Greenstein在1941年提出的相位函数，即HG相位函数。该函数用一个参数 g 控制散射光能的分布：

$$\rho(\omega_o, \omega_i) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g(\omega_i \cdot \omega_o))^{3/2}}$$

其中， $(\cdot)$ 表示两向量的内积， g 的取值范围为 $[-1, 1]$ 。当 g 大于零时，该相位函数描述了前向散射参与介质，即散射光能主要分布于和入射方向在同一侧（ $\omega_i \cdot \omega_o > 0$ ）的方向上。当 g 小于零时，该相位函数描述了后向散射参与介质，即散射光能主要分布于和入射方向相反一侧（ $\omega_i \cdot \omega_o < 0$ ）的方向上。 g 的绝对值越大，散射光能越集中于 ω_i 和 $-\omega_i$ 两个方向上。该相位函数的优点在于，它可以被很容易地用来拟合采集数据，同时便于控制各向异性散射程度。在本章接下来介绍的工作中，我们主要采用这两种相位函数模拟各向同性和各向异性的参与介质。

2.1.5 辐射传输方程

综合光能在参与介质中传播的各种现象，辐射传输方程描述了在参与介质中的一

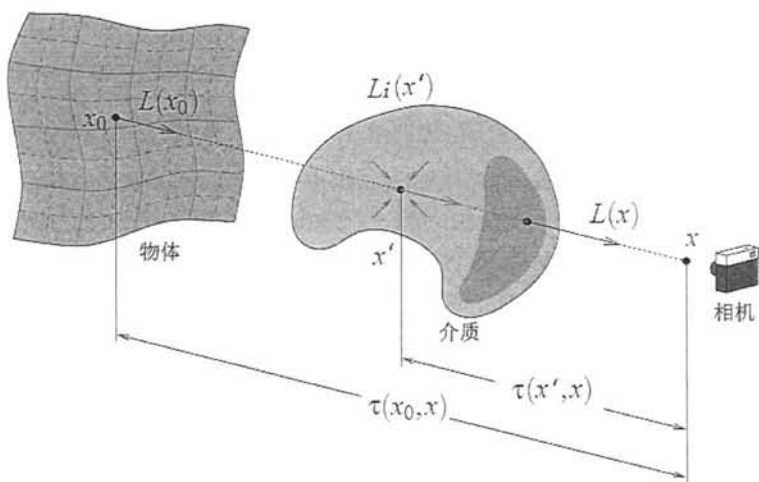


图 2.3 光能在参与介质中传播时与参与介质的交互。

点 $\mathbf{x}$ 处光能的变化情况^[19]:

$$\frac{dL(\mathbf{x})}{dx} = \kappa_a(\mathbf{x}) L_e(\mathbf{x}) + \kappa_s(\mathbf{x}) L_i(\mathbf{x}) - \kappa_t(\mathbf{x}) L(\mathbf{x}) \quad (2.2)$$

其中, $L_i(\mathbf{x})$ 表示在点 $\mathbf{x}$ 处所有入射光能经过散射朝某条光路方向 ω_o 射出的能量:

$$L_i(\mathbf{x}) = \int_S L(\mathbf{x}, \omega_i) \rho(\omega_o, \omega_i) d\omega_i$$

S 表示球面积分区域。 $L(\mathbf{x}, \omega_i)$ 既包含了来自光源的直接光照的能量, 也包含了参与介质中其他点散射产生的间接光照能量。

当参与介质的光学厚度比较薄, 即透光度较高时, 我们可以忽略 $L_i(\mathbf{x})$ 中其他点散射进入点 $\mathbf{x}$ 的光能, 而仅仅考虑光源的直接光照能量。我们通常将这种假设简化称为单散射, 如图 2.2。本章介绍的方法主要解决了的参与介质单散射的快速绘制问题。因此, 在本章接下来介绍的内容中只考虑 $L_i(\mathbf{x})$ 中来自光源的能量。

沿着一从 $\mathbf{x}_0$ 到 $\mathbf{x}$ 的路径, 如图 2.3, 对辐射传输方程 2.2 两边进行积分可得如下方程^[19]:

$$\begin{aligned} L(\mathbf{x}) = & \int_{\mathbf{x}_0}^{\mathbf{x}} \tau(\mathbf{x}', \mathbf{x}) \kappa_a(\mathbf{x}') L_e(\mathbf{x}') d\mathbf{x}' + \\ & \int_{\mathbf{x}_0}^{\mathbf{x}} \tau(\mathbf{x}', \mathbf{x}) \kappa_s(\mathbf{x}') L_i(\mathbf{x}') d\mathbf{x}' + \\ & \tau(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}) L(\mathbf{x}_0) \end{aligned} \quad (2.3)$$

通常解决方程 2.3 的方法是先沿着某条光线离散采样然后逐段跟踪。这种方法被称为光线递进算法。如图 2.3, 假设从 $\mathbf{x}_0$ 到 $\mathbf{x}$ 的光路上有 n 个采样点。其中, 第 $k-1$ 到第 k ($0 < k < n$) 个采样点的距离为 $\Delta t = \|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}\|$ 。则第 k 个采样点与第 $k-1$ 个采样点之间的光能关系可以用如下递推关系式表示:

$$L(\mathbf{x}_k) = \kappa_a(\mathbf{x}_k) L_e(\mathbf{x}_k) \Delta t + \kappa_s(\mathbf{x}_k) L_i(\mathbf{x}_k) \Delta t + e^{-\kappa_t(\mathbf{x}_k) \Delta t} L(\mathbf{x}_{k-1}) \quad (2.4)$$

由于我们只考虑参与介质的单散射情况, 因此递推公式 2.4 中的 $L_i(\mathbf{x}_k)$ 只包含来自光源的入射光能量。若用 L_d 表示光源处发射的能量, $\mathbf{x}_l$ 表示光源位置, 则 $L_i(\mathbf{x}_k)$ 可用如下公式表示:

$$L_i(\mathbf{x}_k) = \tau(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_k) \rho(\omega_o, \omega_i) L_d$$

其中, ω_o 和 ω_i 为点 $\mathbf{x}_k$ 处入射光线和散射光线方向:

$$\omega_o = \frac{\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}}{\|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}\|}, \omega_i = \frac{\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_l}{\|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_l\|}$$

2.1.6 参与介质模型

在定义一种参与介质时, 我们需要指定它所占的空间范围, 自发光系数, 相位函数, 吸收系数以及散射系数。这些系数和函数描述了参与介质的属性, 不同取值代表了不同的参与介质。最简单的情况是它们不随参与介质空间而变化, 该种参与介质被称为均匀参与介质。在表示均匀参与介质时, 我们首先指定参与介质占据的空间范围, 该范围通常为充满整个场景的一个立方体包围盒, 然后指定各系数作为参与介质中每一点的参与介质属性。

均匀参与介质是对真实世界参与介质的高度简化, 而更加贴近真实情况的是非均匀参与介质。其中, 一种用于模拟地球表面大气分布的非均匀参与介质密度随高度以自然对数的指数函数而变化。在这种参与介质模型中, 我们假设参与介质中的粒子有着同样的散射系数, 而吸收系数与参与介质的密度成正比。当指定了吸收系数的基准值后, 我们可以用该基准值和参与介质中某一点密度的乘积作为该点的吸收系数。这种参与介质的密度可以用如下公式表示:

$$D(h) = ae^{-bh}$$

其中, a 和 b 是用来控制整个参与介质密度变化程度的参数。在表示这种参与介质时, 同样要先指定立方体的参与介质空间范围。

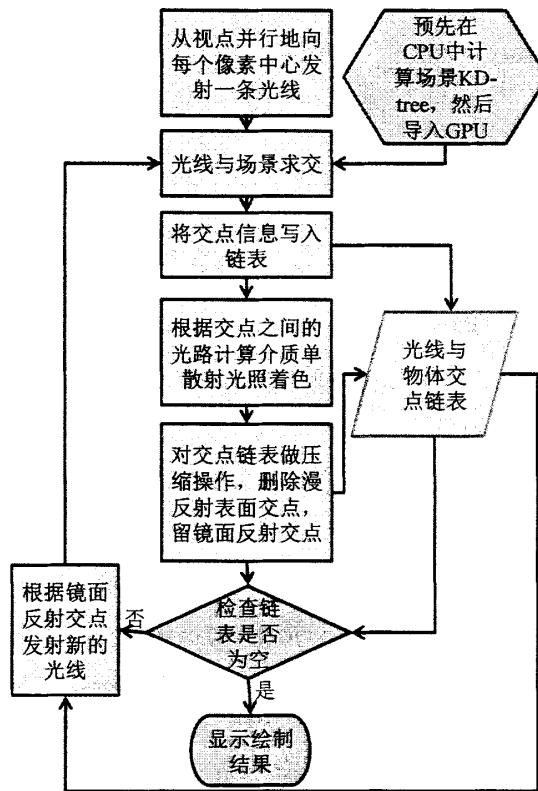


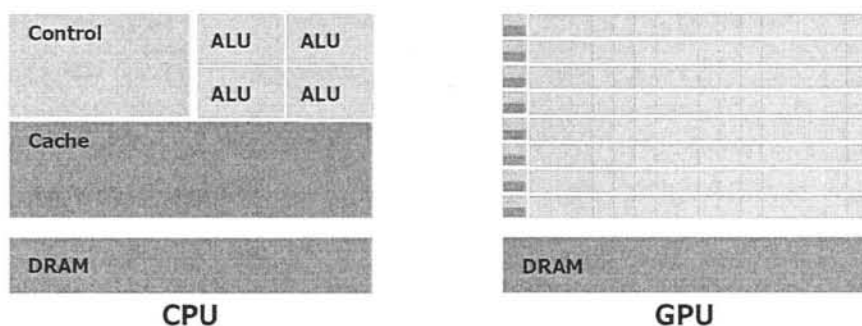
图 2.4 并行算法流程图。

另一种非均匀参与介质模型的参与介质属性是用体数据表示的。这种模型可以表示密度随空间任意变化的参与介质。在这种参与介质模型中，我们同样假设参与介质中的粒子有着同样的散射系数，并且吸收系数与参与介质的密度成正比。在计算参与介质中某一点的密度时，我们利用体数据中最近邻体素的数据进行三线性插值获得。这种参与介质模型可以被用来模拟烟雾或云层。

在本章的算法试验结果中，我们针对上述三种参与介质模型做了实验，并分别给出了实验结果。

2.2 并行绘制框架

由于在绘制参与介质时需要用到光线递进算法，而光线递进非常耗时，所以串行计算的时间开销很大，远远无法达到实时。近年来GPU的迅速发展使得我们能够利用其强大的并行计算能力将一些在CPU上计算效率很低的串行算法移植到GPU上并行执行，从而加快

图 2.5 CPU与GPU硬件架构比较。引自^[93]

计算速度。但并非所有的算法都适合GPU加速，只有当算法能够被划分成大量独立计算任务时，GPU的强大计算能力才能发挥作用。

光线递进与光线跟踪类似，是一种天然可并行的算法。每条由视点射向像素中心的视线与场景的求交计算都是可以独立完成的任务。因此，根据上一节中介绍的光能在参与介质中的传播模型，我们提出一种适合GPU并行计算的绘制算法。该算法流程图如图 2.4。

该算法流程的每一个步骤都在GPU中完成。首先，我们在CPU中预计算一棵场景KD树，并导入GPU中以便进行光线场景求交计算。然后，从视点朝每个像素中心点发射光线与场景求交，计算表面光照，并用一个链表维护交点信息。接着，在交点之间的光路上利用光线递进求得参与介质单散射光照着色。此时，如果交点为漫反射表面的点，则无需进行二次光线递进。因此，从交点链表中删除漫反射表面的点，然后检查链表是否为空。如果为空则结束光线递进计算，显示绘制结果。如果不为空，则继续发射光线计算表面着色以及参与介质单散射着色。具体算法过程如算法 1。

2.3 GPU实现

2.3.1 GPU与CPU架构对比

与CPU功能强大的单核以及多核的架构不同，GPU有着比CPU多得多的轻量级计算核心，但同时缺少复杂的分支预测以及多级缓存机制，如图 2.5。这样的硬件架构设计使得GPU适合处理计算密集型任务，例如3D图形绘制以及图像视频处理。在3D图形绘制中有大量的顶点和像素单元需要处理，因为它们通常都是可以独立完成的计算任务，所以它们被分配到大量的线程中并映射到GPU的众核心上并行执行。因此，运行在GPU上的绘制程序被大大加速。

Algorithm 1 GPU并行算法

Require:

the KD-tree structure for triangle meshes, $tree$
the list of ray-triangle intersection points, $plist$
the list of ray, $rlist$

Ensure:

the rendering result in the display buffer, $buf \leftarrow 0$

- 1: **for** each $pixel \in buf$ in parallel **do**
- 2: Shoot ray from the eye position to the center of $pixel$
- 3: $rlist \leftarrow ray$
- 4: **end for**
- 5: **while not** $rlist.empty()$ **do**
- 6: **for** each $ray \in rlist$ in parallel **do**
- 7: $plist \leftarrow$ the intersection point of ray and $tree$
- 8: $buf \leftarrow$ the surface shading of $point$
- 9: $buf \leftarrow$ the single scattering of media in ray path
- 10: **end for**
- 11: $rlist.clear()$
- 12: **for** each $point \in plist$ in parallel **do**
- 13: **if** $point$ is diffuse **then**
- 14: $plist.remove(point)$
- 15: **else**
- 16: Shoot ray from $point$
- 17: $rlist \leftarrow ray$
- 18: **end if**
- 19: **end for**
- 20: **end while**
- 21: **return** buf

2.3.2 Nvidia CUDA通用计算平台

在早期,程序员要利用GPU的计算资源必须通过3D图形API (OpenGL或者DirectX)向GPU发射指令。但是3D图形API是面向光栅化图形绘制流程设计的,并不十分适合复杂的绘制算法,如光线跟踪。为了使程序员能够利用GPU的高性能对更多的程序进行加速,Nvidia公司在2007年推出了面向通用计算的GPU开发平台CUDA (General-Purpose Parallel Computing Architecture) [93]。CUDA是一个基于C语言的GPU开发平台,它拥有与3D图形API不同的层次化线程、存储模型以及对GPU并行架构的抽象。因此CUDA比3D图形API减少了针对图形绘制流程的限制,更加灵活。本章介绍的算法实现利用了CUDA通用计算平台,因此能够处理光线跟踪以及光线递进等复杂的绘制算法,从而可以利用GPU的并行计算能力加速参与介质单散射绘制效率。

2.3.3 GPU并行计算原语

虽然CUDA平台已经提供了更加灵活的GPU并行计算API,但是并行算法中的许多数据结构操作与串行算法并不相同,例如第2.2节的并行算法流程中对链表(在GPU程序中一般用连续数组实现)元素的删除操作。其根本原因是多线程对链表同时访问时存在冲突。由于线程执行结束的时间是无法确定的,所以当多个线程同时对一个链表进行操作时,不同的访问顺序会导致不同的结果。解决这一问题的经典方法就是使用并行计算原语,其中最常用的一种就是计算数组前缀和(scan primitive)。计算数组前缀和可以用来实现对数组元素的并行选择、删除以及分裂操作。在本章介绍的并行算法中用到的并行原语操作是对数组元素的并行删除操作。下面我们先介绍计算数组前缀和然后介绍数组元素的并行删除。

计算数组前缀和就是将位于当前位置之前的元素加起来作为当前值。如图2.6(a),前两行分别为数组序号和数据,第三行为对数据计算前缀和的结果。如何在GPU上高效并行地计算数组前缀和是一个经典的问题,已经有很多GPU并行计算的相关工作对其进行了研究[94-98]。本章将其作为GPU并行计算中的简单操作不做详细介绍。

如果要并行地删除一个数组中的部分元素,只需要进行一次前缀和计算操作。如图2.6(b),首先对要删除的元素进行标记,其中0表示要删除的元素1表示保留元素。然后,对标记数组进行一次计算前缀和操作,其结果为当前元素新的序号。最后,对于每个元素,如果标记为1则将其写入新序号处,如果标记为0则不作任何操作。最后一行表示了删

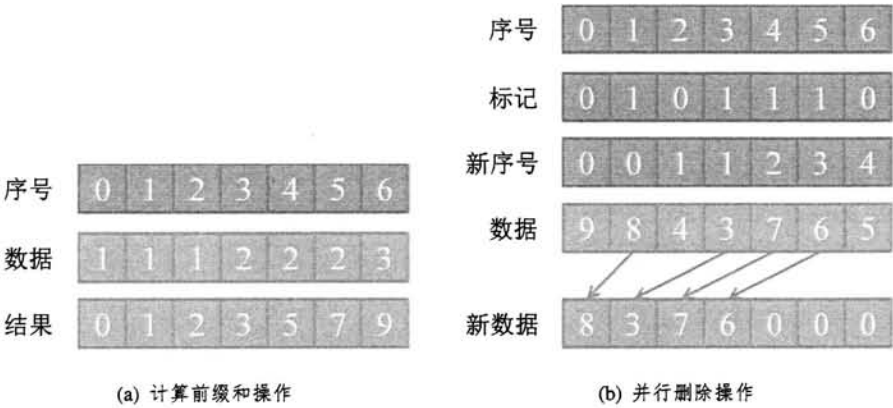


图 2.6 计算前缀和与并行删除操作。

除后的结果，其中不仅删除了不需要的元素而且将保留元素紧密地排列在数组前段。新列号的最后一个元素即为新数据的长度。

2.3.4 本章算法的GPU并行实现

由于GPU显存与内存之间的数据交换只能通过PCI前端总线进行传输，所以其时间开销远大于GPU访问显存的时间。因此，为了尽量减少显存和内存之间的数据交换，本章介绍的并行算法除了预处理阶段的各个步骤都在GPU中完成。

在预处理阶段，我们先将三维模型几何、材质信息读入内存，然后将数据传入全局显存（global device memory）。我们利用KD树结构来加速光线与物体求交的过程。KD树的建立是在CPU上进行，我们采用了SAH方法来计算结点的划分权重。KD树建立完成后，我们将其数据传入全局显存并采用SoA（structure of arrays）的形式进行存储。该存储形式能使GPU线程在访问一个结构对象的元素时访问的是一块连续的全局显存，从而加快线程的访存效率。

在绘制阶段，我们先从成像平面上每个像素中心位置发射视线进行并行光线追踪。在进行光线和物体求交计算时，我们利用线程块内的共享显存（shared memory）构建遍历KD树时所需的栈结构。因为在遍历过程中我们经常会对该栈结构进行读写，所以使用驻留在芯片上的（on chip）共享显存能加快求交速度。求得每条视线与物体的交点后，我们将其存储在一个列表中，并计算每条光线的表面光照着色。然后，我们从视点再次发射视线并与参与介质空间包围盒求交，结合与物体的交点，我们可以求得需要做光线递进的视线段并做光线递进计算。在光线递进时，我们在视线的起始点加上了一段微小的随机距

离进行反走样。我们利用了开源库thrust^[99]中的随机数生成器每次并行地生成一个随机数序列,并利用该序列产生每条视线的随机距离。在计算相位函数时,我们采用了HG相位函数^[100]。完成光线递进后,我们根据交点列表中记录的材质信息利用开源库CUDPP对交点列表做并行删除(compact)操作。该操作并行地删除了列表中漫反射表面的交点,留下镜面反射和折射交点。根据列表中余下的交点我们可以产生相应的反、折射光线,进行下一轮的计算。在最后显示时,我们利用OpenGL的pbuffer技术,先把像素颜色写在一块pbuffer上,然后将其绑定成纹理显示在屏幕上。

2.4 基于梯度的图像空间插值

为了加快绘制速度,我们采用了一种图像空间插值算法计算参与介质单散射光照。该算法利用图像空间像素采样点的计算结果插值计算其他像素点的颜色,减少了光线递进的计算次数。光线递进是参与介质单散射模拟过程中最耗时的部分,我们采用插值的方法减少计算量,从而提高绘制效率。在本节接下来的内容中,我们将分别对均匀参与介质和非均匀参与介质进行分析,并给出相应的图像空间插值算法。

2.4.1 均匀参与介质插值

在第2.1.6节中,我们介绍了均匀参与介质模型。对于均匀参与介质,我们假设其各项系数,即 $\kappa_a(\mathbf{x})$, $\kappa_s(\mathbf{x})$ 以及 $\kappa_t(\mathbf{x})$,在参与介质分布空间内为常数。因此参与介质透光度可以表示为:

$$\tau(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}) = e^{-\int_{\mathbf{x}_0}^{\mathbf{x}} \kappa_t(\mathbf{x}') d\mathbf{x}'} = e^{-\kappa_t \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\|}$$

由上式可知,均匀参与介质的透光度只依赖于光线传播路径的长度。

由于我们不考虑参与介质自发光的情况,并且将参与介质散射光照和物体表面反射光照分开计算,所以去掉公式2.3中的第一项和第三项,均匀参与介质单散射光照可用如下公式表示:

$$L(\mathbf{x}) = \int_{\mathbf{x}_0}^{\mathbf{x}} \tau(\mathbf{x}', \mathbf{x}) \kappa_s(\mathbf{x}') L_i(\mathbf{x}') d\mathbf{x}'$$

将 $\tau(\mathbf{x}', \mathbf{x})$ 和 $L_i(\mathbf{x}')$ 代入其中可得:

$$L(\mathbf{x}) = \kappa_s L_d \int_{\mathbf{x}_0}^{\mathbf{x}} \rho(\omega_o, \omega_i) e^{-\kappa_t (\|\mathbf{x}' - \mathbf{x}\| + \|\mathbf{x}' - \mathbf{x}_l\|)} d\mathbf{x}'$$

将上式积分离散均匀采样 n 个点,令积分路径长度表示为 $d = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\|$,采样点间距表示为 $\Delta t = d/n$,光源到第 j 个采样点的距离表示为 $l_j = \|\mathbf{x}_l - \mathbf{x}_j\|$,则上式可表示成如下离散

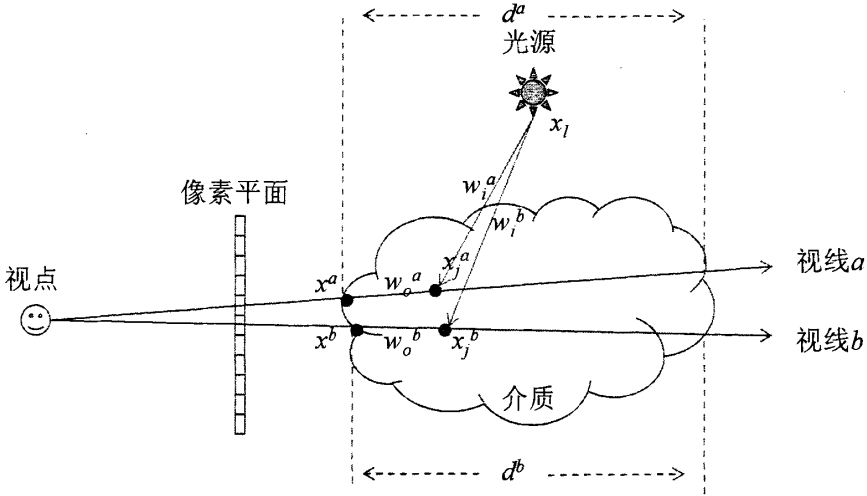


图 2.7 相邻像素点散射光路。

公式:

$$\begin{aligned}
 L(\mathbf{x}) &= \kappa_s L_d \sum_{j=0}^{n-1} \rho(\omega_o, \omega_i) e^{-\kappa_t (j \Delta t + l_j)} \Delta t \\
 &= d \kappa_s L_d \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \rho(\omega_o, \omega_i) e^{-\kappa_t (j \Delta t + l_j)} \quad (2.5)
 \end{aligned}$$

通过观察我们发现, 在相邻的像素点发射的光线路径上, 当路径长度相差很小时, 相应采样点的散射入射方向, 出射方向和距离光源距离都很相近。如图 2.7, 假设 a 和 b 表示相邻像素的两条光线, $\mathbf{x}_j^a$ 和 $\mathbf{x}_j^b$ 分别表示 a, b 两条视线上的第 j 个采样点, $\omega_i^a, \omega_i^b, \omega_o^a$ 和 ω_o^b 分别表示两个采样点散射光入射方向和出射方向, d^a 和 d^b 表示两条光线在参与介质中穿过的路径长度, $\mathbf{x}_l$ 表示光源位置。当 d^a 和 d^b 相近时, $\mathbf{x}_j^a$ 和 $\mathbf{x}_j^b$ 处的各变量, 即 ω_i, ω_o 以及 $l_j = \|\mathbf{x}_l - \mathbf{x}_j\|$ 也很相近。

因此, 若用 S 表示公式 2.5 中的求和的部分:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \rho(\omega_o, \omega_i) e^{-\kappa_t (j \Delta t + l_j)}$$

我们认为当 $|d^a - d^b|$ 足够小时: $S^a \approx S^b$ 。在这种情况下, 我们可以推出散射光能只与光线传播路径长度有关并且正比与该长度: $L(\mathbf{x}) \propto d$ 。

经过上述简化, 我们认为当相邻像素视线的深度相近时可用插值来简化计算。我们首先对图像空间进行采样, 然后精确计算采样点处的单散射光照以及梯度, 最后根据梯度插

值计算剩余像素点的单散射光照。在对图像空间进行采样时,我们首先将图像空间分割成大小相同的区域,该区域大小为 $M \times N$ 个像素,其中 $1 \leq M, N \leq 3$ 。然后在区域内随机采样一个像素点并进行标记,表示该视线需要进行光线递进计算。因为在光线递进深度变化较大的区域需要密集采样而变化较小的地方可以稀疏采样,所以我们在随机采样的同时,对每块区域计算平均光线递进深度,记为 d_{avg} 。记当前视线的光线递进深度为 d 。通过比较 d 与 d_{avg} ,我们可以衡量视线光线递进深度的变化程度。当它们之差大于某一阈值 ϵ 时,我们认为该视线的散射光能不能通过插值计算求得而需进行光线递进计算。经过试验我们发现 $\epsilon = d/10$ 是一个比较理想的取值。因此,当 $|d - d_{avg}| < \epsilon$ 时,我们将该视线进行标记。当标记完所有需要计算的采样点后,在标记点进行光线递进计算单散射光能。

然后,对于所有采样点,我们在图像空间计算其梯度。考虑图像空间中某一点 $\mathbf{p} = [x, y]^T$,我们分别在 x 和 y 方向上找到离它最近的采样点,表示为 $\mathbf{p}_0 = [x_0, y_0]^T$ 和 $\mathbf{p}_1 = [x_1, y_1]^T$ 。在计算梯度时,我们首先做深度归一化处理,除去每个采样点的深度值带来的影响。令 $\hat{L}(\mathbf{p}) = L(\mathbf{p})/d_{\mathbf{p}}$ 表示归一化后的散射能量,则可通过如下公式计算其散射光能梯度:

$$\nabla \hat{L}(\mathbf{x}) = \left[\frac{\hat{L}(\mathbf{p}_0) - \hat{L}(\mathbf{p})}{x_0 - x}, \frac{\hat{L}(\mathbf{p}_1) - \hat{L}(\mathbf{p})}{y_1 - y} \right]$$

对于剩余的像素点,我们首先在需要计算的像素周围 $M \times N$ 个像素范围内选取合适的采样点,然后进行插值计算。记当前计算的像素 $\mathbf{p}$ 的深度为 d 其散射光能插值结果为 $L(\mathbf{p})$ 。其周围第 k 个采样点的深度记为 d_k 散射光能记为 $L(\mathbf{p}_k)$ 。如果 d 与 d_k 的值相差太大,我们认为这样的采样点不适合用于当前像素点的插值计算。我们同样使用上述 ϵ 值作为衡量两像素视线光线递进深度差异度的阈值。因此,当 $|d - d_k| < \epsilon$ 时,我们用如下公式进行插值:

$$L(\mathbf{p}) = d \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \hat{L}(\mathbf{p}_k) + \nabla \hat{L}(\mathbf{p}_k) \cdot (\mathbf{p} - \mathbf{p}_k) \quad (2.6)$$

其中, n 为当前选取的采样点个数。

2.4.2 非均匀参与介质插值

除了均匀参与介质,我们的插值算法还适用于参与介质密度随高度以自然指数的对数变化的非均匀参与介质。如第2.1.6节中所介绍,该种参与介质密度可表示为: $D(h) = ae^{-bh}$ 。由该公式可知,随着高度的上升密度变的更加稀薄,而高度降低密度更加浓厚。对于该种参与介质,在采样阶段我们采用如同第2.4.1节中介绍的采样方法,但在插值阶段需要考虑参与介质密度随高度变化带来的不同。将密度变化加入公式2.6中可

得:

$$\begin{aligned} L(\mathbf{p}) &= D(h) d \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} (\widehat{L}(\mathbf{p}_k) + \nabla \widehat{L}(\mathbf{p}_k) \cdot (\mathbf{p} - \mathbf{p}_k)) \frac{1}{D(h_k)} \\ &= d \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\widehat{L}(\mathbf{p}_k) + \nabla \widehat{L}(\mathbf{p}_k) \cdot (\mathbf{p} - \mathbf{p}_k)) e^{b\Delta h} \end{aligned}$$

其中, $\Delta h = h_k - h$, h_k 和 h 表示光线递进光路的平均垂直高度: 若用 $h_{\mathbf{x}_0}$ 和 $h_{\mathbf{x}}$ 表示光路的起始点和终结点的垂直高度, 则 $h = (h_{\mathbf{x}_0} + h_{\mathbf{x}})/2$ 。

2.5 实验结果

我们用C++和Nvidia CUDA 2.3实现了本文的绘制算法, 并在一配置为Intel CoreTM 2 Quad 2.38 GHz 的CPU, 3.25G 内存, 和1G显存的Nvidia GeForce GTX 285显卡的台式机上进行测试。本文中的所有试验结果的分辨率均为 800×600 , 并且可以实时地修改光源的位置和颜色, 以及参与介质的各项属性。

表 2.1 运行时间统计 (单位: 毫秒)

模型	三角面片数	帧率	表面着色绘制时间	参与介质散射绘制时间
康奈尔盒	1.9k	6.5	130.5	22.7
自由女神	37k	9.6	82.9	21.6
飞机	5.7k	10	51	48.5

运行时的统计数据可见表格 2.1。其中对于均匀参与介质和自然常数指数变化的非均匀参与介质, 表面着色的光线追踪计算时间占据了整个计算时间的大部分, 参与介质的绘制时间对于不同模型差不多。对于体数据表示的非均匀参与介质, 在计算参与介质密度时要进行三线性插值, 因此其绘制时间更长。总体而言, 模型面片数的多少对本文算法效率影响不大。

在图 2.8 中我们绘制了三种不同参与介质的单散射现象, 其参与介质参数为 $\kappa_a = 0.1$, $\kappa_s = 0.3$, $g = 0$ 。其中图 2.8(a) 为均匀参与介质单散射, 由于光源完全浸没在参与介质中, 因此其周围出现了一圈光晕。图 2.8(b) 为密度随高度以自然常数指数变化的非均匀参与介质, 其密度函数参数为 $a = 1$, $b = 1$ 。该参与介质的颜色随高度降低逐渐变的更浓。图 2.8(c) 为密度用体数据表示的非均匀参与介质, 该体数据取自文献^[100]中的场景数据,

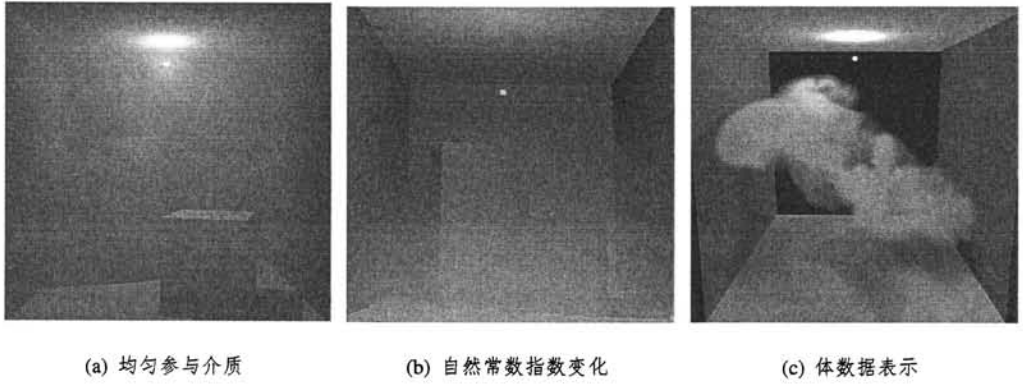


图 2.8 均匀参与介质(a), 密度随自然常数指数变化非均匀参与介质(b) 以及密度为体数据表示的非均匀参与介质(c)中的单散射绘制结果。

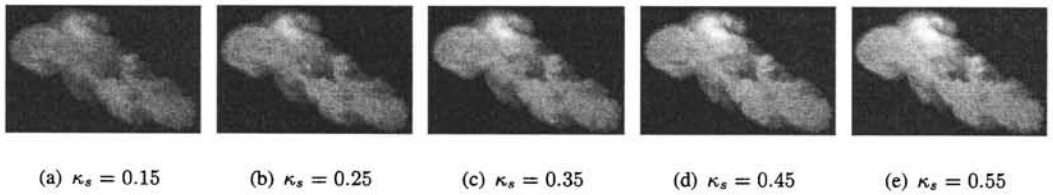


图 2.9 不同散射系数的非均匀参与介质单散射绘制结果。

该种参与介质的密度可以随空间任意变化, 在计算物体表面着色时我们考虑了其对物体表面产生的阴影。

在图 2.9、图 2.10、图 2.11 中, 我们绘制了一个非均匀的烟雾参与介质, 并且交互地修改参与介质的吸收系数、散射系数以及相位函数中的参数。在图 2.9 中, 我们固定吸收系数和相位函数为: $\kappa_a = 0$, $g = 0$ 。随着散射系数的逐渐增加, 参与介质颜色逐渐加深。在图 2.10 中, 我们固定散射系数和相位函数为: $\kappa_s = 0.3$, $g = 0$ 。随着吸收系数的逐渐增加, 参与介质由白色的云变成黑色的烟, 并且其产生的阴影也随之加深。在图 2.11 中, 我们固定吸收系数和散射系数为: $\kappa_a = 0.1$, $\kappa_s = 0.5$ 。随着相位函数参数 g 的变化, 参与介质的散射分布也随之发生改变。参数 g 的值从靠近 -1 逐渐变化为靠近 1, 参与介质散射由后向散射变为前向散射。本试验中所有参数的交互修改均可实时完成, 因为无需预计算所以修改参数对绘制效率不会产生影响。

在图 2.12 中我们将本文算法实时绘制的结果与利用 PBRT^[100] 光线追踪绘制引擎 (1.03 版) 离线绘制的结果做了比较。在绘制过程中, 我们采用的参与介质参数均为 $\kappa_a = 0$,

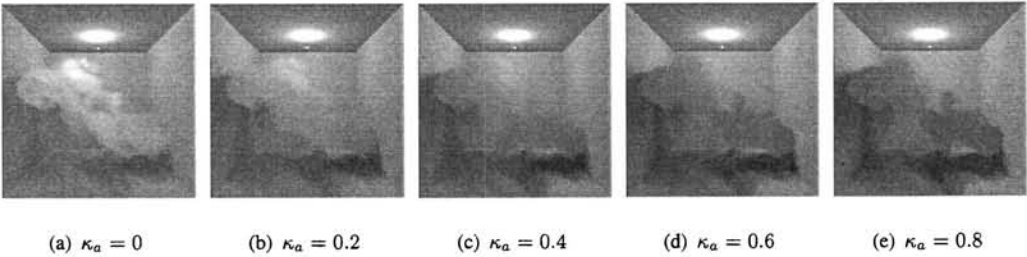


图 2.10 不同吸收系数的非均匀参与介质单散射绘制结果。

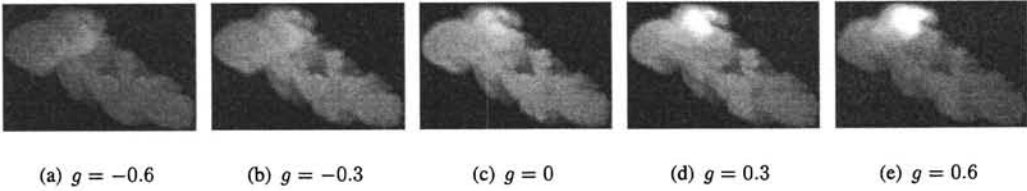


图 2.11 不同相位函数参数的非均匀参与介质单散射绘制结果。

$\kappa_s = 0.55$, $g = 0$ 。实时绘制结果每像素采样一个点，采样点为像素中心位置，绘制时间为33.2毫秒，离线算法采用最优候选（best candidate）采样策略，每像素8个采样点，绘制时间为44.6秒。从绘制结果上来看，实时绘制结果相比离线绘制结果丢失了一些细节，但是仍然可以接受。

在图 2.13(a) 和图 2.13(b) 中，我们绘制了密度函数参数为 $a = 3$, $b = 2.5$ 的非均匀参与介质。在这两幅结果图中，浸没在参与介质中的物体表面带有参与介质的颜色，使得表面着色看起来更加柔和。在图 2.13(a) 中，由于底部参与介质非常浓，所以自由女神像的底座被参与介质颜色所覆盖。在图 2.13(c) 中，我们绘制了飞机穿越云层的情况。

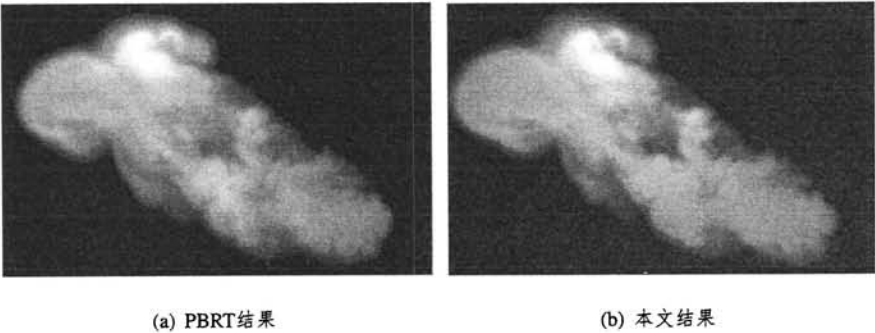


图 2.12 离线绘制结果与本文实时绘制结果的对比。

2.6 小结

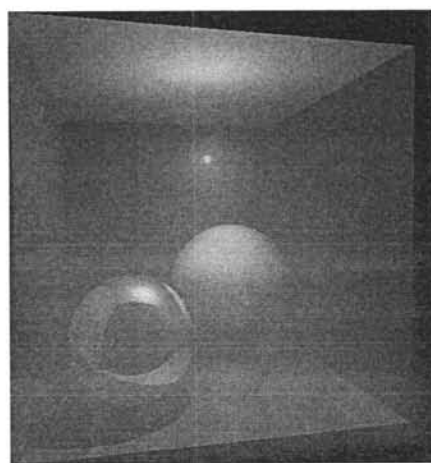
本文针对参与介质的单散射绘制提出了基于GPU的可交互绘制算法。通过图像空间插值,减少了光线递进的计算次数,从而减少了计算量并加快了绘制速度。算法经过并行设计,各个步骤均可完全并行。算法实现基于GPU并行光线追踪框架,使用了GPU通用计算平台CUDA进行编程,利用了GPU的强大并行计算能力,提高了绘制效率。在最后的实验结果中,该算法达到了可交互的绘制效率并支持用户修改实时光照和参与介质属性。本文算法的优点在于:不需要任何预计算便可达到可交互的绘制效率,其次是算法对光能在参与介质中的单散射模拟是基于物理模型,并且支持各种不同属性的参与介质,包括:均匀、非均匀、各项同性以及各向异性参与介质。本文算法的不足之处在于不能处理多散射的情况,而多散射的计算需要比单散射大得多的计算量,这是本文未来工作将要努力的一个方向。其次是目前还只能支持点光源,在以后的工作中希望能够加入环境光等高级光照效果。



(a) 自由女神



(b) 飞机云层



(c) 康奈尔盒

图 2.13 更多参与介质单散射绘制实验结果。

第3章 基于梯度分析的增强绘制

计算机图形绘制技术在过去的几十年中获得了巨大的发展。传统真实感绘制技术以基于物理的方法获得了有较强真实感的结果。然而,最近提出的表意绘制则着重于将视觉上可感知的信息传递给观察者。这些感知信息往往能够帮助观察者更好地获取物体或场景的形状并进而进行识别。在本章的工作中,我们通过对物体表面细节的放大达到三维增强绘制的效果。目前,已经有许多研究者在这一领域提出解决方法。其中有的^[53]将二维图像增强的技术借用到三维绘制中,有的^[52]利用心理学的测试结果指导增强绘制过程。

受到图像增强技术的启发,我们将二维梯度增强技术引入到三维绘制中。与直接处理二维绘制结果不同,我们首先求取三维绘制结果相对图像空间坐标的梯度,然后利用梯度对绘制结果进行增强,如图 3.1。我们分析了点光源照射情况下梯度中的各项对增强结果的影响,并通过一些简化将这一方法扩展至环境光照情况。我们方法的增强结果考虑了物体几何,投影变换,可见性以及高光的梯度。与前人的方法相比,由于我们的方法考虑了投影变换的梯度,所以我们的方法能够更好地处理掠射角区域(grazing angle area)的增强。本章的所有结果都能利用GPU实时地绘制完成。

3.1 图像梯度增强介绍

在图像处理中,我们常用图像梯度信息来对图像进行增强。图像梯度增强的原理是通过求梯度获取原图的边缘以及细节信息,然后将梯度图叠加到原图上,达到对细节进行增强的效果,如图 3.2。令 $I(x,y)$ 和 $\nabla I(x,y)$ 表示原图和图像梯度, $I_E(x,y)$ 表示增强结果。



图 3.1 三维梯度增强绘制算法流程图。

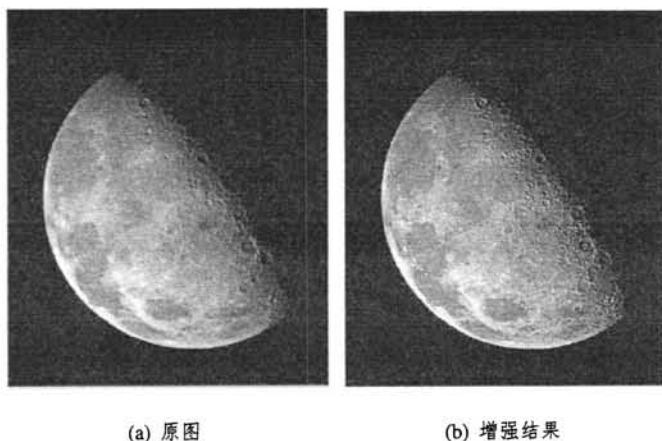


图 3.2 基于梯度的图像增强。

$I_E(x, y)$ 可用如下公式进行计算:

$$I_E(x, y) = I(x, y) + \lambda \text{mag}(\nabla I(x, y))$$

其中, $\text{mag}(\cdot)$ 表示求模函数。在图像处理中, 该函数可以用L1-norm或者L2-norm进行求解:

$$\text{mag}_{L1}(\mathbf{v}) = |v_x| + |v_y|$$

$$\text{mag}_{L2}(\mathbf{v}) = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

3.2 梯度增强绘制理论

为了能将上述二维图像梯度增强技术引入到三维绘制, 我们需要求得绘制结果相对于图像空间坐标的梯度。令 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{p}$ 分别表示三维空间的点以及在二维成像平面上的投影, 则该梯度可以用如下公式表示:

$$\nabla I(\mathbf{p}) = \frac{\partial I(\mathbf{p})}{\partial \mathbf{p}} = \frac{\partial I(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{p}}$$

我们首先分析从三维空间到二维空间投影变换以及其梯度 $\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{p}}$, 然后求取绘制结果相对于三维空间坐标的梯度 $\frac{\partial I(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}$ 。

3.2.1 投影变换的梯度

若给定一个三维空间的点 $\mathbf{x} = [x, y, z]^T$, 我们可通过一个非线性变换将其投影到一个二维平面 $\mathbf{p} = [u, v]^T$ 。如图 3.3, 假设点 $\mathbf{x}$ 的坐标为相机坐标, 那么我们可以用如下公式表

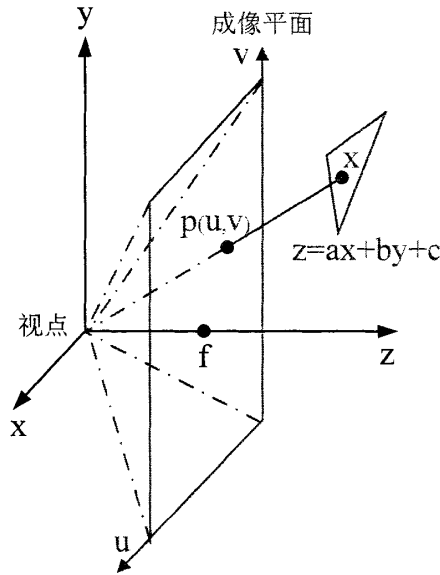


图 3.3 投影变换示意图。

示从点 $\mathbf{x}$ 到点 p 的坐标变换:

$$u = \frac{x}{z} f, v = \frac{y}{z} f \quad (3.1)$$

其中, f 为成像平面的坐标。我们假设输入模型以三角形网格表示。令 T 表示包含点 $\mathbf{x}$ 的三角形, 三角形 T 所在的平面方程表示为: $z = ax + by + c$ 。将该式与公式 3.1 结合, 我们可求得:

$$x = \frac{uc}{f - au - bv}, y = \frac{vc}{f - au - bv}, z = \frac{cf}{f - au - bv}$$

投影变换的梯度可以用如下公式表示:

$$\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{p}} = [\mathbf{x}_u, \mathbf{x}_v],$$

$$\mathbf{x}_u = \left[\frac{c(f - bv)}{(f - au - bv)^2}, \frac{avc}{(f - au - bv)^2}, \frac{afc}{(f - au - bv)^2} \right]^T,$$

$$\mathbf{x}_v = \left[\frac{buc}{(f - au - bv)^2}, \frac{c(f - au)}{(f - au - bv)^2}, \frac{bfc}{(f - au - bv)^2} \right]^T$$

令 $\mathbf{x}_0$, $\mathbf{x}_1$ 以及 $\mathbf{x}_2$ 表示 T 的三个顶点, 则法线方向 $\mathbf{n}_T = [n_x, n_y, n_z]$ 可用如下公式表示:

$$\mathbf{n}_T = (\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0) \otimes (\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_0)$$

三角形 T 所在的平面方程可以用如下公式表示:

$$\mathbf{n}_T \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) = 0$$

由此, 我们可计算出平面方程的参数:

$$a = -\frac{n_x}{n_z}, b = -\frac{n_y}{n_z}, c = \frac{\mathbf{n}_T \cdot \mathbf{x}_0}{n_z}$$

令 A 表示 $\frac{\partial}{\partial \mathbf{p}} \mathbf{x}$, 则 A 是一个 3×2 的矩阵。我们可计算三角形网格上任意一点处的 A 矩阵。

3.2.2 绘制结果在三维空间的梯度

令 $\mathbf{n}(\mathbf{x})$ 表示三维空间中一点 $\mathbf{x}$ 处的法向, $\rho(\mathbf{x}, \omega_o, \omega_i)$ 表示BRDF (双向反射率分布函数), $L(\mathbf{x}, \omega_i)$ 表示入射的光能, $V(\mathbf{x}, \omega_i)$ 表示可见性函数, 则点 $\mathbf{x}$ 处从 ω_o 方向反射射的光能可用如下反射绘制方程表示^[1]:

$$I(\mathbf{x}, \omega_o) = \int_{\Omega} L(\mathbf{x}, \omega_i) \rho(\mathbf{x}, \omega_o, \omega_i) V(\mathbf{x}, \omega_i) \cos \theta d\omega_i \quad (3.2)$$

其中, ω_i 和 ω_o 分别表示入射和反射光线方向。在本章中, 我们用全局坐标表示这两个方向变量。 θ 表示入射光线反方向和法向之间的夹角。 Ω 表示整个球面积分区域。

将上式子中的几何项表示为: $G(\mathbf{x}, \omega_i)$, 其中包含了对负数在0处的截断函数, 则反射方程相对三维坐标的梯度可以用如下公式表示:

$$\frac{\partial I(\mathbf{x}, \omega_o)}{\partial \mathbf{x}} = \int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} (L(\mathbf{x}, \omega_i) \rho(\mathbf{x}, \omega_o, \omega_i) G(\mathbf{x}, \omega_i) V(\mathbf{x}, \omega_i)) d\omega_i$$

我们首先考虑点光源的情况。通过分析点光源情况下绘制结果梯度中的各项对增强绘制结果的影响, 我们对梯度增强绘制在环境光照的情况进行适当简化保留关键的项, 省略不重要的项, 然后将其扩展到环境光照增强绘制中。

3.2.3 点光源情况分析

令点光源发射的光能强度为 L 。因为我们不考虑介质对光能的散射, 所以我们假设光能在传播中不随距离变大而衰减。在点光源情况下, 公式 3.2 中的入射光线半球积分可以简化为单个入射方向。那么物体表面反射光能可用如下公式表示:

$$L(\mathbf{x}, \omega_o) = L \rho(\mathbf{x}, \omega_o, \omega_i) V(\mathbf{x}, \omega_i) G(\mathbf{x}, \omega_i)$$

令光源和相机位置表示为: $\mathbf{l}$ 和 $\mathbf{c}$, 那么入射光线和反射光想方向可用如下公式计算:

$$\omega_i(\mathbf{x}) = \frac{(\mathbf{l} - \mathbf{x})}{\|\mathbf{l} - \mathbf{x}\|}, \omega_o(\mathbf{x}) = \frac{(\mathbf{c} - \mathbf{x})}{\|\mathbf{c} - \mathbf{x}\|}$$

因此, 我们省略 $G(\mathbf{x}, \omega_i)$, $V(\mathbf{x}, \omega_i)$, $\rho(\mathbf{x}, \omega_o, \omega_i)$ 以及 $I(\mathbf{x}, \omega_o)$ 中的 ω_i 和 ω_o 。那么反射光能的梯度可简化表示为:

$$\frac{\partial I(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = L \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} (\rho(\mathbf{x}) V(\mathbf{x}) G(\mathbf{x}))$$

可见性函数的梯度比其他几项的梯度更加复杂。这是因为, 在点光源的照射下, 落在阴影区域内部和外部的物体表面可见性函数值为常数。所以落在阴影区域内部和外部点的可见性函数梯度为零, 只有在阴影边缘点的可见性函数梯度不为零。根据这一观察, 我们把上式中的求偏导问题划分为两步: 我们首先考虑可见性函数的梯度为零的区域, 即非阴影边缘的区域。然后, 我分析阴影边缘区域可见性函数的梯度, 并将其加入上一步的结果中。

令非阴影边缘区域的绘制结果梯度表示为: $\nabla I^{sh}(\mathbf{x})$, 则其可用如下公式表示:

$$\begin{aligned} \nabla I^{sh}(\mathbf{x}) &= L V(\mathbf{x}) \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} (\rho(\mathbf{x}) G(\mathbf{x})) \\ &= L V(\mathbf{x}) \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \rho(\mathbf{x}) G(\mathbf{x}) + \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} G(\mathbf{x}) \rho(\mathbf{x}) \right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

令入射方向和法线方向的点积表示为: $D(\mathbf{x}) = \omega_i(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x})$ 。因为函数 $G(\mathbf{x})$ 中包含将负值截断至零函数, 所以它可表示为: $G(\mathbf{x}) = \max(D(\mathbf{x}), 0)$ 。但是函数 $G(\mathbf{x})$ 在 $D(\mathbf{x}) = 0$ 处不可导, 为了简化计算, 我们定义 $G(\mathbf{x})$ 在 $D(\mathbf{x}) = 0$ 处的导数为0。则几何项 $G(\mathbf{x})$ 的梯度可用如下公式表示:

$$\nabla G(\mathbf{x}) = \begin{cases} \omega_i^T \nabla \mathbf{n}(\mathbf{x}) + \mathbf{n}^T \nabla \omega_i(\mathbf{x}) & D(\mathbf{x}) > 0 \\ 0, & \text{others} \end{cases}$$

其中, $\nabla \mathbf{n}(\mathbf{x})$ 和 $\nabla \omega_i(\mathbf{x})$ 的计算公式推导如下。

令 T 为包含点 $\mathbf{x}$ 的三角形。令三角形 T 的三个顶点为 $\mathbf{x}_0$, $\mathbf{x}_1$, $\mathbf{x}_2$ 。点 $\mathbf{x}$ 的重心坐标 $\mathbf{b}_v(\mathbf{x}) = [b_0(\mathbf{x}), b_1(\mathbf{x}), b_2(\mathbf{x})]^T$ 可表示为:

$$b_0(\mathbf{x}) = \frac{1}{2|T|} \mathbf{n}_T \otimes (\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1) \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_1)$$

$$b_1(\mathbf{x}) = \frac{1}{2|T|} \mathbf{n}_T \otimes (\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_2) \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_2)$$

$$b_2(\mathbf{x}) = \frac{1}{2|T|} \mathbf{n}_T \otimes (\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0) \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)$$

其中, $|T|$ 表示三角形的面积, $\mathbf{n}_T$ 表示三角形的法向。因此, 点 $\mathbf{x}$ 处的法线方向 $\mathbf{n}(\mathbf{x})$ 可用顶点法向 N_v 以及重心坐标 $\mathbf{b}_v(\mathbf{x})$ 插值求得:

$$\mathbf{n}(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{h}(\mathbf{x})}{\|\mathbf{h}(\mathbf{x})\|}, \mathbf{h}(\mathbf{x}) = N_v \mathbf{b}_v(\mathbf{x})$$

其中, $N_v = [\mathbf{n}_0, \mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2]$ 表示顶点法向矩阵。

那么, 法向梯度可以表示为:

$$\begin{aligned}\nabla \mathbf{n}(\mathbf{x}) &= \frac{\partial \mathbf{h} \|\mathbf{h}\|^{-1}}{\partial \mathbf{h}} \nabla \mathbf{h}(\mathbf{x}) \\ &= \frac{\|\mathbf{h}\|^2 - \mathbf{h} \mathbf{h}^T}{\|\mathbf{h}\|^3} N_v \nabla \mathbf{b}_v(\mathbf{x}),\end{aligned}$$

$\nabla \mathbf{n}(\mathbf{x})$ 为一个三角形网格上的 3×3 的分段常量矩阵。重心坐标的梯度可以用如下公式表示:

$$\begin{aligned}\nabla b_0(\mathbf{x}) &= \frac{1}{2|T|} \mathbf{n}_T \otimes (\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1) \\ \nabla b_1(\mathbf{x}) &= \frac{1}{2|T|} \mathbf{n}_T \otimes (\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_2) \\ \nabla b_2(\mathbf{x}) &= \frac{1}{2|T|} \mathbf{n}_T \otimes (\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0)\end{aligned}$$

在本章中, 我们考虑两种常见的BRDF: Lambert和Phong模型。我们分别对它们进行求导。

Lambert 令漫反射系数为 k_d , 则公式 3.3 可表示为:

$$\nabla I^{sh}(\mathbf{x}) = k_d L V(\mathbf{x}) \nabla G(\mathbf{x})$$

Phong 令环境光, 漫反射, 镜面反射系数以及Phong指数为 k_a , k_d , k_s 以及 a 。 L_a 表示环境光强能量, 则反射光能量可用如下公式表示:

$$I(\mathbf{x}) = (L_a k_a + L k_d \langle \mathbf{n}, \omega_i \rangle + L k_s \langle \mathbf{r}, \omega_o \rangle^a) V(\mathbf{x})$$

其中, $\mathbf{r} = 2 \langle \mathbf{n}, \omega_i \rangle \mathbf{n} - \omega_i$, $\langle, \rangle$ 表示向量点积。令 $G^{Ph}(\mathbf{x})$ 表示Phong模型中的高光项 $\langle \mathbf{r}, \omega_o \rangle^a$, 则公式 3.3 可表示为:

$$\nabla I^{sh}(\mathbf{x}) = L (k_d \nabla G(\mathbf{x}) + k_s \nabla G^{Ph}(\mathbf{x})) V(\mathbf{x})$$

其中, $\nabla G^{Ph}(\mathbf{x})$ 的公式推导如下。

根据 $\nabla G^{Ph}(\mathbf{x})$ 的定义, 其梯度可以用如下公式表示:

$$\begin{aligned}\nabla G^{Ph}(\mathbf{x}) &= \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} (\langle \mathbf{r}(\mathbf{x}), \omega_o(\mathbf{x}) \rangle^a) \\ &= a \langle \mathbf{r}, \omega_o \rangle^{a-1} (\mathbf{r}^T \nabla \omega_o(\mathbf{x}) + \omega_o^T \nabla \mathbf{r}(\mathbf{x}))\end{aligned}$$

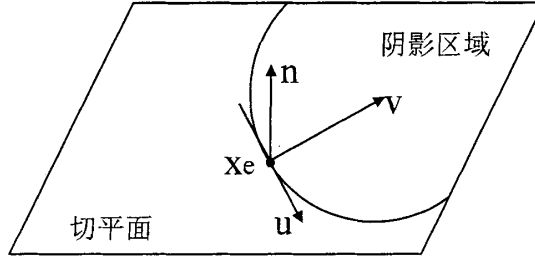


图 3.4 可见性函数梯度示意图。点 x_e 为阴影边缘上的一点， u 方向为该点的切线方向， v 方向与切线方向垂直。

其中， $r(x)$ 的梯度可以用如下公式表示：

$$\begin{aligned}\nabla r(x) &= \frac{\partial}{\partial x} (2 \langle n(x), \omega_i(x) \rangle n(x) - \omega_i(x)) \\ &= 2(n(n^T \nabla \omega_i(x) + \omega_i^T \nabla n(x)) + \langle n, \omega_i \rangle \nabla n(x)) + \nabla \omega_i(x)\end{aligned}$$

ω_i 和 ω_o 的梯度可以用如下公式表示：

$$\begin{aligned}\nabla \omega_i(x) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{l - x}{\|l - x\|} \right) = \frac{(l - x)(l - x)^T - \|l - x\|^2}{\|l - x\|^3} \\ \nabla \omega_o(x) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{c - x}{\|c - x\|} \right) = \frac{(c - x)(c - x)^T - \|c - x\|^2}{\|c - x\|^3}\end{aligned}$$

我们分析了不考虑可见性函数梯度的情况，接下来我们将单独分析可见性函数梯度，并将其加入上面的结果中。令 $\nabla I(x)$ 表示考虑可见性函数梯度的绘制结果梯度，则它可以用如下公式表示：

$$\nabla I(x) = \nabla I^{sh}(x) + L \rho(x) G(x) \nabla V(x)$$

如图 3.4，令 x_e 为阴影边缘上一点， u 和 v 是其切平面上的两个单位方向。 u 为点 x_e 的切线方向， v 与 u 垂直。假设有一点 x 从点 x_e 处朝 v 方向移动。令 t 为 v 方向上离点 x_e 的距离，则 x 可表示为： $x = x_e + t v$ 。

令点 x 被遮挡时 $V(x) = 1$ ，未被遮挡时 $V(x) = 0$ 。那么沿着方向 v 的可见性函数可以用阶跃函数表示： $1 - H(t - t_e)$ 。因此，可见性函数在阴影边缘的梯度可用如下公式表示：

$$\nabla V(x) = \frac{\partial(1 - H(t - t_e))}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial x}$$

由于阶跃函数的导数是脉冲函数，而脉冲函数给计算带来了难度，所以我们用一个平坦函数来逼近脉冲函数：

$$H(t - t_e) \approx \frac{1}{1 + e^{-2k(t - t_e)}}$$

其中, k 控制了该函数逼近脉冲函数的程度。当 k 趋近无穷时, 该函数收敛于脉冲函数。令方向 $\mathbf{v}$ 与三个坐标轴的夹角为: θ , ϕ 以及 η , 则 $\nabla V(\mathbf{x})$ 可用如下公式计算:

$$\nabla V(\mathbf{x}) \approx \frac{2k e^{-2k(t-t_e)}}{(1 + e^{-2k(t-t_e)})^2} \left[\frac{1}{\cos \theta}, \frac{1}{\cos \phi}, \frac{1}{\cos \eta} \right]^T \quad (3.4)$$

我们已经分析了绘制结果相对于三维空间坐标的梯度 $\nabla I(\mathbf{x})$ 以及投影变换梯度 A 。因此, 我们可用类似二维梯度增强公式 3.1 的方法对三维绘制结果进行增强:

$$\begin{aligned} I_E(\mathbf{p}) &= I(\mathbf{p}) + \lambda \text{mag}(\nabla I(\mathbf{p})) \\ &= I(\mathbf{x}) + \lambda \text{mag}(\nabla I(\mathbf{x}) A) \end{aligned}$$

其中, 求模函数 $\text{mag}(\cdot)$ 的具体公式将在第 3.4 节进行介绍。

3.2.4 环境光照情况推广

在环境光照的情况下, 可见性函数以及半球面入射光场的梯度非常复杂。并且, 根据我们在第 3.4 节中的用户调查, 在点光源情况下, 对增强绘制结果具有重要作用的两项为几何项和投影变换的梯度。因此, 为了降低问题复杂度, 我们根据上述观察对环境光照情况下的梯度增强绘制做了一些简化: 我们只考虑几何项和投影变换的梯度。那么绘制结果相对于三维空间坐标的梯度可用如下公式表示:

$$\nabla I(\mathbf{x}, \omega_o) = \int_{\Omega} L(\mathbf{x}, \omega_i) \rho(\mathbf{x}, \omega_o, \omega_i) \nabla G(\mathbf{x}, \omega_i) d\omega_i$$

同时, 增强绘制结果可用如下公式表示:

$$I_E(\mathbf{x}, \omega_o) = I(\mathbf{x}, \omega_o) + \lambda \text{mag}(\nabla I(\mathbf{x}, \omega_o) A)$$

其中, 求模函数 $\text{mag}(\cdot)$ 的具体公式将在第 3.4 节进行介绍。

3.3 基于法向梯度的三维形状描述符

3.3.1 定义

如上节中讨论, 三角形网格上的法向梯度 $\nabla \mathbf{n}(\mathbf{x})$ 是一个 3×3 矩阵。我们将该矩阵的对角线元素之和作为三角形网格上的一个形状描述符来刻画物体的表面属性。使用该形状描述符的原因有两个: 一是因为类似曲率值是曲率矩阵的特征值的关系, 我们使用法向梯度矩阵特征值的均值来捕捉物体表面的高阶形状特征。二是使用标量作为描述符使得我们能够更容易地为用户设计调控函数及其参数用于调整绘制结果中增强的程度。

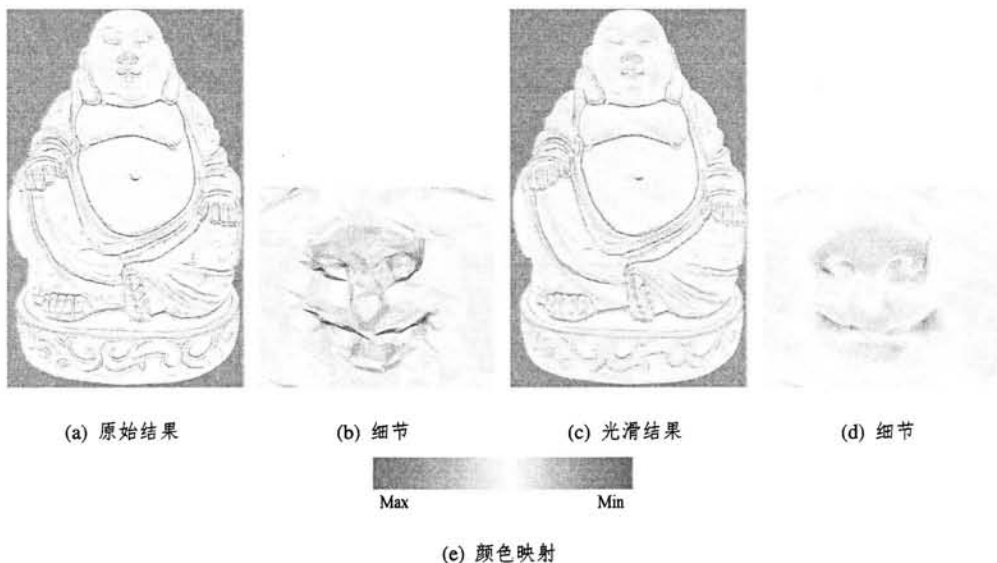


图 3.5 形状描述符的可视化结果。

令矩阵 $\nabla \mathbf{n}(\mathbf{x})$ 的三个特征值为: k_0, k_1, k_2 。我们将它们的均值:

$$k = \frac{1}{3}(k_0 + k_1 + k_2) = \frac{1}{3}\text{trace}(\nabla \mathbf{n}(\mathbf{x})) \quad (3.5)$$

作为形状描述符。经过试验,我们发现 k 能够描述物体表面的凹凸细节。但是,观察图 3.5(c)发现 $k(\mathbf{x})$ 在三角形的边缘处出现了不连续的情况。其原因可能是三角形网格是对光滑表面的分段线性近似,而其法向插值也是分段线性的,所以其梯度在三角形的边缘出现了不连续。我们对 $k(\mathbf{x})$ 做了一个光滑处理。首先,在每个顶点上计算近似 $k(\mathbf{x})$,然后在三角形网格内部进行中心插值计算。

令每个顶点以及三角形面片上的形状描述符用 $k_v(\mathbf{x})$ 和 $k_f(\mathbf{x})$ 表示。我们采用上节公式推导中的 $\nabla h(\mathbf{x})$ 作为 $k_f(\mathbf{x})$ 的近似值。在计算 $k_v(\mathbf{x})$ 时,我们用该顶点一环领域内的三角形面片 $k_f(\mathbf{x})$ 值做加权平均:

$$k_v \approx \frac{\sum_{T \in \text{neibr}(v)} |T| k_f}{\sum_{T \in \text{neibr}(v)} |T|},$$

其中, $|T|$ 表示三角形 T 的面积。然后,对三角形面片内其他点利用GPU管线根据重心坐标自动插值获得。如图 3.5(d)显示,经过平滑后的结果比原始结果更加连续。

在计算每个顶点的形状描述符时,我们也可以首先计算每个顶点的法向梯度,然后再计算形状描述符,最后进行插值。计算每个顶点的法向梯度可以采用文献^[101]中的有限

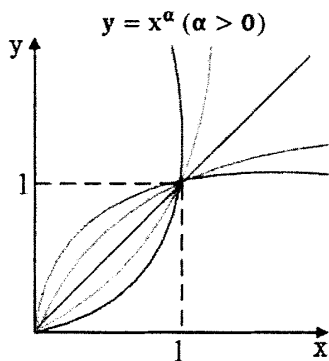


图 3.6 幂函数映射曲线。

差分和最小二乘方法。但是该方法比本文的方法更加复杂，而且时间开销更大，所以我们采用近似处理。

3.3.2 映射函数

受到文献^[57]中方法的启发，我们设计了函数 $S(k)$ 来控制三维形状描述符 $k(\mathbf{x})$ 以达到不同的增强程度。在定义函数 $S(k)$ 时，我们主要考虑了两个方面的因素，并用两个用户指定参数 α 和 β 来表示。

- **非线性映射** 使增强效果在不同细节层次得以控制能够使用户更加方便的获得理想的效果，因此我们将形状描述符以幂函数的曲线非线性地进行映射，并用参数 α 控制幂指数，如图 3.6。通过调整参数 α 我们可以调整增强区域的大小（集中于极值区域或是扩大增强范围）。
- **幅值** 为了能够方便地进行非线性映射，我们需要将形状描述符归一化到 $[-1, 1]$ 区间。但是，如果使用标准的归一化方法，我们发现有些极值点会降低其他点的对比度。所以，我们首先将其在 $[-\beta, \beta]$ 区间内进行截断，然后再归一化到 $[-1, 1]$ 。通过调整参数 β ，我们可以控制增强的最大程度。

根据上述的两个因素，我们通过两个步骤建立函数 $S(k)$ 。在第一步中，我们采用截断操作和线性映射将原始值归一化到 $[-1, 1]$ ：

$$f(x) = \text{clamp}\left(\frac{x}{\beta}, -1, 1\right) \quad (3.6)$$

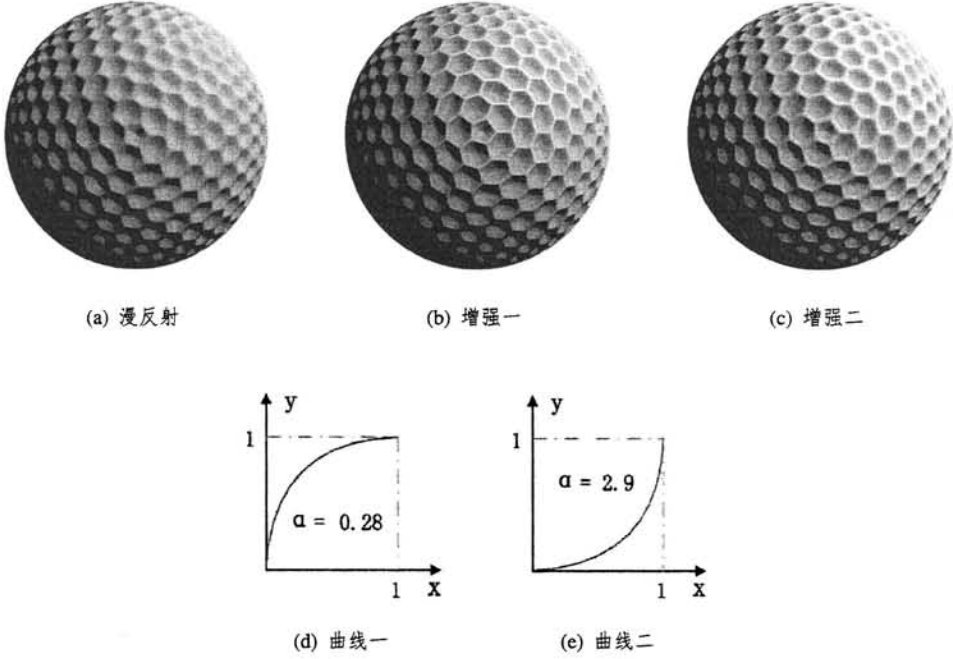


图 3.7 通过调节函数 $S(k(\mathbf{x}))$ 达到不同细节层次的增强绘制, 图(a)为传统绘制结果, 图(b)和图(c)是分别根据图(d)和图(e)中的曲线进行不同细节层次的增强绘制结果。

然后, 在第二步中, 我们利用幂函数调整增强的细节程度:

$$g(x) = \text{sign}(x)|x|^\alpha \quad (3.7)$$

其中, $\text{sign}(x)$ 表示 x 的符号。因此, 函数 $S(k)$ 可用如下公式表示:

$$S(x) = h \circ g(x) \quad (3.8)$$

在实际计算时, 我们将增强绘制方程中的 $\nabla \mathbf{n}(\mathbf{x})$ 替换成 $S(k(\mathbf{x}))$ 。

我们可以通过函数 $S(k(\mathbf{x}))$ 达到对不同细节层次的增强, 如图 3.7。其中, 图 3.7(c) 的增强绘制参数为: $\alpha = 2.9$, $\beta = 45$, 图 3.7(b) 的增强绘制参数为: $\alpha = 0.28$, $\beta = 975$ 。

3.4 实现细节及分析

在具体的实现时, 我们并没有采用传统的L1-norm或L2-norm来实现求模函数 $\text{mag}(\cdot)$ 。这是因为这两种方法计算的结果都是非负的数值, 丢失了梯度中的符号信息。因此, 我们

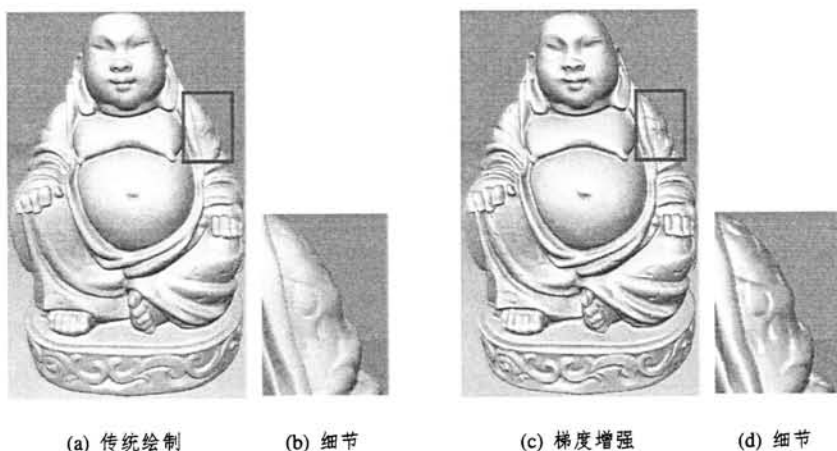


图 3.8 在Lambert光照模型下，传统绘制结果与梯度增强绘制结果的比较。

将向量的各个分量相加进行求模：

$$\text{mag}(\mathbf{x}) = \mathbf{x} \cdot \mathbf{e}$$

其中， $\mathbf{e} = [1, 1]^T$ 表示单位各个分量都为1的向量。对于权重参数 λ ，我们发现直接将梯度求模结果加上原结果使得最终的增强绘制结果过亮。因此，我们在原绘制结果前增加一个权重参数：

$$I_E(\mathbf{p}) = \lambda_1 I(\mathbf{x}) + \lambda_2 \text{mag}(\nabla I(\mathbf{x}) A)$$

其中， λ_1 和 λ_2 都是用户输入参数。而为了防止结果过曝， λ_1 和 λ_2 的取值对于不同的模型可能不同。但是经过实验我们发现取 $\lambda_1 = 0.8$ 和 $\lambda_2 = 0.4$ 对于本文中的大部分模型都能获得比较好的结果。

在计算三维形状描述符时，我们首先利用OpenGL管线中的几何着色器（geometry shader）计算每个三角形面片上的值，然后利用混合函数（blending function）通过加权平均领域三角形面片的值计算每个顶点上的值。在这一过程中，我们从输入模型网格的每个顶点对 $\mathbf{x}$ 进行采样。在计算最后增强结果时，我们在片元着色器（fragment shader）中计算投影变换的梯度。

3.4.1 投影变换

图 3.8(c) 显示了Lambert模型的增强绘制结果。从图 3.8(d) 中可以看到，考虑投影变换的梯度使得增强结果在角度交大的斜坡区域，特别是掠射角区域，的增强效果有了改善。

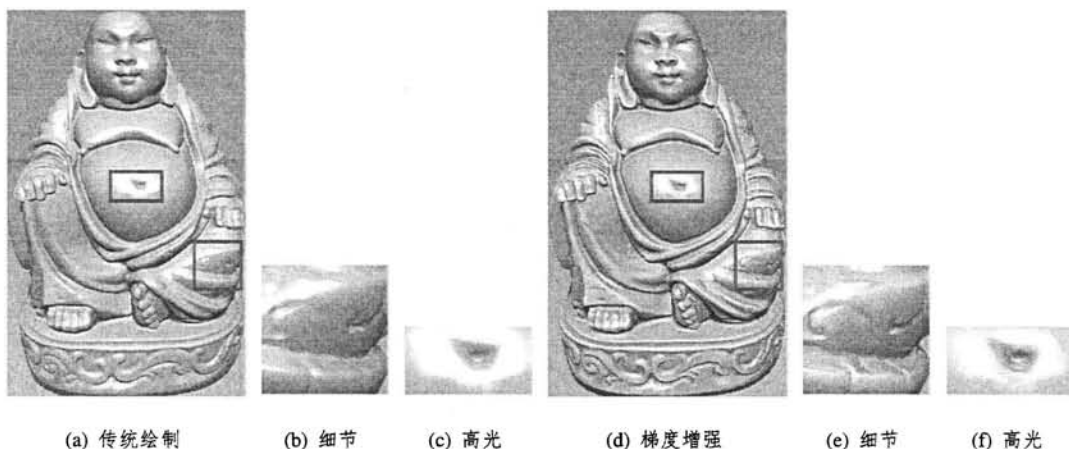


图 3.9 在Phong光照模型下, 传统绘制结果与梯度增强绘制结果的比较。

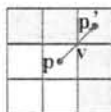


图 3.10 在图像空间计算阴影梯度。

3.4.2 高光

图 3.9(d) 显示了Phong模型的增强绘制结果。在该结果中材质参数为: $k_d = 0.8$, $k_s = 1.0$, $a = 20$ 。从图中可以看到, 在增强结果中, 高光区域的边缘变得越来越暗, 例如: 图 3.9(f) 中弥勒佛肚子上的亮斑。这是因为远离高光中心方向的梯度是负值。但我们认为这一现象并不能改善增强的效果。因此, 我们在下面的增强试验中去掉了BRDF中高光梯度项。

3.4.3 阴影

在计算可见性梯度时, 我们首先找出阴影边缘, 然后根据公式 3.4 计算梯度。这两个步骤都在图像空间完成。在确定阴影边缘时, 我们需要找出阴影的内、外两个边缘, 然后根据如下方法计算 $\mathbf{v}$ 方向和 $t - t_e$ 长度。如图 3.10, 考虑阴影外边缘上的一点 $\mathbf{p}$ 以及其一邻域内的点。其中, 白色的方块表示阴影外的点, 黄色方块表示在阴影中的点。我们的目的是找到邻域中在阴影中的点的中点 $\mathbf{p}'$, 然后用如下公式近似计算方向和距离:

$$\mathbf{v} \approx \frac{\mathbf{x}_{\mathbf{p}'} - \mathbf{x}_{\mathbf{p}}}{\|\mathbf{x}_{\mathbf{p}'} - \mathbf{x}_{\mathbf{p}}\|}, t - t_e \approx -\frac{1}{2} \|\mathbf{x}_{\mathbf{p}'} - \mathbf{x}_{\mathbf{p}}\|$$

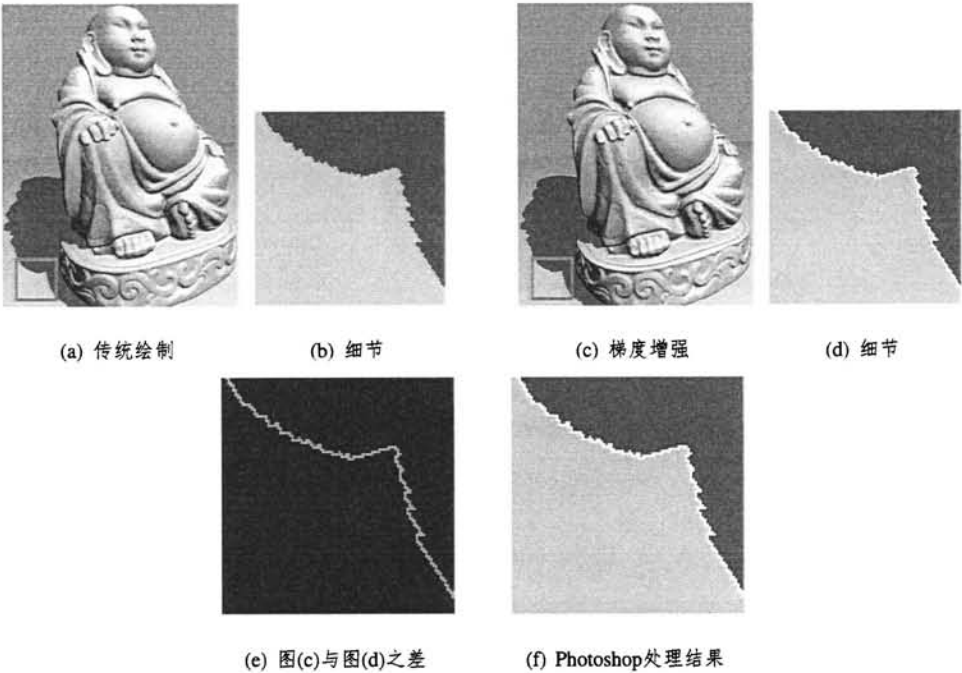


图 3.11 阴影梯度增强绘制结果。

对于在内边缘上的点，其方向和长度可以用如下公式计算：

$$\mathbf{v} \approx \frac{\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_{p'}}{\|\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_{p'}\|}, t - t_e \approx \frac{1}{2} \|\mathbf{x}_{p'} - \mathbf{x}_p\|$$

我们用标准的Shadow Map方法计算阴影。为了使增强效果更加明显，我们将阴影的边缘做了模糊处理。在图 3.11 中可以看到，增强绘制结果中阴影边缘的对比度更加明显，进而使得阴影边缘看起来更加清晰。在该结果中，我们将公式 3.4 中的参数 k 设为100。图 3.11(e) 显示了传统绘制结果和增强绘制结果之差。我们还用Photoshop CS5图像增强工具对传统绘制结果进行增强，并与三维增强绘制结果作比较，如图 3.11(f)。

此外，我们可以调整参数 k 对阴影进行不同程度的增强。如图 3.12。图中 k 的取值分别为20，60以及100。

3.4.4 环境光照

在将三维增强绘制扩展至环境光照^[84]之前，我们针对不同的梯度项对增强结果的影响做了一个用户调查。该用户调查的细节将在第 3.5.2 节详细讨论。从用户调查的结果来看，我们发现几何项和投影变换项的梯度是影响增强绘制结果的重要因素，如图 3.16(a)。

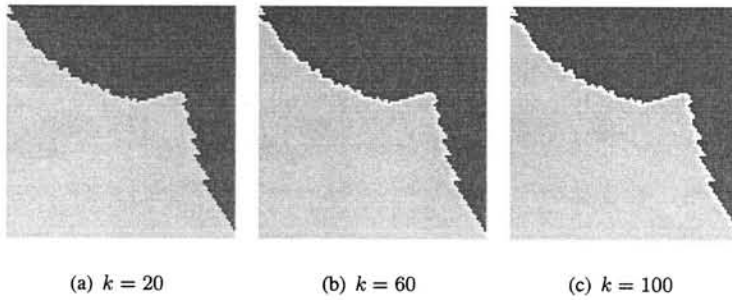


图 3.12 不同程度的阴影梯度增强绘制结果。

由于增强绘制的目标是使人眼能更好地感知所观察物体的形状，所以高光项和阴影项对增强效果几乎没有贡献。

表 3.1 运行时间统计（单位：毫秒）

模型	顶点数	面片数	计算形状描述符时间	帧率
Golf Ball	30k	62k	0.04	644
Buddha	32k	64k	0.04	613
Feline	49k	99k	0.05	471
Armadillo	166k	332k	0.1	176
Dragon	218k	435k	33	19
Angel	237k	474k	37	17
David	400k	800k	63	10

3.5 实验结果

我们在一台配置为Intel(R) Core(TM) Duo E7400 2.8GHz CPU，4G内存以及Nvidia Geforce GTX 285显卡的台式个人电脑上实现了本章算法。表格 3.1 显示了本章方法在不同输入模型下的时间开销，其中包括输入模型的顶点数、面片数、计算形状描述符所消耗时间以及帧率。本章方法对于所有输入模型在点光源以及环境光照下都能达到实时绘制效率。从表格 3.1 可见，在Armadillo模型（166k个顶点）与Dragon模型（218k个顶点）之间存在一个较大的效率差。经过实验我们发现，该现象是由于GPU自身硬件架构导致的，与本章方法无关。由于GPU上的多核流处理器数量有限，当输入模型的定点数量超过多核流

处理器的数目时，一部分流水线的负载增加。而GPU的总体计算时间取决于最慢的流水线的时间，因此会出现一个效率上的差异。

3.5.1 与前人方法对比

我们实现了一些前人的方法Radiance Scaling（简记RS）^[52,57]，并与本章方法进行了对比。经过实验，本章方法在不考虑投影变换梯度（gradient of projection，简记GOP）的情况下能够得到与前人方法类似的增强效果。但是，加入投影变换梯度以后，本章方法能够比前人算法更好地处理掠射角区域的增强。由于掠射角区域与视线的夹角很小，因此只考虑了几何和材质因素的方法难以捕捉该区域的细节。图 3.13 显示了在点光源照射下，采用Lambert和Phong光照模型，用前人方法和本章方法进行增强绘制的结果比较。图 3.14 显示了对于Dragon模型，采用前人方法与本章方法增强绘制结果比较。其中，图 3.14(e) 和图 3.14(f) 是不同增强绘制算法结果与传统绘制结果之差的可视化图。从可视化图中可见，本章方法在模型的颈部以及腹部等区域获得比前人方法更好增强效果。图 3.15 显示了在环境光照下，前人方法与本章方法增强绘制结果比较。本章方法在模型的手臂以及腰部区域比前人方法产生更好的增强效果。

3.5.2 用户调查

为了测试本章算法的效果，我们进行了两个用户调查实验。我们找了1位女性和14位男性参与实验。他们都是计算机图形学研究者，并且具有正常或经过矫正的视力。我们一共绘制了6个物体，24张结果图。所有的结果图的分辨率都是 1024×768 。我们通过一个20寸的Dell液晶显示器将结果图分组显示给参与者，每次显示一张。并让参与者选出其中增强效果最好的。

3.5.2.1 梯度项

在本调查试验中，我们的目的是测试绘制方程中各个梯度项对增强绘制结果的影响。我们将分别考虑了几何项梯度、投影变换项梯度、阴影项梯度以及高光项梯度的增强绘制结果显示给参与者，让他们从中找出增强效果最好的结果。图 3.16(a) 显示了用户调查统计结果。其中，水平坐标轴表示绘制方程中的四个梯度项，垂直坐标轴表示用户投票数目。我们的统计结果表明，几何项梯度和投影变换项梯度在增强绘制中起到了重要作用，而高光项梯度和阴影项梯度对增强效果的贡献很小。

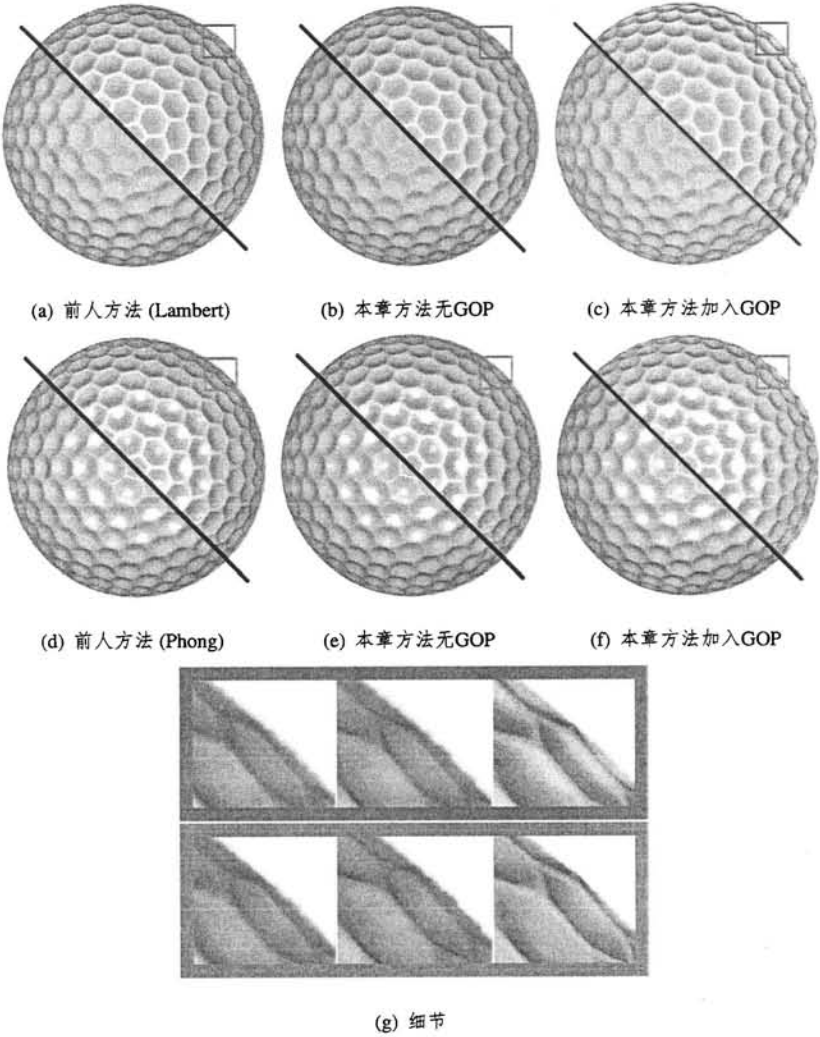


图 3.13 在点光源照射下，采用用Lambert和Phong光照模型时，与前人方法的比较。

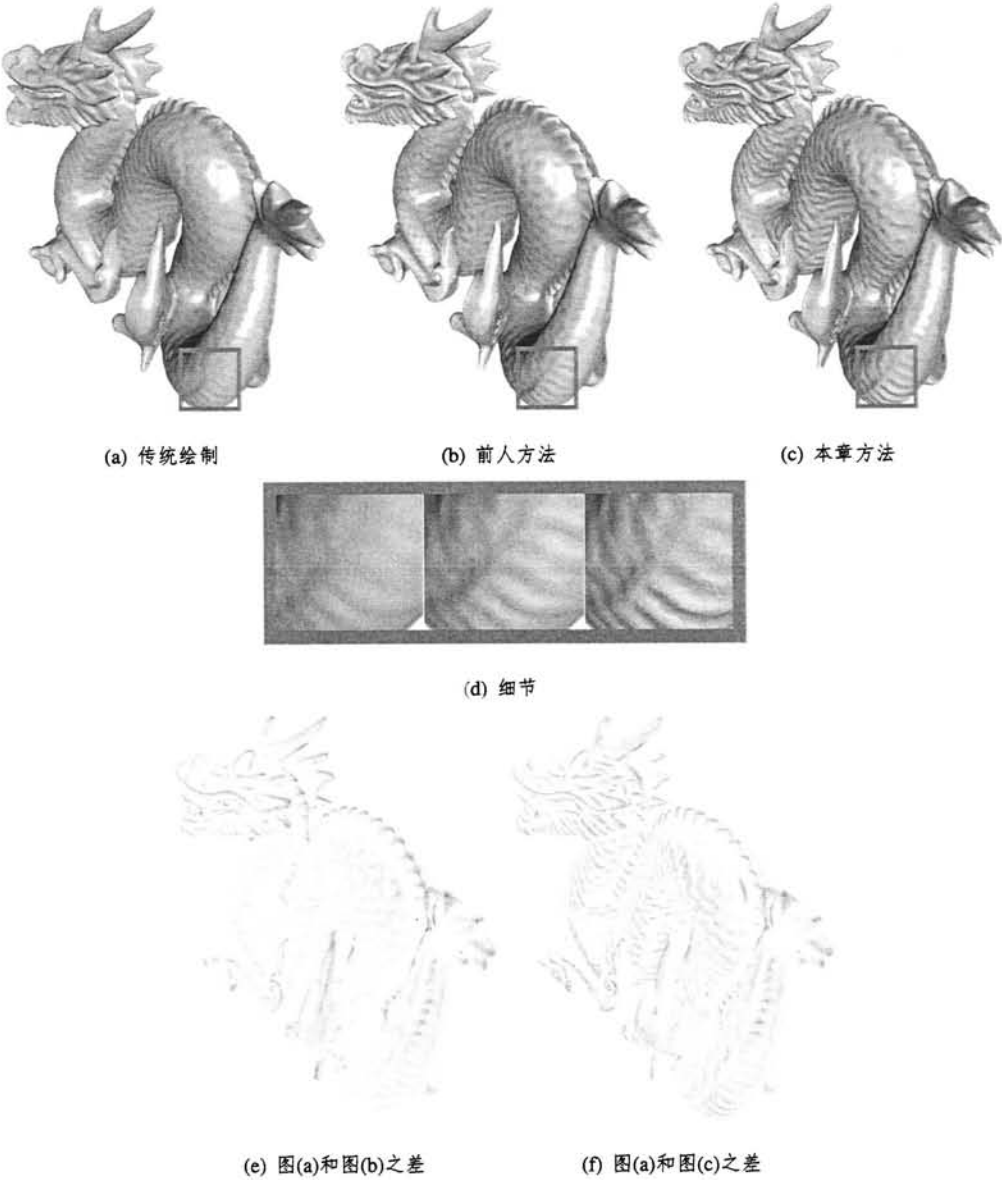


图 3.14 在点光源照射下，采用Phong光照模型时，与前人方法的比较。

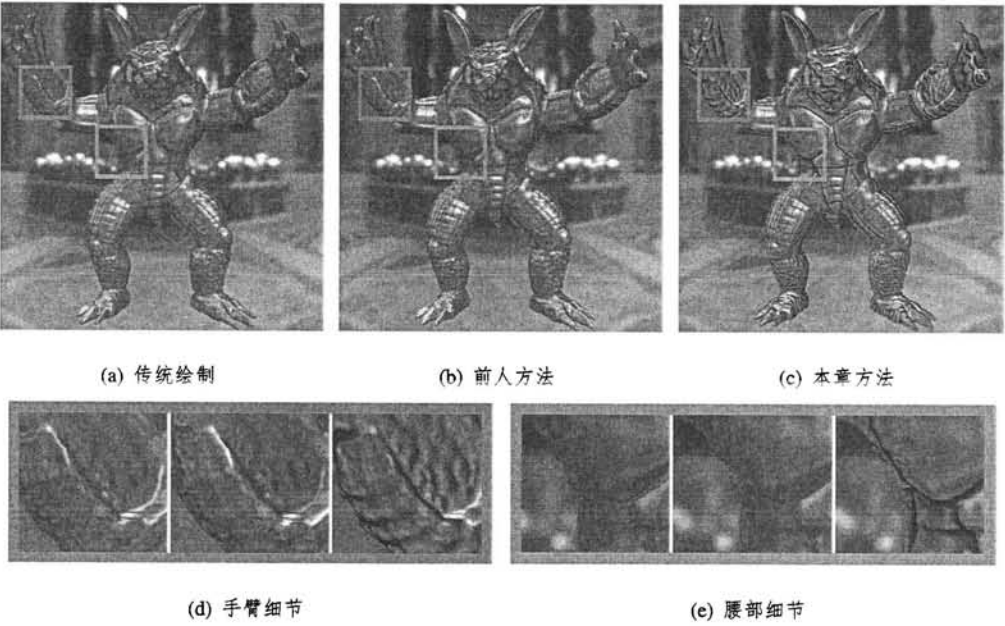


图 3.15 在环境光照射下，采用Phong光照模型时，与前人方法的比较。

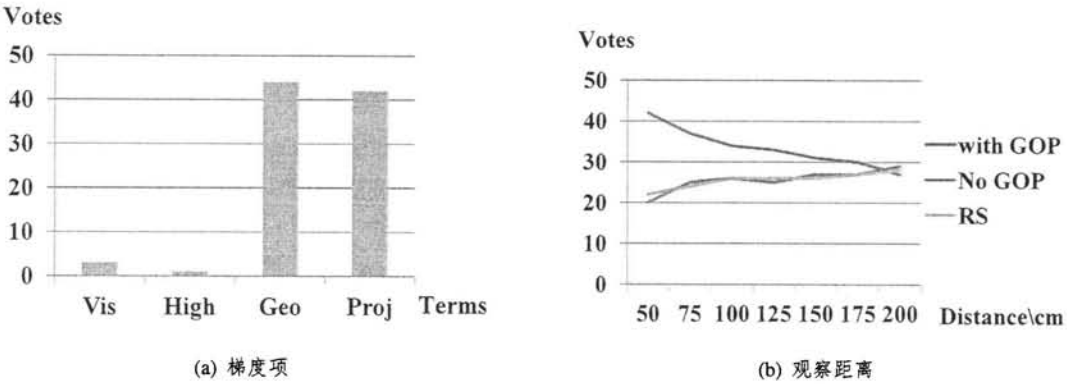


图 3.16 用户调查实验统计结果，在图(a)中“Vis”，“High”，“Geo” and “Proj” 分别表示 阴影项梯度、高光项梯度、几何项梯度以及投影变换项梯度，在图(b)中，图中红色和蓝色线表示本章方法增强绘制结果，绿色线表示 前人方法增强绘制结果。

3.5.2.2 观察距离

在本调查试验中,我们的目的是测试本章增强效果随观察距离变化的关系。由于观察距离对增强结果的影响很大,因此我们希望通过用户调查来测试其有效性。将前人方法的增强绘制结果、本章方法不考虑以及考虑了投影变换梯度项的结果进行比较。在每组比较中,我们给出三个结果,并要求参与者选出其中增强效果最好的。图 3.16(b) 显示了用户调查统计结果。图中红色和蓝色线表示本章方法增强绘制结果,绿色线表示前人方法增强绘制结果。我们的统计结果表明,在近距离观察时,本章方法考虑了投影变换梯度项的结果增强效果最好,没有虑了投影变换梯度项的结果与前人方法结果类似。随着距离的加大,它们之间的差距减小。当观察者距离显示屏幕200厘米时,三种结果几乎没有差别。

3.5.3 更多结果

图 3.17 显示了传统绘制结果与用本章方法增强绘制结果的比较。其中,本章方法结果去掉了不重要的梯度项,保留了重要的梯度项(几何项和投影变换项)。并且,我们将该方法应用到环境光照^[84]和复杂的材质模型^[102]中。图 3.18 显示了环境光照射下,采用Ashikmin材质时,传统制结果和梯度增强绘制结果的比较。

3.6 小结

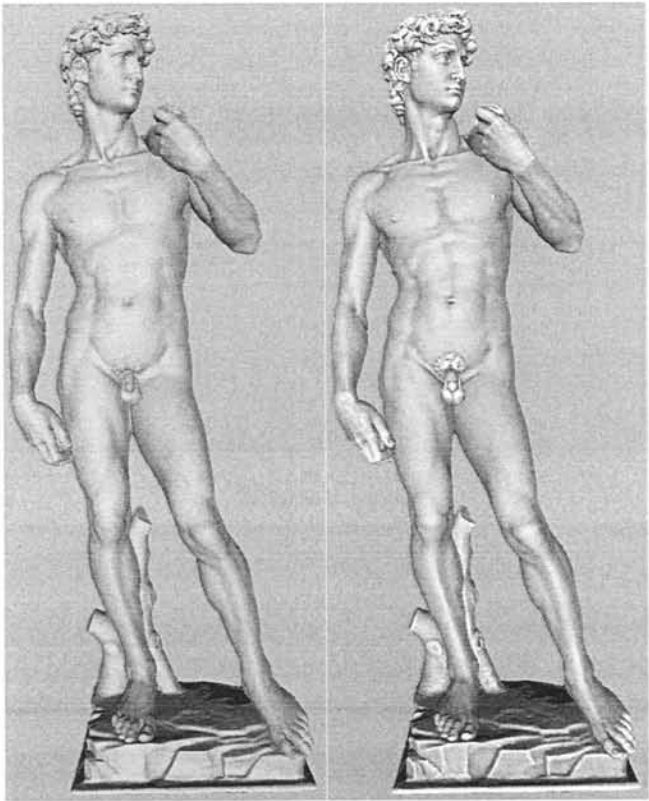
在本章中,我们将二维图像梯度增强应用到三维梯度绘制中。我们分析了绘制结果相对图像空间坐标的梯度。然后,我们能够分别利用 方程中的几何项,投影矩阵,阴影以及高光的梯度进行增强。通过用户调查我们发现几何项和投影矩阵的梯度是达到增强绘制效果的关键。因此,我们去省略了不重要的梯度项,并将该方法应用到环境光照以及复杂的材质模型。相比于其他的方法,我们的方法能够更好地处理角度交大的斜面以及掠射角区域。这是因为我们考虑投影矩阵的梯度项。

3.6.1 局限性与未来工作

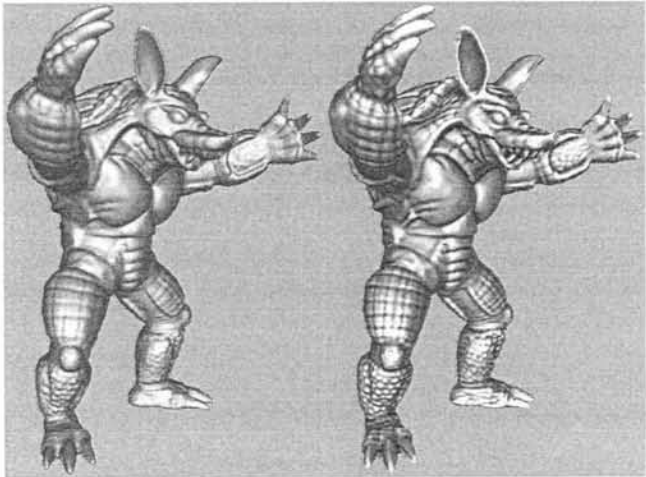
虽然本章方法能够达到较好的增强绘制效果,但是仍存在不足之处。由于本章的方法将绘制结果梯度达到增强,所以最后的结果中可能会出现反着色现象(countershading)。该现象在人工建造模型和自然扫描模型中都会出现,但是在具有很多直角面的人工建造模型中更加明显,如图 3.19。

在未来的工作中,我们希望将环境光照射下入射光场的梯度加入梯度增强方法中。环

境光照下的入射光场梯度比点光源入射光梯度复杂的多，而且我们认为它可能会对梯度增强结果产生一定的影响，因此我们这一问题值得进一步的探讨。并且，我们希望能将梯度增强绘制算法拓展到更为通用的材质模型，使得绘制结果更加丰富。

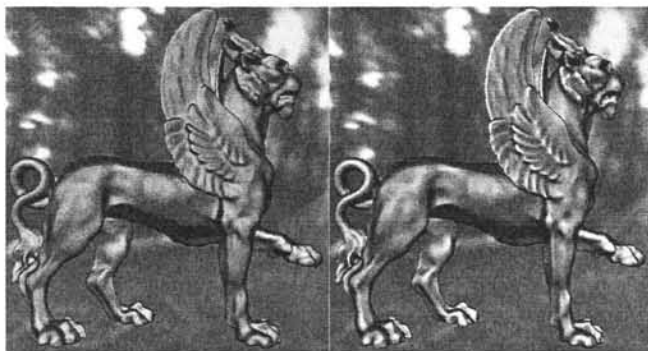


(a) Lambert (David模型)

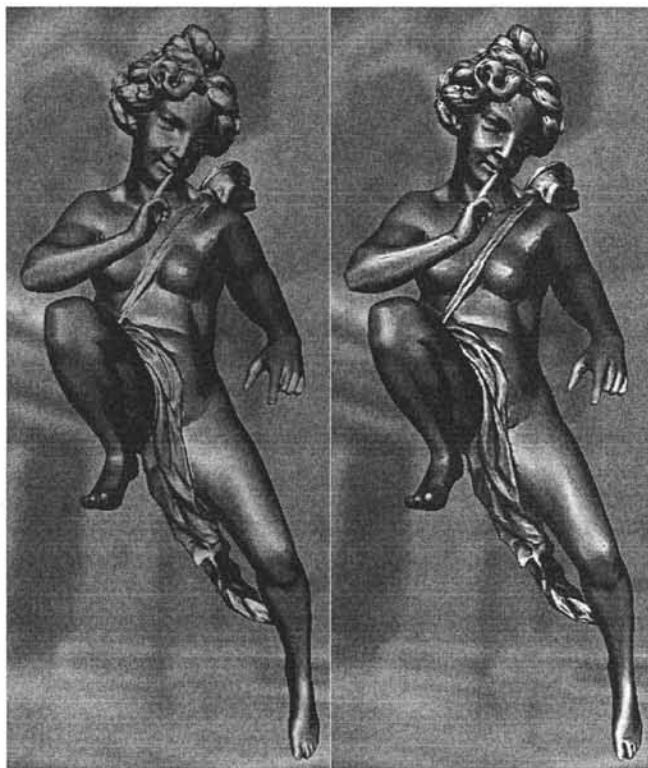


(b) Phong (Armadillo模型)

图 3.17 在点光源照射下，采用Lambert以及Phong光照模型时，传统制结果和梯度增强绘制结果的比较。



(a) Ashikmin (Feline模型)



(b) Ashikmin (Angel模型)

图 3.18 在环境光照射下, 采用Ashikmin材质时, 传统制结果和梯度增强绘制结果的比较。

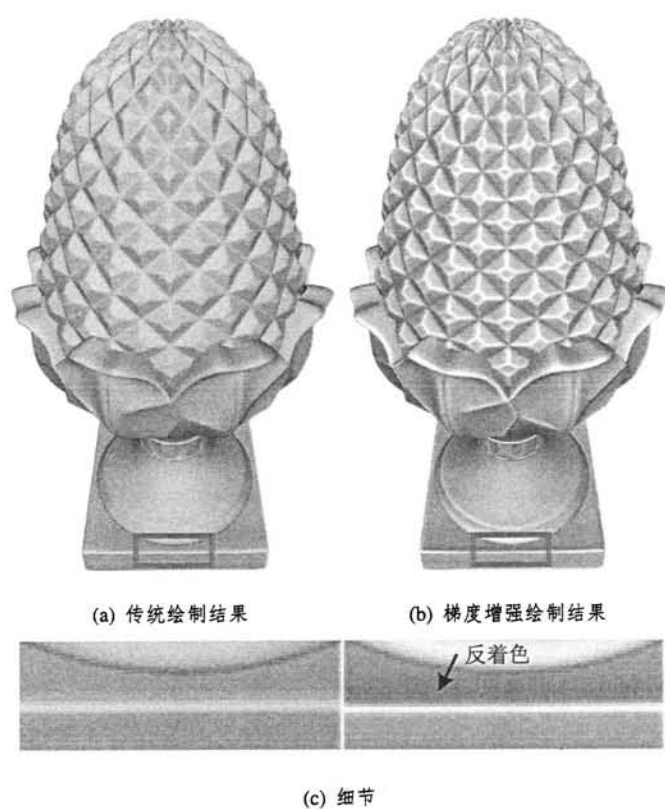


图 3.19 梯度增强绘制结果中的反着色现象。

第4章 基于反绘制和梯度优化的材质风格获取

随着三维技术在数字娱乐、建筑设计以及互联网等领域的广泛应用,人们对三维模型的需求越来越大。为了迎合这一需求,许多网站,如Google Ware House,为三维模型设计者提供了免费的三维模型库。设计者们可以在这些模型库中寻找自己需要的模型,从而大大减少工作量。但是,从模型库中获得的模型不一定具有材质信息,或者模型自带的材质并不符合设计者的需求。目前,设计合适的材质仍然是场景建模中一件十分麻烦的事情。

好的三维模型材质设计不仅能增强绘制结果的真实感,而且在某些领域能够体现三维场景设计的整体风格。如在建筑设计中,有经验的设计者往往会遵循一定的设计准则。他们通常会从哲学、美学的角度考虑场景中色调、色温、明暗搭配等因素。如最佳配色灰度是墙浅、地中、家私深,天花板的颜色最好浅于或与墙而同色等^[103]。由于要考虑这些因素,材质设计对于一般的设计者来说并不直观。因此,他们在设计过程中常常会参考一些样本图像,或者已经设计好的场景。

如果算法能够自动地从样本图像中获取材质风格并将其附加到无材质的三维几何场景中,那么三维场景材质设计就会变得更加容易。在本章中,我们利用反绘制技术和全局优化方法探索这一问题的解决方案。我们的最终目标是使最后生成的具有材质的三维场景与样本图像风格相似。首先,我们将三维几何模型离散成包含整个三维场景的多个视图,并将这一问题转换成求解使多视图绘制结果与样本图像风格近似的一组材质属性。然后,我们利用反绘制技术,对每个视图,从样本图像中拟合出一组三维场景物体材质属性。最后,我们利用禁忌搜索(Tabu search)算法^[104]从拟合出的材质属性中选取一组最优解,使得所有视图的绘制结果与样本图像的色度统计分布差异最小。

4.1 算法框架介绍

本章算法的基本思想是最小化生成结果与样本图像的材质分布差异。该思想贯穿了算法框架的各个步骤。本章算法的核心目标是使最后生成的具有材质的三维场景与样本图像风格相似。为了达到这一目标,本章算法采用了三个步骤:均匀采样多个视图、反绘制拟合材质以及全局优化,如图4.1。

首先,我们对三维几何场景进行离散采样,从而获得多个三维场景视图。在这一步骤中,我们的原则是使每个视图中包含尽量多的物体,并且使得所有的视图包含物体之和覆

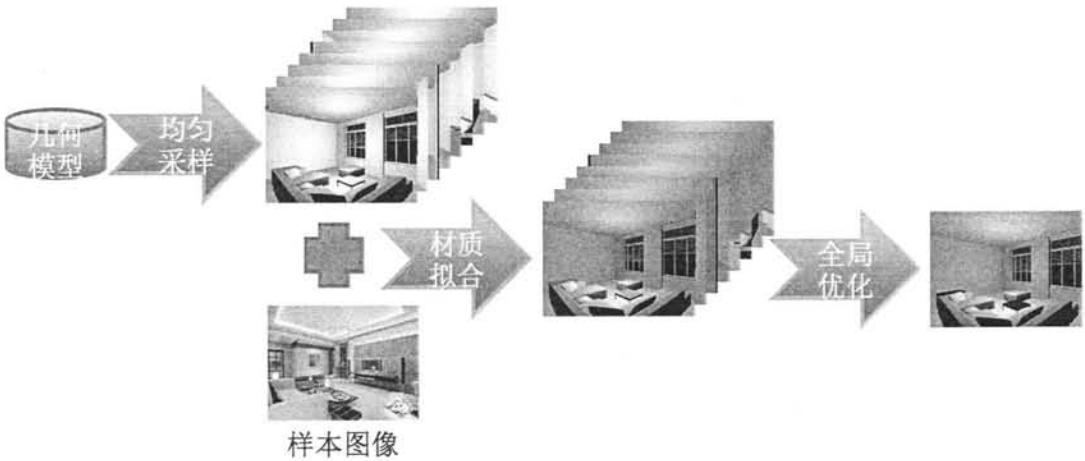


图 4.1 算法流程图。

盖整个场景。我们考虑该原则的原因是：使尽量多的物体被包含在每个视图中能够使场景中的物体恢复更多的候选材质，使所有的视图覆盖整个场景保证了场景中的所有物体都能至少获得一个候选材质。基于这一原则，我们对场景进行了均匀采样：视点沿场景边缘移动，视线朝场景中央，均匀地选取8至15个视图。视图个数受场景复杂度和规模的影响。在本章试验中，我们发现8至15个视图已经足以获得场景中的有效材质。增加更多的视图并不能引入更多不同的候选材质。图 4.2 显示了对一个简单室内场景进行多个视图采样的结果。一共采样了8个视图，这8个视图覆盖了整个场景中所有物体。

然后，对于每一个视图，我们利用反绘制技术从样本图像中拟合出场景中物体材质。在这一步骤中，我们的原则是使单个视图材质恢复结果与样本图像尽量相似。我们首先将样本图像缩放到视图大小并映射到视图上。然后，我们对落入同一物体区域（场景中的物体需要预先分割好）的像素进行聚类，并选取其中元素最多的一类。接着，我们基于点光源光照和Phong光照模型的前提将绘制方程线性化。于是，对于选中的每一个像素，我们可以写出一个以材质参数为未知数的线性方程。最后，我们联立所有选中像素组成线性方程组，并用最小二乘方法拟合材质参数。我们将在第4章对这一步骤进行详细介绍。

我们将所有视图拟合的材质结合起来，并利用禁忌搜索算法从中选取最有化的一组。令场景中物体和视图的数量为 m 和 n ，那么候选材质空间大小为 m^n 。当物体数量 m 增大时，搜索空间会迅速增长。虽然我们可以对同一物体的候选材质进行聚类来减小 n 的值，但是搜索空间仍然很大。因此，我们利用离散域全局优化方法禁忌搜索解决该问题。

我们定义一个衡量绘制结果和样本图像之间材质风格差距的目标函数。令当前选取的

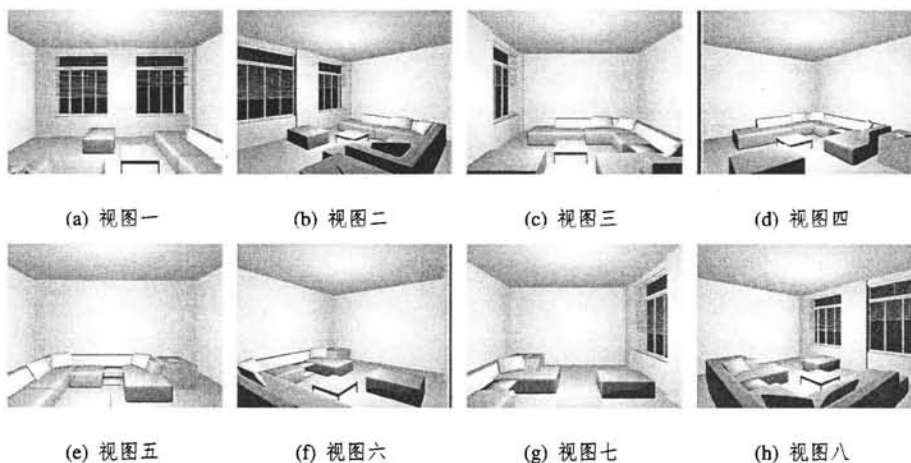


图 4.2 对三维场景采样多个视图结果。



图 4.3 使用聚类和未使用聚类材质拟合结果比较。

一组材质表示为 ξ ，样本图像表示为 S ，第 i 个视图的绘制结果表示为 $V_i(\xi)$ ，衡量两者之间色度分布差异的代价函数表示为 $E(S, V_i(\xi))$ 。令最优化的一组材质表示为 $\xi^{optimize}$ ，那么最优化材质选取问题可以用如下最小化目标函数问题表示：

$$\xi^{optimize} = \arg \min_{\xi} \sum_{i=0}^{n-1} E(S, V_i(\xi)), \xi \in M$$

其中， M 为所有视图拟合的材质集合。对于当前选取的一个解，我们利用禁忌搜索在其邻域内根据目标函数值选取局部最优解。然后反复迭代，当终止条件满足时，我们即可获得全局最优解。我们将在 4.3 节详细介绍代价函数的定义以及优化问题的建模求解过程。

4.2 反绘制拟合材质

在进行反绘制拟合材质参数之前，我们先对落入同一物体内的像素进行聚类。进行聚

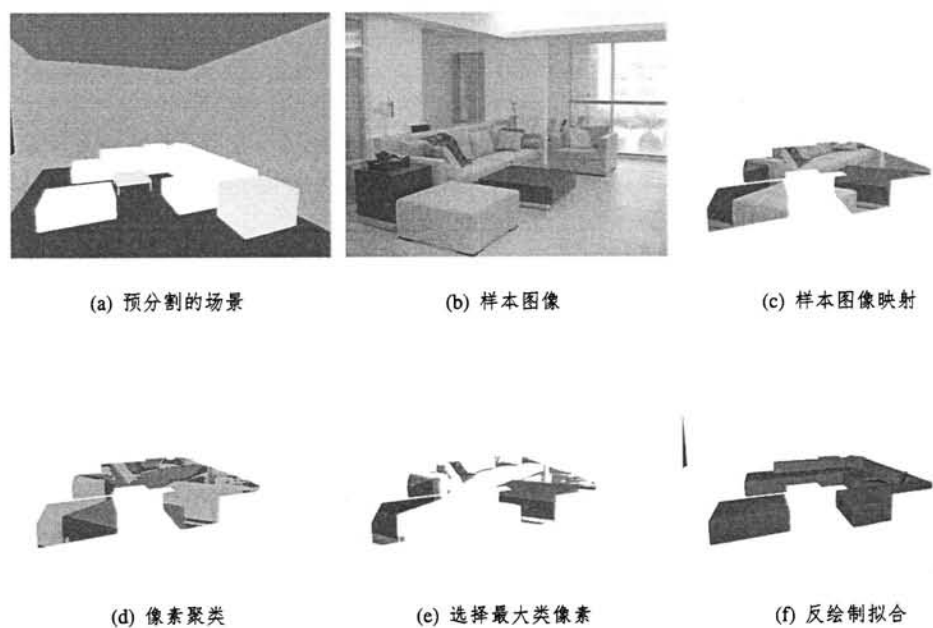


图 4.4 反绘制拟合过程。

类的原因是：如果直接将落在同一物体内部的所有像素取出做拟合，则拟合出的物体材质会被不同颜色的像素平均化，最终获得的材质与样本图像中的材质并不相似。图 4.3 显示了用同一物体内的所有像素进行拟合的结果与先聚类再拟合结果的比较。在未使用聚类的结果图 4.3(b) 中，墙壁和沙发的材质颜色都发生了变化，这是由于不同颜色的像素被用于拟合同一种材质。经过聚类之后，我们只保留最大类的像素拟合材质。因此，拟合出的材质保持了和样本图像相同的颜色。

因此，我们先进行聚类，然后选取元素最多的一类即区域主颜色像素进行拟合。我们通过均匀采样指定 3 至 5 个种子点，并用标准 k-means 聚类方法进行聚类，如图 4.4(d)。图 4.5 显示了指定不同数量种子点的拟合结果。从图中可以看到：当种子点数目少于 3 个时，拟合结果会出现明显的材质颜色被平均的现象，如图 4.5(b)。当种子点数目在 3 到 5 个时，这一现象被明显改善，如图 4.5(d)。当种子点数目超过 5 个时，常会出现过拟合现象，如图 4.5(e)。因此在这一步骤中，一般选取 3 到 5 个种子点就足够了。

然后，我们对每个视图拟合材质参数。我们规定场景中的同一物体上的点共有同一种材质。在拟合过程中，我们采用点光源光照和 Phong 光照模型，并且忽略阴影、二次反射等光照效果。考虑某一像素点 p ，根据 Phong 光照模型计算公式，其反射光线能量可表示

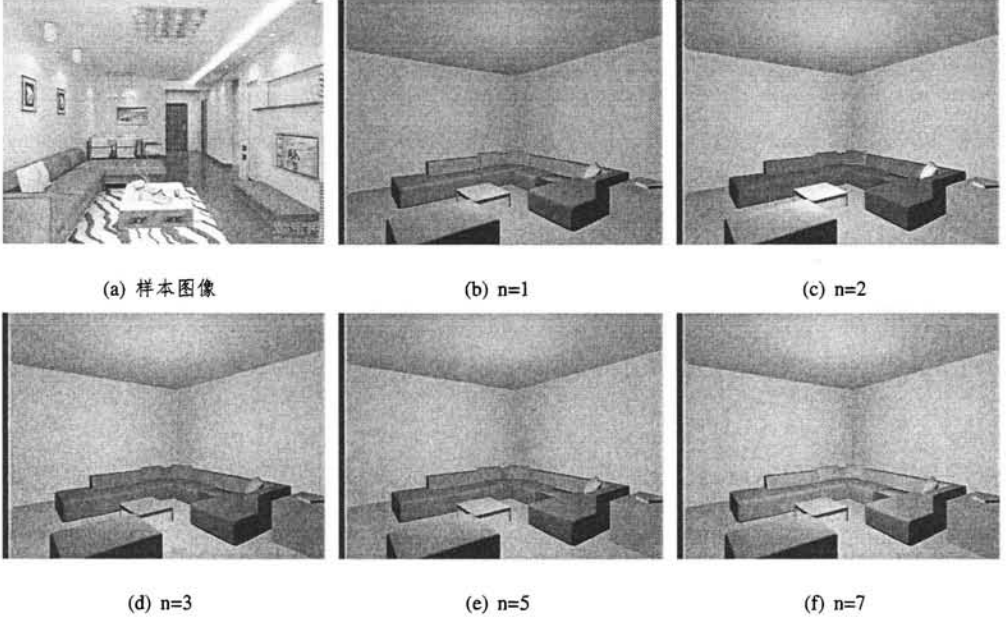


图 4.5 用不同的聚类数目拟合材质, n 表示聚类数。

为:

$$I(\mathbf{p}) = k_a + k_d \langle \mathbf{n}(\mathbf{p}), \mathbf{l}(\mathbf{p}) \rangle + k_s \langle \mathbf{r}(\mathbf{p}), \mathbf{v}(\mathbf{p}) \rangle^\alpha \quad (4.1)$$

其中, $\langle, \rangle$ 表示内积, k_a , k_d 和 k_s 表示环境光、漫反射和镜面反射系数, α 表示高光指数, $\mathbf{n}$, $\mathbf{l}$, $\mathbf{r}$ 和 $\mathbf{v}$ 分别表示法线方向, 入射光方向, 入射光关于法线的镜面对称方向和视线方向。我们将上式中的内积项用 d 和 s 标记, 并用泰勒级数在 $\alpha = \alpha_0$ 处进行线性逼近, 则公式 4.1 可转化为:

$$I(\mathbf{p}) = k_a + d k_d + s^{\alpha_0} (1 - \alpha_0 \ln s) k_s + k_s s^{\alpha_0} \ln s \alpha \quad (4.2)$$

对于公式 4.2 最后的二次项, 我们用 $k_s = k_0$ 线性近似, 则公式 4.2 可以线性化为:

$$I(\mathbf{p}) = k_a + d k_d + s^{\alpha_0} (1 - \alpha_0 \ln s) k_s + k_0 s^{\alpha_0} \ln s \alpha \quad (4.3)$$

其中, d 和 s 为已知项, 未知项为 k_a , k_d , k_s 和 α 。由于我们的目标并不是计算精确的材质属性, 因此在我们的试验中 α_0 和 k_0 为常数。根据实验, 我们认为 α_0 和 k_0 分别取20和0.5对大多数场景能获得较好的结果。

在同一个物体区域内, 对于每一个被选择的像素, 我们可以列出一个如同公式 4.3 的等式。因为我们规定同一个物体上的点共有同一种材质属性, 所以我们把这些等式联立起

来。令方程组左边的向量表示为 $\mathbf{I}$ ，系数矩阵表示为 M ，未知数向量表示为 $\mathbf{k}$ ，被选择像素数量表示为 g ，则该线性系统可表示为： $\mathbf{I} = M \mathbf{k}$ ，其中，

$$\begin{aligned} \mathbf{I} &= [I_0, I_1, \dots, I_{q-1}]^T, \mathbf{k} = [k_a, k_d, k_s, \alpha]^T, M = [\mathbf{c}_0, \mathbf{c}_1, \dots, \mathbf{c}_{q-1}], \\ \mathbf{c}_i &= [1, d_i, s_i^{\alpha_0} (1 - \alpha_0 \ln s_i), k_0 s_i^{\alpha_0} \ln s_i], (i \in [0, q-1]) \end{aligned} \quad (4.4)$$

最后，我们采用最小二乘方法解得未知参数：

$$\mathbf{k} = (M^T M)^{-1} M^T \mathbf{I}$$

图 4.6 中显示了我们用反绘制从单个视图中拟合出场景材质的结果，其中左上角的小图为样本图像。但是，从结果中可以看到，由于单视图中的物体位置固定，因此拟合出的材质与图像的颜色块位置相对应。这并不是我们所希望的结果。因此，我们引入全局优化方法，将所有单视图拟合出的材质作为候选材质，从中选择最适合的一组。

4.3 全局优化

解决最优问题时一般有两种方法，一种是传统的穷举法、贪婪法、分治法、动态规划等方法，另一种是启发式搜索算法。而这两种方法最大的不同点就在于：传统的方法必须对每一个问题设计一套算法，一旦我们遇到一个新的问题，整个算法就得重新设计，所以缺乏通用性、很不方便。但其好处是只要能证明该算法是正确的，就能保证一定能找到最优解。而启发式算法针对不同的问题采用同一个算法架构进行求解。此时，我们只需要设计针对不同问题的评价函数，所以启发式算法通用性更好，但不一定准确。因为启发式算法的架构使得它可以很快接近最优解，却不能保证找到的解一定是最优解。但在现实中，我们所遇到的问题越来越复杂，一个问题牵涉到很多量，如果根据传统的方法来设计算法，常常需要将问题简化了才有办法达成目标。然而，简化后的模型求出的最优解往往并比对完整问题求出的近似解更差。

本章讨论的材质风格获取问题中，从多个候选材质中选取最优材质可归类为离散域全局优化问题。解决这类全局优化问题时常用的启发式方法有：禁忌搜索、模拟退火以及遗传算法等。我们选用禁忌搜索方法。其他离散域全局优化方法在这一步骤中也适用。

4.3.1 禁忌搜索

禁忌搜索是Glover^[104]在1986年提出的一种基于局部搜索的全局优化方法。它将局部邻域搜索算法进行扩展，达到了全局优化的效果。局部邻域搜索基于贪婪思想不断地在当



图 4.6 从单视图反绘制拟合材质，左上角为样本图像。

前解的周围邻域中搜索下一个更好的解。这种算法虽然通用性好并且容易实现，但是其搜索性能很大程度上依赖于用户定义的邻域结构和初始解。禁忌搜索设计了一系列准则打破该陷阱。禁忌搜索维护了一个禁忌表记录过去一段时间内访问过的解。当再次访问到禁忌表中的解时，该解被忽略，然后继续寻找更优解。

考虑最优化问题：

$$\min f(x) | x \in X \quad (4.5)$$

令 $x \in X$ 表示解空间 X 中的一个解，其邻域表示为 $N(x)$ 。禁忌搜索算法需要从一个初始解 x_0 开始，该初始 x_0 可以采用启发式算法或者随机算法从集合 X 中获得。然后从 x_0 的邻域中挑选一个更好的解 x' ，再从新解 x' 开始重复搜索。如果在搜索时只寻找比当前解 x_0 更好的解，搜索就可能陷入局部最优。因此，禁忌搜索构造一个短期循环记忆表，称为禁忌表 (Tabu list)。禁忌表中存放最近 m 个解，这些解在其后的 m 次循环中是禁止采用的，用以避免再次将原先的解作为当前解。但是，即使引入了禁忌表的策略，禁忌搜索算法仍有可能出现循环现象。因此必须给出一定的终止条件。当在进行了 k 次搜索后发现仍然搜索出同一个解时，搜索结束并将当前最优解作为全局最优解返回。

4.3.2 代价函数

在进行材质全局优化过程中，我们需要衡量当前所选的一组材质和样本图像的材质风格的匹配度。我们用当前所选材质绘制一组图像，然后通过比较绘制图像和样本图像的差异性来衡量当前所选材质与样本图像中材质的匹配度。我们利用图像的统计信息定义了一个代价函数来衡量绘制图像和样本图像之间的差异度。

我们先将绘制结果和样本图像从 RGB 空间转换到 Lab 空间。然后，我们计算两张图像 a 和 b 通道的均值、标准方差以及直方图。并将两图像的均值、方差和直方图之差的平方

和作为衡量两者差异的权值。其中，两直方图差距的计算我们采用了直方图相交方法。令样本图像和绘制图像的a、b通道均值、方差以及二维直方图表示为： μ_S , σ_S , H_S , μ_V , σ_V , 和 H_V 。则代价函数可表示为：

$$E(S, V) = \|\mu_S - \mu_V\|^2 + \|\sigma_S - \sigma_V\|^2 + D(H_S, H_V) \quad (4.6)$$

其中， $D(\cdot)$ 表示用直方图相交方法计算两直方图之间的差距，其返回值为一个在 $[0, 1]$ 区间的小数，数值越大表示两直方图匹配程度越高。我们用OpenCV开源库中提供的直方图匹配函数进行计算。

为了使场景的材质风格更合理，我们希望场景中相邻物体获取的材质信息尽量相似。因此我们定义场景物体材质之间的梯度来作为平滑约束项。令 $\mathbf{k} = [k_a, k_d, k_s, \alpha]^T$ 表示场景中单个物体的材质，我们定义其梯度为它与相邻物体材质之差：

$$\nabla \mathbf{k} = \sum_{i \in N} \mathbf{k} - \mathbf{k}_i$$

其中， N 表示相邻物体集合。由于输入的三维场景为静态场景，所以场景中物体的邻接关系是固定不变的。因此 N 集合可以预先计算好。将梯度平滑项加入目标函数中：

$$\xi^{optimize} = \arg \min_{\xi} \sum_{i=0}^{n-1} E(S, V_i(\xi)) + \sum_{i \in O} \|\nabla \mathbf{k}_i\|$$

其中， O 表示场景中所有物体的集合。

4.3.3 解空间邻居关系

在利用禁忌搜索对优化问题建模时，很重要的一个步骤是定义邻域关系。定义好的邻域关系能够提高优化算法的整体性能。对于材质选取问题，我们定义某一组材质解的邻域为：把当前的一组材质中任意一个物体的材质替换成该物体从另一个视图中拟合出的材质得到的解的集合。令第 i 个物体在第 j 个视图中拟合出的材质表示为 $\mathbf{k}_{ij}$, $i \in [0, m-1]$, $j \in [0, n-1]$ ，当前选取的一组材质表示为 $\xi = (\mathbf{k}^0, \mathbf{k}^1, \mathbf{k}^2, \dots, \mathbf{k}^{m-1})$ ，则该材质的邻域函数可以表示为：

$$n(\xi) = \{(\mathbf{k}^0, \mathbf{k}^1, \mathbf{k}^2, \dots, \mathbf{k}^i, \dots, \mathbf{k}^{m-1}), \mathbf{k}^i = \mathbf{k}_{ij} | i \in [0, m-1], j \in [0, n-1]\}$$

我们利用开源库METSlib^[105]中提供的禁忌搜索框架进行优化。在本章算法中，我们对每个物体从 n 个视图中获取的候选材质进行聚类，并选取其中主成分作为初始解。此外，

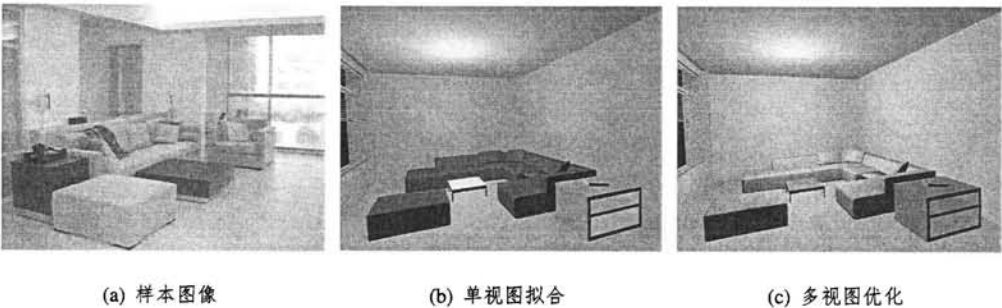


图 4.7 单视图与多视图材质获取比较。

我们定义禁忌表的长度为10，终止条件为：目标函数的值小于某一阈值 λ （在我们的实验结果中，该值设为0）或者连续50次找不到更优解。如图 4.7，左边是样本图像，中间是从单个视图中获取的结果，右边是多视图优化的结果。由于单视图中物体的位置固定，因此从单视图中拟合出的材质与样本图像中物体材质分布有一定差异。而从多视图优化获取的结果中，墙面的材质颜色更浅，沙发和柜子的材质则与样本图像中的材质分布更加近似。

4.4 实验结果

我们在一台配置为Intel CoreTM 2 Duo E7400 CPU，4G内存的个人台式机上实现了本章算法。我们用不同的场景模型以及从互联网上下载样本图片做了实验。本章算法的时间开销一般在1分钟以内。其中大部分时间（约30-40秒）花费在全局优化上，如表 4.1。

表 4.1 运行时间统计（单位：秒）

模型	预处理	拟合材质	优化	总计
卧室	4.5	10.0	30.5	45
客厅	4.3	11.6	23.0	38.6
会议室	4.8	10.5	35.5	50.8
花丛	4.1	9.6	23.0	32.6

我们对不同的室内三维场景以及不同的样本图像都做了实验。图 4.8 显示了采用了与三维模型场景相似的样本图像作为输入的实验结果。图 4.9 显示了采用与三维场景不相似的样本图像作为输入的材质风格获取结果。其中左上角的小图为样本图像。从图中结果可见，本章算法的绘制结果的材质风格与样本图像保持了基本一致。并且，由于对多视图拟

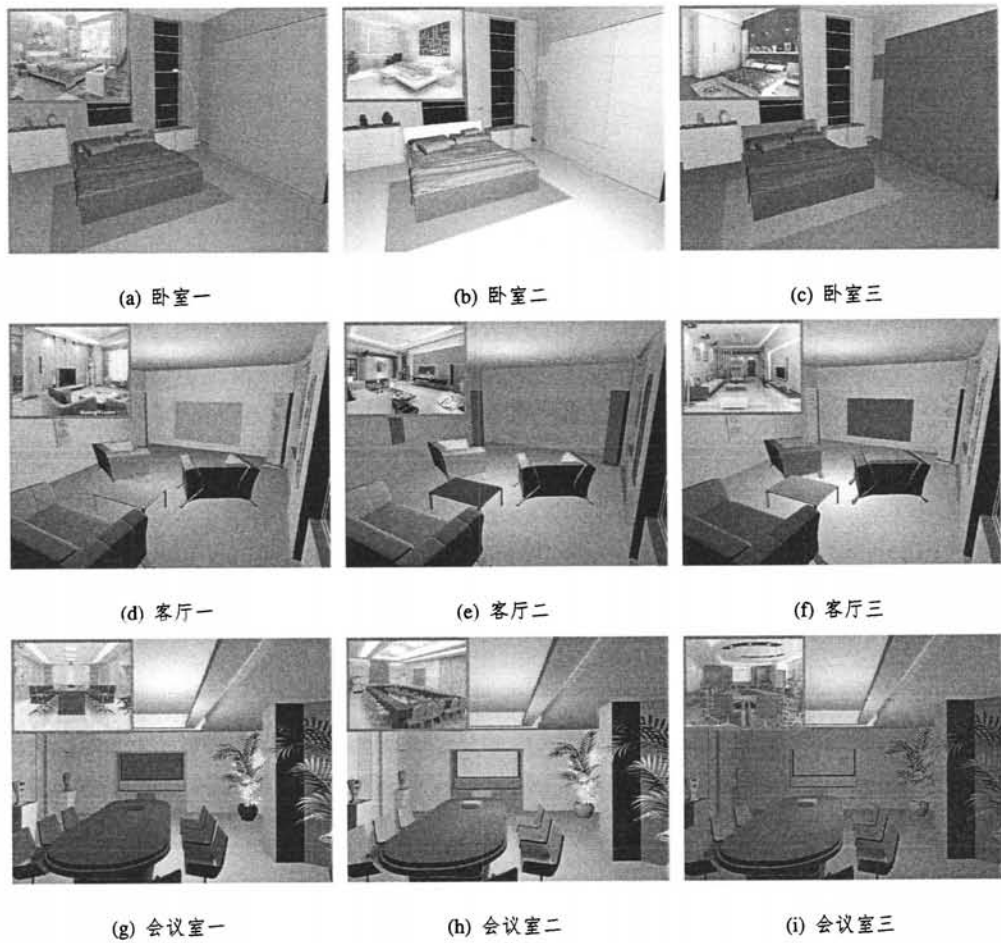


图 4.8 与三维模型场景相似的样本图像作为输入的实验结果，左上角为样本图像。

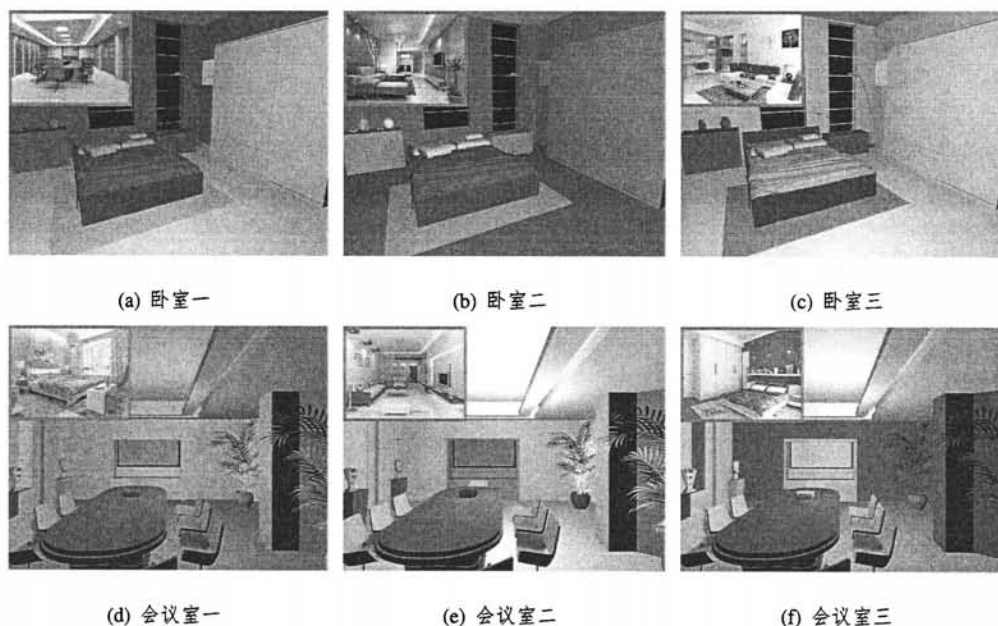


图 4.9 与三维模型场景不相似的样本图像作为输入的实验结果，左上角为样本图像。

合的材质进行综合聚类、优化，本章算法在保持整体一致的基础上使绘制结果中材质多样化。如图 4.8(c) 中床和枕头的材质以及图 4.8(h) 中投影屏幕和周边柜子的材质都是样本图像中多种材质混合结果。这些不同的材质使得场景中物体的层次感更加明显。

图 4.10(a)，图 4.10(b) 和图 4.10(c) 显示了对室外场景的实验结果。从该结果中可见，本文算法也适用于一些室外场景的材质风格获取。图 4.10(e) 显示了对材质恢复结果手动添加高光的实验结果。由于本文算法利用反绘制从图像中获取材质时将每个像素形成的方程做了最小二乘，其结果被均匀化。而高光的区域一般比较小，因此恢复后的材质难以捕捉图像中的高光材质。因此本文算法采用人工交互的方式对特定的物体添加高光属性。

4.4.1 用户调查

为了验证我们的自动算法的有效性，我们做了一个人工交互的用户调查。我们邀请了15位不同的参与者进行调查。他们全部都是计算机图形学领域的研究人员，其中包含14位男性和1位女性。我们要求参与者从样本图像中人工地指定不同的材质到三维几何场景中。然后，我们将参与者指定材质的绘制结果与我们的算法生成的结果进行了对比。如图 4.11，左边是我们的算法自动生成的结果，而中间是经过人工交互后的结果。场景中一共有14个物体，人工交互修改的物体数为4个，如图 4.11(a) 和图 4.11(b) 中绿色框标记

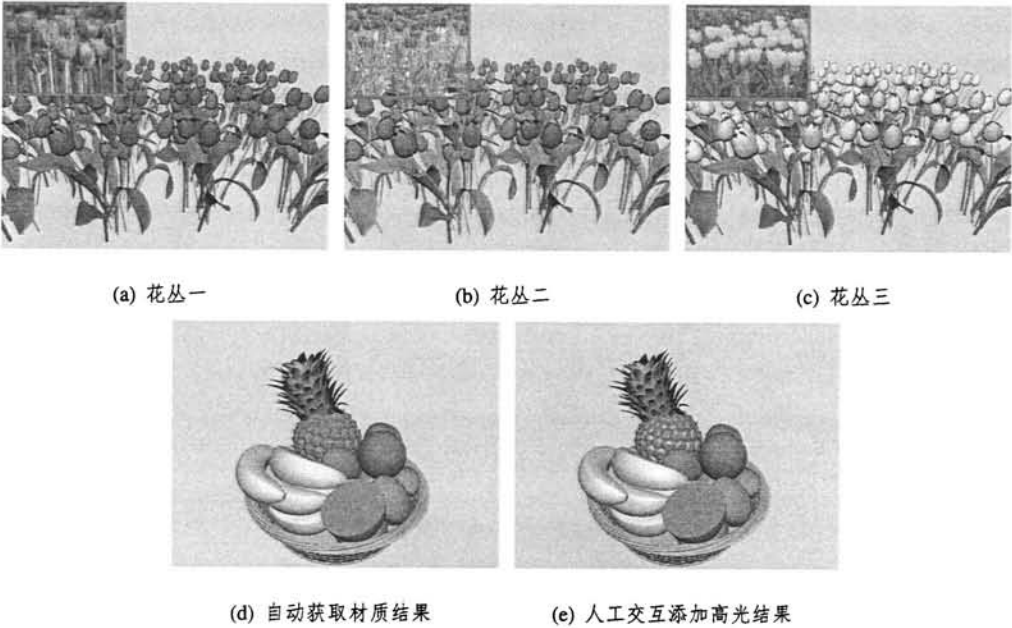


图 4.10 室外场景实验结果以及人工交互高光处理。

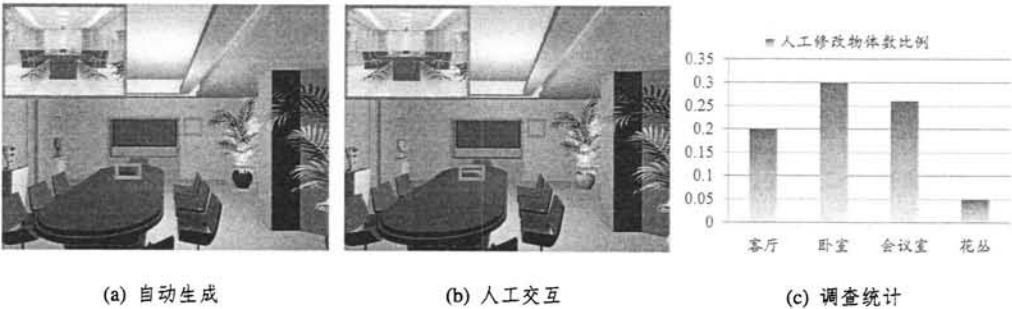


图 4.11 用户调查实验结果。

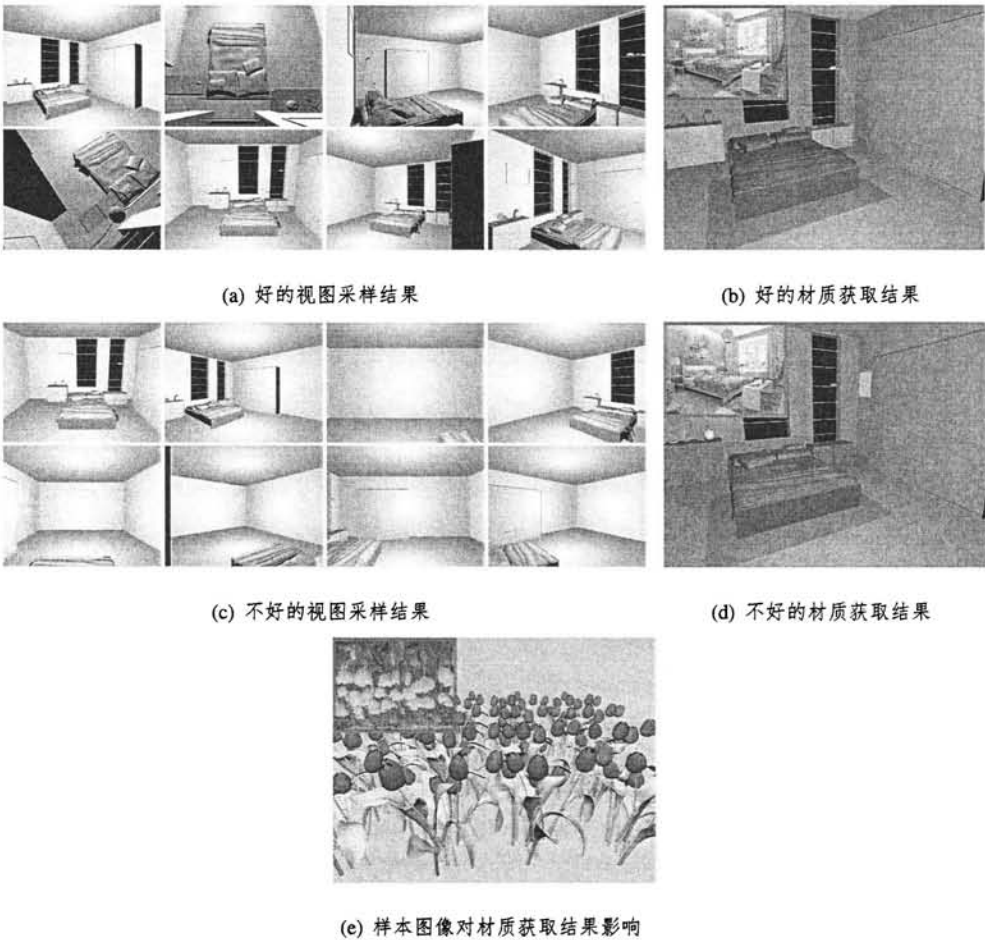


图 4.12 视图采样以及样本图像对结果的影响。

处。我们统计了不同三维场景和样本图像的试验中我们的算法生成结果和用户人工指定结果的差异。统计结果如图 4.11(c)，其中场景物体总数目为5至17个。从图中可见，我们的算法自动生成结果被人工修改的物体数目占场景总物体数的比例不超过30%。说明我们的自动算法能够在一定程度上满足人工交互结果的需要。

4.4.2 算法局限性

本章算法仍然存在一定的局限性。其中，影响本章算法结果的因素主要有三个方面：视图采样、样本图像以及全局光照。视图采样的结果直接影响了材质获取的结果。若视图采样结果不理想，就会影响三维场景物体候选材质拟合的质量，从而得不到最优化结果，如图 4.12。图 4.12(a) 和图 4.12(c) 是采用不同视图采样，对相同的三维场景和样本图

像获取的材质结果。图 4.12(b) 和图 4.12(d)是对应的材质获取结果。在图 4.12(a) 中, 视图采样中大部分的视图包含了场景中的主要物体, 因此在每个视图中这些物体都能拟合出一个候选材质, 进而使得最后的优化结果与样本图像的材质分布类似。而在图 4.12(c) 中, 由于视图采样结果中很多视图为空旷的空间 (没有包含场景中的主要物体), 因此在这些视图中, 许多不在视图范围内的物体就无法拟合出候选材质, 从而使得最终的优化结果并不与样本图像的材质分布类似。本文总结了视图采用的几个原则: 第一, 对每一个视图尽量将所有物体放入视图中。第二, 将重要的物体, 如沙发、桌子以及床等放在视图中央位置。第三, 从不同的角度对场景进行采样, 各视图之间的差异性越大越好。在进行视图采样时, 需要预先人工指定, 但只需指定一次。当从不同图像中获取材质属性时, 可重复使用预先指定好的视图采样结果。

样本图像对实验结果也有一定的影响。例如: 若样本图像的取景方向与视图采样的方向有差异会出现不正确的匹配, 如图 4.12(e)。虽然对于图 4.12(e) 中的样本图像, 本章算法的结果在材质风格和分布上与其依然相似, 但是从自然场景合理性的角度来说, 该结果是不正确的。其本质原因是本章算法的目标是使得材质获取结果在整体风格上与样本图像相似, 而并不对单个物体进行准确的材质恢复。而要从单幅图像中找到与三维模型匹配的物体进行材质恢复仍然是难以自动完成的问题。首先, 在给定的样本图像中不一定包含三维场景中的所有物体。其次, 要将二维图像中的物体与三维物体准确对应并非易事。因此, 本章算法并不考虑这一部分, 而是从整体的材质分布角度, 保证材质获取结果与样本图像相似。但这一问题可能是本文下一步需要改进的工作之一。

全局光照的影响不是很明显, 但是它确实存在, 并且当样本图像中多次反射造成的相互辉映现象改变物体表面反射光或物体完全处于阴影中时, 可能会造成不正确的材质获取结果。

4.5 小结

本章提出了一种从单幅图像全自动地获取材质风格的算法。该算法基于反绘制技术和全局优化方法将样本图像中的材质风格转换到缺少材质属性的三维场景中。该算法主要包括三个步骤: 对三维几何场景进行离散视图采样, 从单个视图中反绘制拟合材质以及利用全局优化方法从候选材质中选取最优材质。在单视图拟合材质步骤中, 我们先将绘制方程线性化, 然后用最小二乘拟合 Phong 模型材质参数。在优化步骤中, 我们定义了绘制结果

和样本图像差异的目标函数以及材质解空间的邻近关系，并利用离散域优化方法禁忌搜索最小化目标函数。

通过本章算法自动生成的绘制结果具有与样本图像类似的材质风格。本章算法在进行材质获取的过程中，不仅在局部上保持和样本图像的一致性，而且在全局的材质分布上也尽量贴近样本图像。故本章算法能够自动从样本图像获取其中蕴含的材质设计美学规律。在用户调查中，我们将本章算法自动生成的结果与人工交互的材质转换结果进行了比较。本章算法在无需任何人工交互的前提下，仍然能够在一定程度上与人工交互结果相媲美。但本章算法仍然存在一定局限性。我们已经在第5章中对视图采样、样本图像以及全局光照对本章算法的影响进行了分析，说明本文工作还有一定的改进空间。在未来的工作中，我们将光照分布估计和全局光照明纳入本文的算法框架中。通过拟合光源和反全局光照明，我们能够更加真实地从图像中获取材质风格。

第5章 基于图像的烟雾效果绘制

虚拟现实技术在最近几年的发展中得到了广泛应用。人们对虚拟现实技术的应用之一是将虚拟的物体融合到真实拍摄的图像中。例如电影拍摄中的特效镜头、基于人体动作交互的游戏以及最近比较热门的google glass等。目前,已经有许多研究者在这一领域提出了不同的解决方案^[84-88]。这些工作大部分都是研究如何将虚拟的物体插入到真实图像中,而没有考虑如何将虚拟参与介质融合到真实图像中的问题。其主要原因是光线与参与介质发生的散射现象比表面反射更加复杂。Jorge等在2010年提出一种基于图像处理的参与介质编辑方法^[89]。该方法假设输入图像中场景的光照信息是一个常数。而这一假设对于在室外天空光下拍摄的图像是合理的,但是对于室内光照以及在某些特殊室外光照,例如:街灯和车灯等情况并不适合。

本章提出一种方法,在少量人工交互的帮助下,将虚拟烟雾单散射绘制效果(如烟、雾、霾等)融合到室内或室外的真实拍摄图像中。我们的方法首先利用光照^[88,106]和几何^[107,108]估计技术对输入图像场景中的光源以及场景物体几何信息进行估计。然后,基于估计的场景光照和几何信息,利用基于物理的真实感绘制技术^[100]生成具有真实感的参与介质单散射绘制图像。最后,将其融合到输入图像中,模拟雾以及霾的效果。我们方法的主要贡献是提出一个将虚拟烟雾与室内及室外真实图像进行融合的统一算法框架,其中包括如下几个技术创新:

- 通过分析简化光线在参与介质中传播的过程,对表面反射光照和参与介质透光度进行分解,作为本章算法框架的理论基础。
- 基于上述理论基础,分别定义反射图、透光度图、参与介质散射图以及合成方程,对真实图片和虚拟烟雾进行融合。
- 提出一种方法对室外阳光方向进行优化,并利用包围体的约束模拟参与介质中方向光源产生的光柱现象。

5.1 算法框架

在本节中,我们介绍本章算法的框架。根据第5.2节的公式推导可知,经过衰减的反射光能可以被分解成反射光能和衰减度的乘积。我们将衰减度以及单散射光着色计算结果

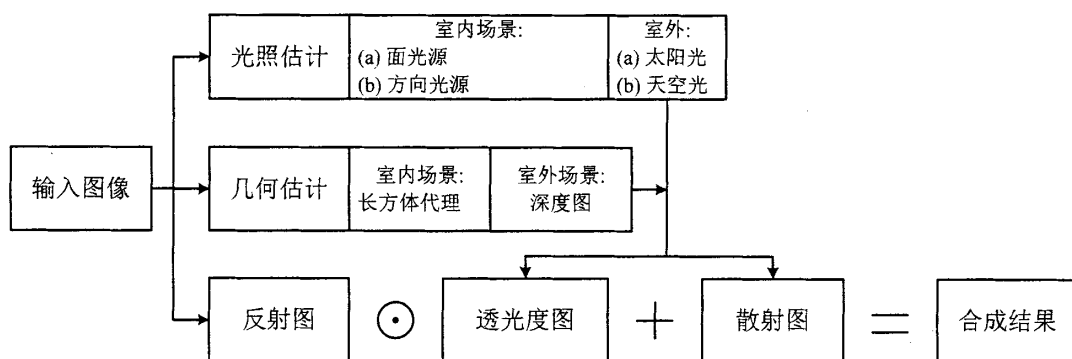


图 5.1 基于图像的烟雾效果绘制框架。其中，我们基于简单的用户交互对输入图像中场景的光照和几何信息进行估计。然后，计算透光度图以及参与介质散射图。最后，结合输入图像、透光度图、散射图合成最后的结果，其中 $\odot$ 表示Hadamard乘积。

分别定义为衰减图以及散射图。如图 5.1 所示，当给定一张拍摄图像作为输入，我们首先通过少量用户交互估计图像中场景的光照和几何信息，然后根据估计的场景光照和几何信息计算透光度图和散射图，最后结合这些中间计算结果和输入图像合成最终结果。

在对输入图像场景进行光照和几何估计时，我们对室内和室外场景分别处理。在光照估计步骤中，我们采用Karsch等论文^[88]中的方法，用面光源和方向光源对室内灯光和从窗户或门射入的太阳光进行近似。对于室外场景，我们采用Liu等论文^[106]的方法对太阳光和天空光进行估计。在几何估计步骤中，我们对室内的人造物体用简单的长方体近似，对室外场景我们采用深度图进行近似。

5.2 反射光能和透光度的分解

在本节，我们介绍本章算法的理论基础。我们首先简单回顾光线在参与介质中的传播模型，然后推导反射光能和透光度的分解公式，最后给出反射图 $\mathcal{R}$ ，透光度图 $\mathcal{T}$ 以及散射图 $\mathcal{V}$ 的定义同时给出合成最后结果的方程。

5.2.1 光能传播模型回顾

绘制参与介质散射现象通常需要解决辐射传输方程^[109] (radiative transfer equation)。该方程是一个基于物理的描述光能在参与介质中传播的微分方程。它通过定义参与介质中某一点某一点 $\mathbf{x}$ 沿着 ω 方向的光能变化 L ，描述了光能与参与介质发生的四种交互现象：自

发光、吸收、入散射以及出散射。我们沿用Jensen等论文^[18]中的标记方式，将其表示成如下形式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial L(\mathbf{x}, \omega)}{\partial \mathbf{x}} = & \alpha(\mathbf{x})L_e(\mathbf{x}, \omega) + \delta(\mathbf{x})L_i(\mathbf{x}, \omega) \\ & - \alpha(\mathbf{x})L(\mathbf{x}, \omega) - \delta(\mathbf{x})L(\mathbf{x}, \omega) \end{aligned} \quad (5.1)$$

其中， α 和 δ 分别表示吸收和散射系数， L_e 和 L_i 分别表示自发光能和入散射光能。对于非均匀参与介质，吸收和散射系数会随着参与介质空间而变化。我们将两者结合起来定义衰减系数为 $\kappa(\mathbf{x}) = \alpha(\mathbf{x}) + \delta(\mathbf{x})$ 。并定义入散射光能 L_i 为在整个球面区域 Ω ，从所有可能的方向 ω 射向点 $\mathbf{x}$ 的光能总和。因此，我们可以将公式 5.1 改写为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial L(\mathbf{x}, \omega)}{\partial \mathbf{x}} = & \alpha(\mathbf{x})L_e(\mathbf{x}, \omega) \\ & + \delta(\mathbf{x}) \int_{\Omega} p(\mathbf{x}, \omega, \omega') L(\mathbf{x}, \omega') d\omega' \\ & - \kappa(\mathbf{x})L(\mathbf{x}, \omega) \end{aligned} \quad (5.2)$$

其中， $p(\mathbf{x}, \omega, \omega')$ 表示相位函数，它描述了在点 $\mathbf{x}$ 处从 ω' 方向射入的光能被从 ω 方向射出的比例。对公式 5.2 两边相对其边界求积分可得辐射传输方程的积分形式^[110]：

$$\begin{aligned} L(\mathbf{x}, \omega) = & \tau(\mathbf{x}_0, \mathbf{x})L(\mathbf{x}_0, \omega) \\ & + \int_{\mathbf{x}_0}^{\mathbf{x}} \tau(\mathbf{x}', \mathbf{x})\alpha(\mathbf{x}')L_e(\mathbf{x}', \omega) d\mathbf{x}' \\ & + \int_{\mathbf{x}_0}^{\mathbf{x}} \tau(\mathbf{x}', \mathbf{x})\delta(\mathbf{x}')L_i(\mathbf{x}', \omega) d\mathbf{x}' \end{aligned} \quad (5.3)$$

其中， $\tau(\mathbf{x}', \mathbf{x}) = e^{-\int_{\mathbf{x}'}^{\mathbf{x}} \kappa(\mathbf{t}) d\mathbf{t}}$ 表示从点 $\mathbf{x}'$ 到点 $\mathbf{x}$ 的透光度，它表示了光能在经过该光路过程中的衰减。 $\mathbf{x}_0$ 表示边界点。

5.2.2 理论公式推导

由于我们的目标是模拟烟雾、霾等光学稀薄（指单位距离内的透光度高，接近于1）的参与介质，所以其对光能的散射主要可以由单散射模拟^[19]。并且，烟雾是一种没有自发光现象的参与介质，因此我们设定如下假设前提：

- 在对烟雾进行模拟时，我们仅考虑单散射现象，
- 并且忽略自发光现象。

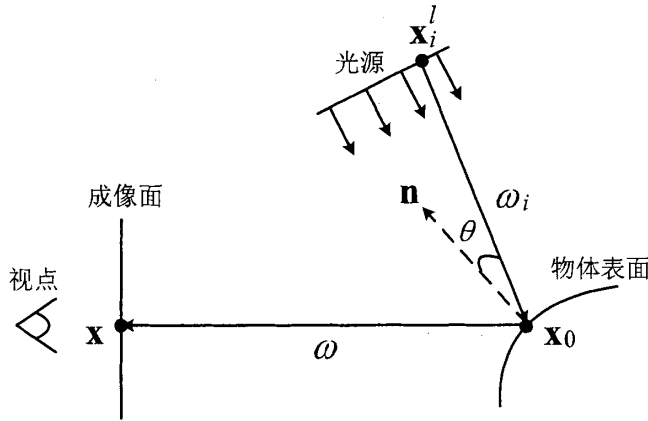


图 5.2 光源和物体都在参与介质中时的光能传播示意图。

因此，公式 5.3 可以简化为：

$$L(\mathbf{x}, \omega) = \tau(\mathbf{x}_0, \mathbf{x})L(\mathbf{x}_0, \omega) + \int_{\mathbf{x}_0}^{\mathbf{x}} \tau(\mathbf{x}', \mathbf{x})\delta(\mathbf{x}')L_i(\mathbf{x}', \omega)d\mathbf{x}' \quad (5.4)$$

根据公式 5.4，最终进入人眼的光能可以表示为衰减的反射光能（第一项）与散射光能（第二项）之和。令 $L_r(\mathbf{x}, \omega)$ 和 $L_v(\mathbf{x}, \omega)$ 分别表示衰减的反射光能和散射光能，则上式可简化为： $L(\mathbf{x}, \omega) = L_r(\mathbf{x}, \omega) + L_v(\mathbf{x}, \omega)$ 。

5.2.2.1 衰减的反射光能

考虑图 5.2（图中各个变量的标记解释如图 5.3）中显示的场景。令 $I(\mathbf{x}_0, \omega)$ 和 $I_i(\mathbf{x}_0, \omega, \omega_i)$ 表示点 $\mathbf{x}_0$ 处总的表面反射光能和从 ω_i 方向入射光的反射光能。根据绘制方程^[1]， $I(\mathbf{x}_0, \omega)$ 可用如下公式表示：

$$\begin{aligned} I(\mathbf{x}_0, \omega) &= \int_{\Omega} L(\mathbf{x}_0, \omega_i)\rho(\mathbf{x}_0, \omega, \omega_i)V(\mathbf{x}_0, \omega_i)\cos\theta d\omega_i \\ &= \int_{\Omega} I_i(\mathbf{x}_0, \omega, \omega_i)d\omega_i \end{aligned}$$

令 $\mathbf{x}_i^l$ 表示从 ω_i 方向入射光的光源位置，则衰减的反射光能可用如下公式表示：

$$L_r(\mathbf{x}, \omega) = \tau(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}) \int_{\Omega} \tau(\mathbf{x}_i^l, \mathbf{x}_0)I_i(\mathbf{x}_0, \omega, \omega_i)d\omega_i$$

θ	入射光方向与法线方向之间夹角
$\mathbf{n}$	物体表面法向
$\mathbf{x}_0$	物体表面点
$\mathbf{x}$	图像平面上点
$\mathbf{x}_i^l$	光源上的点
ω_i	入射光线方向
ω	反射光线方向
$L(\mathbf{x}_0, \omega_i)$	在点 $\mathbf{x}_0$, 从 ω_i 方向入射光能
$\rho(\mathbf{x}_0, \omega, \omega_i)$	BRDF
$V(\mathbf{x}_0, \omega_i)$	可见性函数

图 5.3 公式推导中的符号标记。

令 S_{light} 表示光源形状, 根据积分中值定理, 必存在一点 $\tilde{\mathbf{x}}^l \in S_{light}$ 使得:

$$\begin{aligned}
 L_r(\mathbf{x}, \omega) &= \tau(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}) \tau(\tilde{\mathbf{x}}^l, \mathbf{x}_0) \int_{\Omega} I_i(\mathbf{x}_0, \omega, \omega_i) d\omega_i \\
 &= \tau(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}) \tau(\tilde{\mathbf{x}}^l, \mathbf{x}_0) I(\mathbf{x}_0, \omega)
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

在本章方法的实现中, 我们求取光源的几何中心作为点 $\tilde{\mathbf{x}}^l$ 的近似。根据我们的实验, 这一近似处理对于参与介质单散射绘制是合理的。具体实验结果在第 5.4.1 进行详细讨论。

由于我们将二维图像作为输入, 因此可以从输入图像中获得每个像素的反射光能信息 $I(\mathbf{x}_0, \omega)$ 。根据公式 5.5 对反射光能和透光度的分解, 我们定义输入图像为反射图 $\mathcal{R}$, 每个像素中沿着“光源-物体表面-观察点”路径的参与介质透光度为透光度图 $\mathcal{T} = \tau(\tilde{\mathbf{x}}^l, \mathbf{x}_0) \tau(\mathbf{x}_0, \mathbf{x})$ 。因此, 衰减的反射光能可用 $\mathcal{R} \odot \mathcal{T}$ 表示, 其中 $\odot$ 表示 Hadamard 乘积。

5.2.2.2 散射光能

当仅考虑单散射现象时, 散射光能 $L_v(\mathbf{x}, \omega)$ 可以用如下公式表示:

$$\begin{aligned}
 L_v(\mathbf{x}, \omega) &= \int_{\mathbf{x}_0}^{\mathbf{x}} \tau(\mathbf{x}', \mathbf{x}) \delta(\mathbf{x}') L_i(\mathbf{x}', \omega) d\mathbf{x}' \\
 L_i(\mathbf{x}', \omega) &= \int_{S_{light}} \tau(\mathbf{x}_i^l, \mathbf{x}') L(\mathbf{x}', \omega_i) p(\mathbf{x}', \omega, \omega_i) d\mathbf{x}_i^l
 \end{aligned}$$

由于我们已经对输入图像中场景的光照和几何进行了估计, 因此给定参与介质的散射、吸

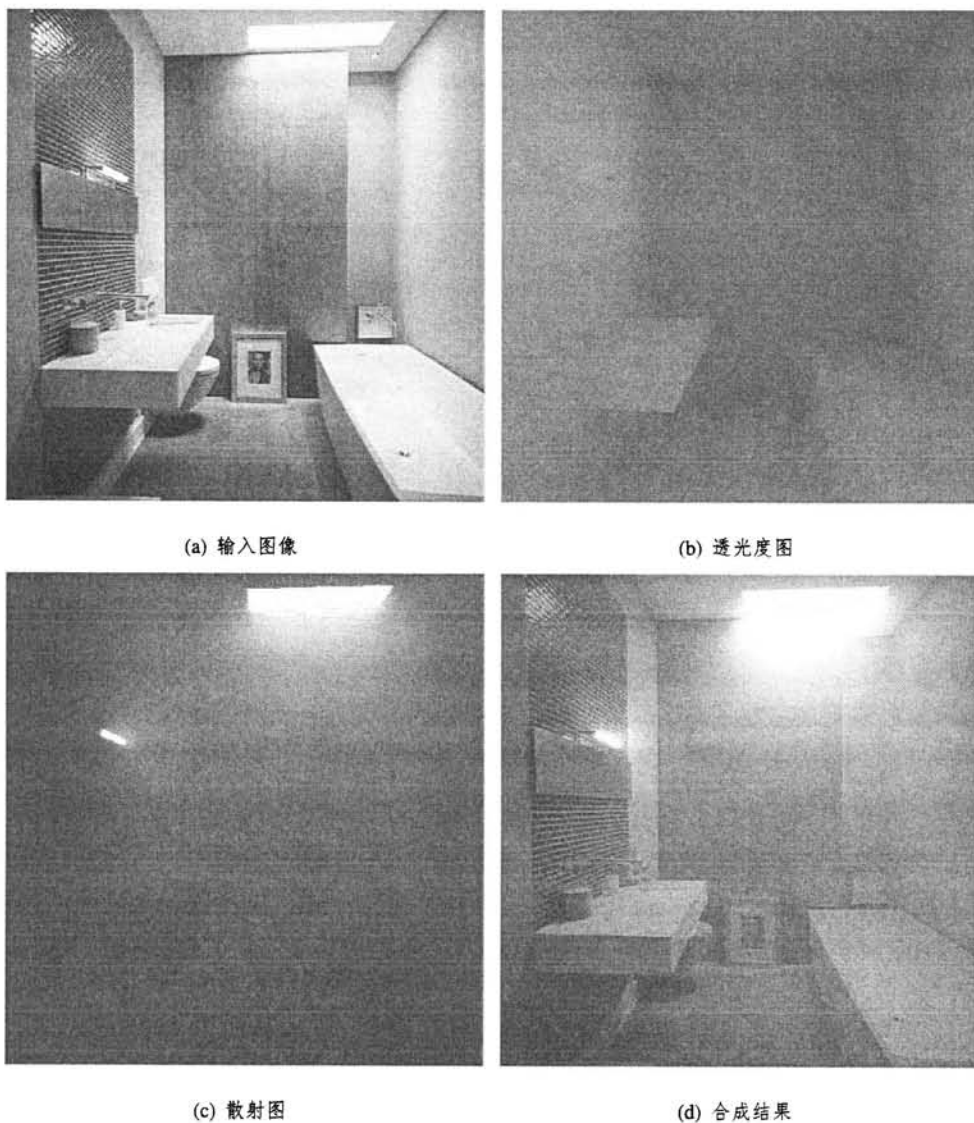


图 5.4 烟雾绘制与室内场景融合结果。在计算光照估计时，我们分别标记了两个面光源来近似输入图像中的光源。在计算几何估计时，我们分别用两个长方体作为图中浴缸和平台的几何近似。

收属性以及密度分布,我们就可直接计算单散射着色结果。我们将该结果定义为散射图 $\mathcal{V}$,并将最终融合结果定义为合成图 $\mathcal{C}$ 。则合成图可用公式 $\mathcal{C} = \mathcal{R} \odot \mathcal{T} + \mathcal{V}$ 表示。

5.3 实现细节

在本节,我们介绍本章算法的实现细节以及实验。由于本章算法的输入是一张二维的图像,我们利用简单的用户交互标记图像中光源的位置,以进行光照估计。由于我们对室内和室外场景采用不同的方法处理,所以我们分别进行讨论。

5.3.1 室内场景光照和几何估计以及光柱效果模拟

光照估计 我们采用文献^[88]中提出的方法对每个光源进行估计。其中,对于室内的灯光,我们采用面光源进行近似。而从窗户和们射进来的室外太阳光我们用方向光源进行近似。

几何估计 Zheng等为了在图像空间模拟三维物体的平移和旋转操作,提出一种利用长方体近似人造物体,如:桌子,椅子等,的算法^[107]。我们将该方法引入本章的几何估计步骤中,首先用一个大的长方体表示图像中的室内空间,然后用垂直平面上的矩形或多边形表示各种面光源或方向光源。对于场景中的人造物体物体,我们为其创建一个长方体包围体并用该包围体作为场景中物体的代理用于绘制参与介质散射现象。根据我们的实验,长方体近似可以在一定程度上描述对室内物体的深度信息。对于参与介质散射绘制,该近似可以满足人眼的需求。我们将在第5.4.1节通过用户调查和实验证明这一近似是合理的。

根据光照和几何估计,我们使用基于物理的光线跟踪引擎(PBRT)^[100]为室内场景图像生成透光度图和散射图,如图5.4(b)和图5.4(c)。然后,我们将输入图像、透光度图以及散射图合成最终的结果,如图5.4(d)。在这一结果中,我们将虚拟的均匀参与介质加入了室内场景图像中,但对于非均匀参与介质也同样适用。

太阳光在参与介质中形成的光柱 被物体遮挡的方向光或聚光灯在参与介质中由于参与介质的散射现象会形成一道道光柱(shaft of light)。例如:在充满灰尘的暗室中打开一扇窗或者门。为了模拟这一效果,我们将场景中能够射入太阳光的区域定义为一个太阳光源并用一个方向光源表示。我们首先对输入图像中的光源位置(打开的窗户或门)进行人工标记。在一般情况下,窗户或者门可以用矩形或者多边形近似,如图5.5(a)。对于场景中所有的太阳光源,用同一入射方向表示。但由于从单张图像对其场景进行几何估计存

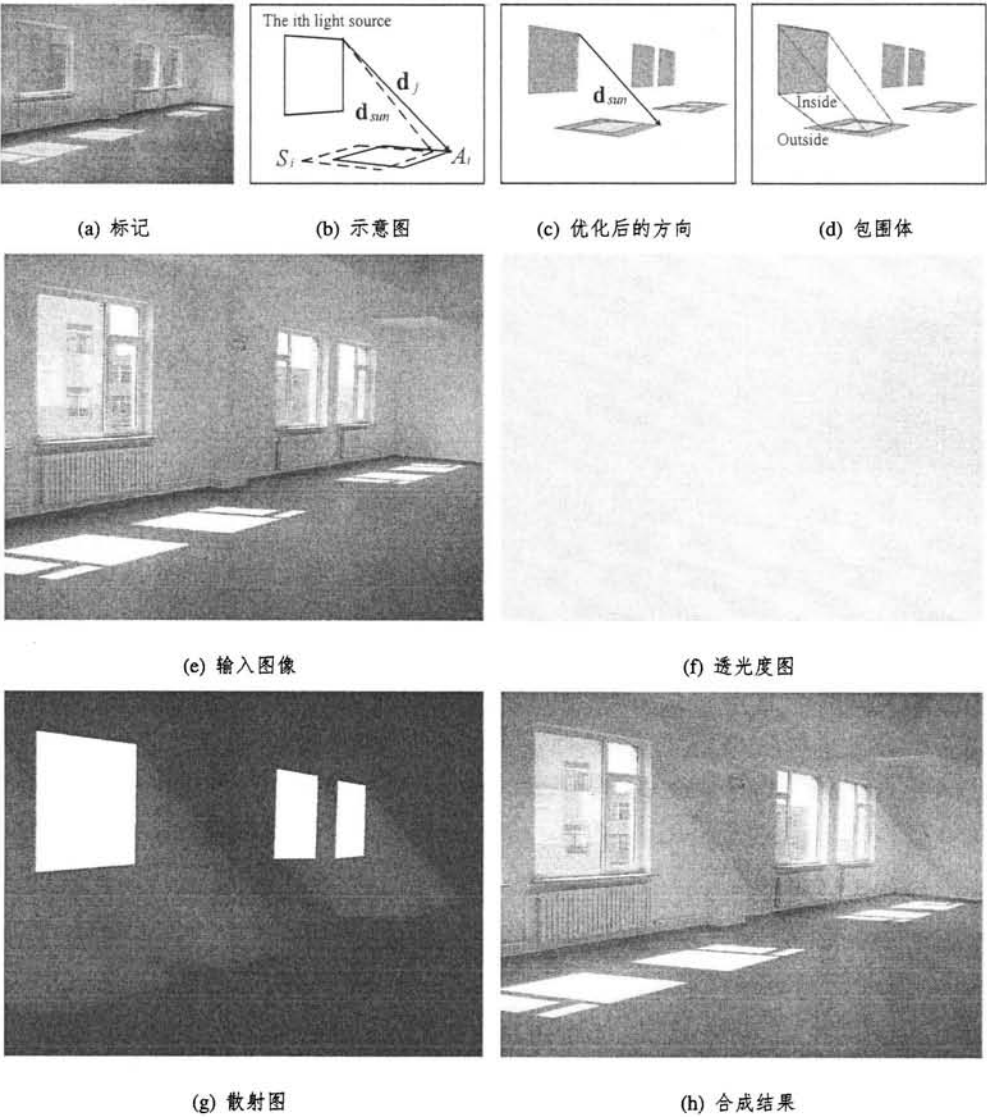


图 5.5 太阳光方向的优化、光柱包围体及其绘制结果。图中红色和绿色的多边形分别表示射入室内的太阳光源（如：窗户或门）和在地面上形成的照亮区域。在图 5.5(c) 和图 5.5(d) 中，紫色的多边形表示根据优化后的太阳光方向将光源投射到地面的区域，蓝色线条包围的椎体表示光柱的包围体。

在误差, 太阳光的方向无法直接计算获得。因此, 我们计算从太阳光源的每个顶点到地面上形成的照亮区域的相应顶点的方向, 然后通过非线性最小二乘优化太阳光方向。但是, 我们将多边形光源沿着优化后的太阳光方向投射到地面后发现仍然与实际情况存在误差如图 5.5(d), 所以利用一个包围体约束发生散射的区域模拟形成的太阳光柱。

考虑图 5.5(b) 中显示的场景。假设图中有 n 个太阳光源。对于第 i 个太阳光源, 假设该多边形有 m 个顶点。从太阳光源的各个顶点向地面上的照亮区域的相应顶点发射一条射线, 可以得到 m 个方向 $\mathbf{d}_j, j \in [0, m-1]$ 。令 $S_i \in [S_0, S_{n-1}]$ 和 $A_i \in [A_0, A_{n-1}]$ 表示第 i 个太阳光源沿着方向 $\mathbf{d}_{sun}$ 在地面上的投影以及地面上照亮区域。令 $\mathcal{A}(\cdot)$ 表示物体在图像中的面积。我们利用如下目标函数来优化 $\mathbf{d}_{sun}$:

$$\min_{arg} \sum_{i=0}^{n-1} \left(\sum_{j=0}^{m-1} \arccos(\mathbf{d}_{sun} \cdot \mathbf{d}_j) - \frac{\mathcal{A}(S_i) \cap \mathcal{A}(A_i)}{\mathcal{A}(S_i) \cup \mathcal{A}(A_i)} \right).$$

其中, 第一项表示方向 $\mathbf{d}_{sun}$ 和 $\mathbf{d}_j$ 之间角度之和。由于 $\mathbf{d}_j$ 可以作为观测的太阳光方向, 所以我们认为 $\mathbf{d}_{sun}$ 应该尽量与它们相近。第二项表示被投射的太阳光源区域面积与图像中相应的照亮区域面积的交集与并集之比。由于我们认为这两个区域应该尽量相似, 所以将重叠区域最大化。

但是, 由于人工交互标记以及几何估计的误差, 被投射的太阳光源区域与被照亮的区域无法完全重合, 如图 5.5(c)。所以, 我们对每个太阳光源构建一个包围体。通过将太阳光源的每个顶点与被照亮区域的每个顶点连接形成一个包围体, 如图 5.5(d)。在绘制光柱时, 只有在包围体内部的点是被太阳光照亮的, 其他的点都落在物体阴影中。

5.3.2 室外场景光照和几何估计

光照估计 目前, 已经有许多研究者提出不同的方法从单张室外场景图像中全自动地估计自然光照。但是, 它们其中大多数都是基于学习的方法^[111,112], 其过程非常复杂。在本章算法中, 我们利用了少量人工交互并采用 Xing 等论文^[113]中提出的方法来进行室外光照估计。根据 Liu 等提出的室外光照模型^[106], 室外场景的光照主要包含太阳光和天空光两部分。其中, 太阳光和天空光分别用方向光和均匀分布的环境光近似, 并且假设场景中所有点的光照都相同。考虑图像中的某一点 $\mathbf{p}$, 假设其材质为完全漫反射属性, 则该点的反射

光照可用如下公式表示:

$$\begin{aligned}
 I(\mathbf{p}) &= I_{sun} + I_{sky} \\
 &= L_{sun}\rho(\mathbf{p})V(\mathbf{p}, \omega_{sun})\cos\theta_{sun} + \\
 &\quad \int_{\Omega} L_{sky}\rho(\mathbf{p})V(\mathbf{p}, \omega_i)\cos\theta d\omega_i
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

其中, L_{sun} 和 L_{sky} 分别表示太阳光和天空光, ρ 和 V 分别表示BRDF和可见性函数。在计算 L_{sky} 时, 我们选择地面上阴影区域的像素作为采样点, 则公式 5.6 变为:

$$I(\mathbf{p}) = I_{sky} = \pi L_{sky}\rho(\mathbf{p})$$

因此, L_{sky} 可用公式 $L_{sky} = s \frac{I(\mathbf{p})}{\pi\rho(\mathbf{p})}$ 进行计算, 其中 s 是一个计算值和真实值之间相差的一个缩放因子。在计算 L_{sun} 时, 我们选择地面上被太阳光照射到的区域像素作为采样点。则公式 5.6 变为:

$$I(\mathbf{p}) = I_{sun} + I_{sky} = L_{sun}\rho(\mathbf{p})\cos\theta_{sun} + I_{sky}$$

因此, L_{sun} 可用公式 $L_{sun} = s \frac{I(\mathbf{p}) - I_{sky}}{\rho(\mathbf{p})\cos\theta_{sun}}$ 进行计算。在本章算法的实现中, s 和 ρ 为人工指定值。

几何估计 室外场景中物体的几何比室内场景中人造物体要复杂的多。例如: 建筑、树木以及公路等都难以用统一的简单几何进行近似。所以, 我们使用一个深度图作为室外场景图像的几何估计。我们利用简单的人工交互并将Hoiem等在07年发表的论文中提出的分类思想引入深度图估计步骤中。对于一张室外场景图像, 我们将其中的物体分为三类: 水平面(或近似水平面)、垂直面以及天空区域, 如图 5.6(b)。近似水平面指与地面近似平行的面, 一般包括路面、草坪、延伸到远方的树丛以及湖面等。水平面的深度从近至远逐渐变化。垂直面指的是倾斜度很大, 近似于与水平面垂直的面, 一般包括墙面、山壁以及建筑物。垂直面的深度用一个近似常数表示。天空区域就是指一般意义的天空, 它的深度被设定为最大值。在本章算法实现中, 水平面的深度边界、垂直面深度以及天空区域深度都是人工交互指定, 如图 5.6(c)。

在绘制单散射参与介质时, 视线方向的深度决定于深度图中的深度值。考虑三维空间中一点物体表面上一点 $\mathbf{x}$, 其在二维图像中的投影点表示为 $\mathbf{p}$ 。令拍摄相机的内参矩阵表

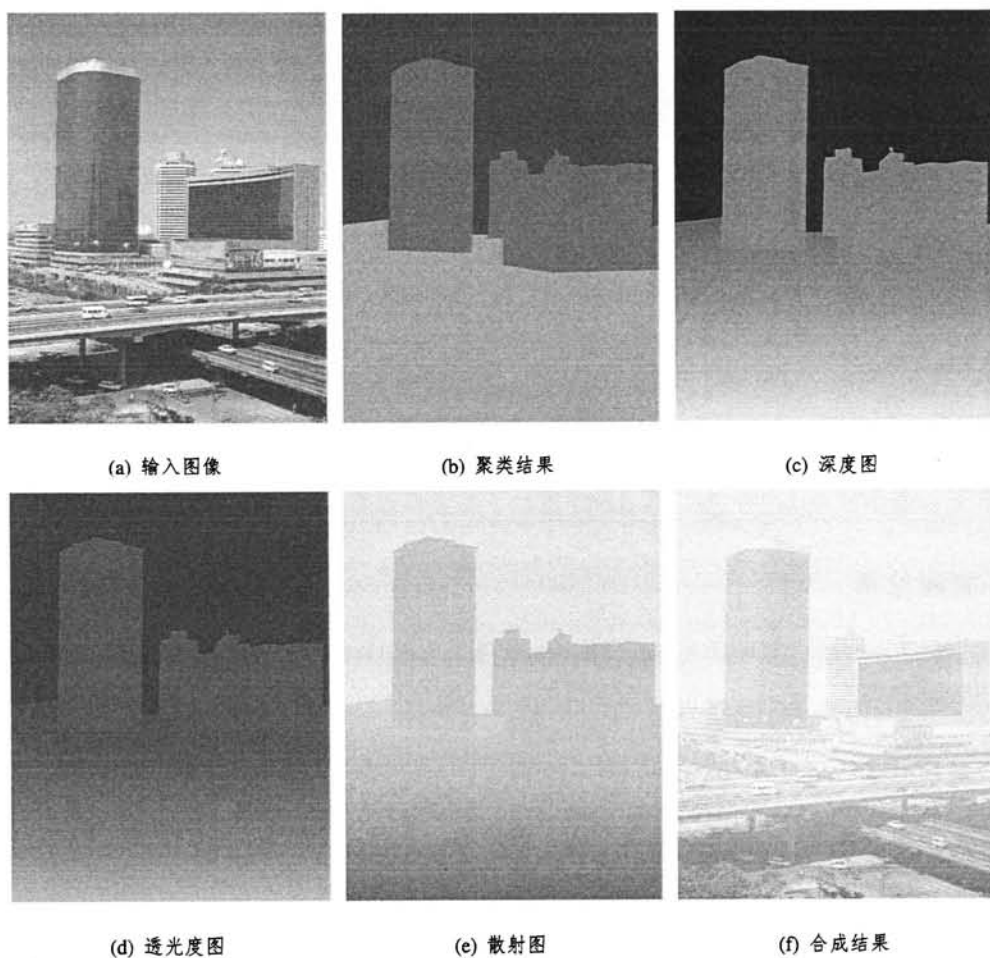


图 5.6 烟雾绘制与室外场景图像融合结果。在图 5.6(b) 中，红、绿、蓝三种颜色分别表示垂直建筑、近似水平的地面以及天空区域。

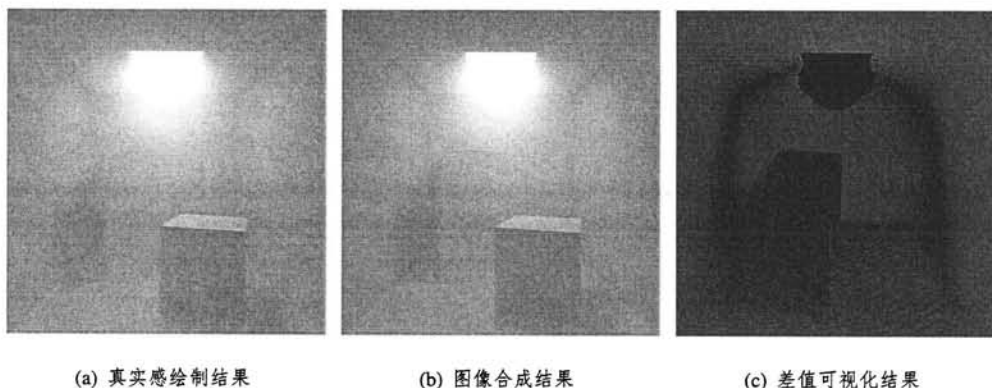


图 5.7 均匀参与介质真实感绘制结果与基于图像绘制结果的比较。其中图(c)是图(a)和图(b)的差放大两倍的可视化结果。

示为 K 。如果将该点的深度设为 d , 则 $\mathbf{x}$ 可以用公式 $\mathbf{x} = dK^{-1}[\mathbf{p}, 1]^T$ 计算。其中视线深度以及方向可以表示成为 $\|\mathbf{x}\|$ 和 $\frac{\mathbf{x}}{\|\mathbf{x}\|}$ 。图 5.6(f) 显示了将虚拟烟雾与室外场景图像融合的结果。

5.4 实验结果

我们在一台配置为 Intel(R)Core(TM) Duo E7400 2.8GHz CPU, 4G 内存的个人台式机上实现了本章算法。

5.4.1 验证实验

为了验证本章算法对透光度和反射光能的分解, 我们对均匀和非均匀参与介质做了不同的验证试验。我们利用基于物理的光线跟踪引擎绘制了包含参与介质和 Cornell Box 场景的结果作为 Ground Truth。然后, 绘制一张仅包含 Cornell Box 而没有参与介质的结果作为本章算法的输入。通过光照和几何估计绘制透光度图以及散射图, 并结合输入图像合成最终结果。最后, 将真实感绘制结果和图像合成结果进行求差运算, 并将结果可视化。

图 5.7 和图 5.8 分别显示了对均匀和非均匀参与介质, 真实感绘制结果和图像合成结果的比较。

5.5 小结

在本章, 我们提出了一个基于少量人工交互将虚拟绘制的参与介质与真实图像进行融

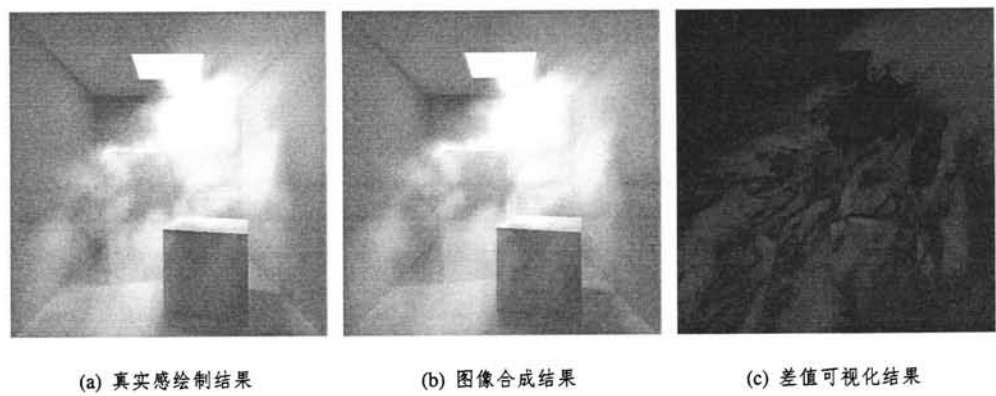


图 5.8 非均匀参与介质真实感绘制结果与基于图像绘制结果的比较。其中图(c)是图(a)和图(b)的差放大两倍的可视化结果。

合的算法框架。该算法可以适用于室内或室外的图像。相比于前人的方法，由于我们的方法对输入图片场景中的光照和几何信息进行了估计并采用了基于物理的绘制引擎，所以生成的结果更加真实。并且，我们的方法可以生成光晕以及光柱等效果。通过用户调查，我们的方法能够在一定程度上接近真实拍摄的结果，并对没有特殊经验的观察者起到迷惑的效果。

5.5.1 局限性与未来工作

由于我们的方法只模拟了参与介质单散射现象，所以无法产生焦散以及多次散射等复杂的效果。对于场景中含有投射土体的情况我们的方法无法真实模拟。在未来的工作中，我们希望将多次散射以及焦散现象加入到我们的方法中。另外，我们希望能够从单张含有烟雾图像中对图中参与介质的密度以及属性进行建模。

第6章 总结与展望

梯度信息在计算机图形学以及图像处理中有着广泛的应用。本文从不同的角度探讨了梯度信息在实时绘制加速、梯度域的高频信号分析以及全局优化中平滑约束等问题的应用。但梯度信息的应用不仅限于这几类问题,在未来的工作中我们将继续对梯度信息的应用做更加深入的研究。

6.1 本文工作总结

本文的第一部分工作针对介质单散射绘制提出了一种在GPU上并行计算的算法框架,并且利用屏幕空间采样点的梯度进行插值计算提高绘制效率。介质单散射绘制计算复杂度高,十分耗时。其原因主要是介质对光能在传播过程中的作用不仅发生在介质分布的边缘,而且存在于介质空间中的每一点,绘制算法需要考虑在光线穿过介质的路径上的每一点处介质对光能的光学作用。因此,在CPU上串行的模拟该过程一般无法达到实时的绘制效率。虽然,一些基于预计算的方法能够实时的绘制介质单散射现象,但是它们往往无法支持对介质属性的实时修改。本文利用了现代GPU的强大并行计算能力,将传统的串行算法并行化计算。由于GPU有着与CPU完全不同的硬件架构,其并行的浮点数计算能力远远高于CPU。并且,Nvidia公司在2007年推出的CUDA通用计算平台使得我们可以更加灵活的运用GPU上的大量并行流水线。这也为我们更加复杂的算法在GPU上并行执行提供了条件。此外,我们在屏幕空间根据光线在介质中传播的距离的变化程度进行采样,在变化大的区域密集采样变化小的区域稀疏采样。然后计算采样点的但散射光能以及梯度。最后,在其他的像素点位置根据采样点的但散射光能值以及梯度进行快速插值计算。最终,我们的算法能够达到可交互的绘制效率。并且,我们的算法无需任何预计算、支持均匀和非均匀介质实时修改介质属性。

本文的第二部分工作将基于梯度的图像增强方法扩展到三维增强绘制。图像增强方法的核心思想是,提取原图像的高频部分进行放大,使得原图像的细节信息得到增强。而基于梯度的图像增强方法的主要步骤是首先对图像求梯度然后将梯度图叠加到原图像上。由于梯度图中包含了原图中的边缘以及变化较大的细节信息,因此叠加后的结果中这些细节部分得到了增强。我们的方法将这一技术运用到三维绘制过程中,首先求取三维绘制结果相对图像空间坐标的梯度,然后利用该梯度对绘制结果进行增强。与直接处理二维绘制结

果不同的是,求取梯度的过程是在三维空间完成的。并且,我们通过用户调查分析了绘制结果梯度中几何项、投影变换项、阴影项以及高光项的梯度对最后增强效果的影响。我们发现几何项以及投影变换项是影响增强绘制结果的重要因素,而其他两项是次要因素。经实验表明由于我们的方法考虑了投影变换项梯度,所以能够比与前人方法更好的处理掠射角区域的增强。

本文的第三部分工作提出一种自动从单张图像获取材质风格的算法。材质设计是三维场景建模的重要内容,好的三维模型材质设计不仅能增强绘制结果的真实感,而且在某些领域能够体现三维场景设计的整体风格。但是,人工地为场景中各个物体添加材质不仅耗时而且费力。并且,有些邻域的材质设计,如:建筑设计,往往会遵循一定的设计准则,对于缺少经验的设计者来说并不直观,因此他们常会在设计时参考一些样本图像,或者已经设计好的场景。为了使材质设计更加方便,我们提出一种从单张样本图像自动获取材质风格的方法。与传统的基于图像的材质获取方法不同的是,我们的方法并不从单幅图像中获取精确的材质属性,而是从图像中的获取材质风格并转移到缺少材质属性的三维几何模型上。我们首先对三维场景采样多个视图,利用反绘制技术从样本图像中自动获取材质风格,并转换到三维场景的各个视图中作为场景中物体的候选材质。然后定义候选材质绘制结果与样本图像材质分布差异的目标函数,其中包含两者色度的均值、方差以及直方图分布的差。最后利用禁忌搜索方法优化该目标函数,从候选材质中选取最合适的一组作为最终结果。通过用户调查我们将自动获取的结果与人工交互的结果进行对比。实验证明我们的方法能在一定程度上与人工交互结果相媲美。

本文的第四部分工作提出一种基于图像的烟雾效果绘制算法。由于虚拟现实的广泛应用,将虚拟物体加入真实场景成为目前热门的研究课题。许多研究者提出了不同方法将虚拟物体加入真实拍摄场景中,但是如何将虚拟介质融合到真实图像中仍然是一个有待解决的问题。我们的方法将一张室内或室外的真实图像作为输入。通过公式推导和分析,我们将透光度和反射光照进行分解作为我们算法的理论基础,并定义了透光度图和散射图。通过少量用户交互,对输入图像中场景的光照和几何信息进行近似估计。然后根据该近似估计绘制透光度图和反射图。最后,结合输入图像、透光度图以及散射图合成最终结果。对于室内和室外场景图像的光照和几何估计,我们采用了不同的处理方法。对于室内场景,我们分别用面光源以及方向光源近似室内灯光和从窗户以及门射入的太阳光,并用长方体近似室内人造家具等物体。对于室外场景,我们用方向光源和均匀的环境光近似太阳光和

天空光,并用深度图近似室外场景的几何。实验证明,我们的方法能够达到较好的绘制效果。

6.2 未来工作展望

在未来的工作中,我们希望从以下几个方向对本文的工作进行拓展:

- **介质多散射绘制** 在介质散射绘制中,实时绘制多散射现象仍然是十分困难的工作。虽然有些基于预计算的方法已经可以达到实时绘制的效率,但是它们无法实时修改介质属性。还有一些方法着重于实时绘制多散射中的焦散现象,而介质中粒子之间的多次散射模拟仍然难以达到实时的效率。基于梯度的辐照度缓存算法已经在介质散射绘制中得到了应用。但是,即使是利用了梯度信息插值进行加速计算,绘制效率还不足以达到实时。因此,本文希望在以后的工作中对介质多散射实时绘制方法进行更加深入的研究。其次,图形学技术在最近几年的发展中逐渐与计算机视觉相互交叉融合,本文希望在利用视觉技术对图像中场景进行光照、几何以及材质估计的情况下,在实际拍摄的场景中加入虚拟介质散射绘制结果。在真实场景中添加虚拟介质散射绘制也将会是本文在这方面的后续工作之一。
- **三维梯度增强绘制** 本文提出的三维梯度增强绘制工作中,虽然对点光源照射下绘制结果梯度中各项对增强效果的影响做了研究和探讨,但是在环境光照射下的入射光场的梯度对增强绘制结果的影响仍然值得进一步的研究和分析。其次,考虑更复杂的材质模型也是本文在这一方面的后续工作。
- **基于图像的材质获取** 由于虚拟现实的广泛应用,对图像中场景的光照、几何以及材质的估计已经成为目前的热门课题。要从图像中获取更加准确的材质信息,必须对场景的光照和几何的进行估计。目前,已经有一些算法通过简单的人工交互恢复出场景的粗略几何,并且根据几何和人工交互的材质信息估计室内以及室外场景的光照。还有一些工作,通过设计简单的光照和几何拟合出图像中物体的准确材质。在未来的工作中,我们希望在这方面的工作中结合对光照和几何的估计,使得材质获取结果更加真实准确。

参考文献

- [1] KAJIYA J T. The rendering equation[J]. SIGGRAPH Comput. Graph., 1986, 20(4):143–150.
- [2] JENSEN H W. Global illumination using photon maps[C]// Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques. London, UK, UK: Springer-Verlag, 1996: 21–30.
- [3] COOK R L, PORTER T, CARPENTER L. Distributed ray tracing[J]. SIGGRAPH Comput. Graph., 1984, 18(3):137–145.
- [4] WARD G J, HECKBERT P S. Irradiance gradients[C]// ACM SIGGRAPH 2008 classes. New York, NY, USA: ACM, 2008: 72.
- [5] WARD G J, RUBINSTEIN F M, CLEAR R D. A ray tracing solution for diffuse interreflection[C]// ACM SIGGRAPH 2007 courses. New York, NY, USA: ACM, 2007: 11.
- [6] KRIVÁNEK J, GAUTRON P, PATTANAIK S, et al. Radiance caching for efficient global illumination computation[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, 11(5):550–561.
- [7] KŘIVÁNEK J, GAUTRON P, BOUATOUCHE K, et al. Improved radiance gradient computation[C]// Proceedings of the 21st Spring Conference on Computer Graphics. New York, NY, USA: ACM, 2005: 155–159.
- [8] JAROSZ W, DONNER C, ZWICKER M, et al. Radiance caching for participating media[J]. ACM Trans. Graph., 2008, 27(1):7.
- [9] REN Z, ZHOU K, LIN S, et al. Gradient-based interpolation and sampling for real-time rendering of inhomogeneous, single-scattering media.[C]//. 2008: 1945–1953.
- [10] SLOAN P P, KAUTZ J, SNYDER J. Precomputed radiance transfer for real-time rendering in dynamic, low-frequency lighting environments[J]. ACM Trans. Graph., 2002, 21(3):527–536.
- [11] LIU X, SLOAN P P, SHUM H Y, et al. All-frequency precomputed radiance transfer for glossy objects[C]// Proceedings of the 15th Eurographics Conference on Rendering Techniques. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2004: 337–344.

- [12] KAUTZ J, SLOAN P P, LEHTINEN J. Precomputed radiance transfer: theory and practice[C]// ACM SIGGRAPH 2005 Courses. New York, NY, USA: ACM, 2005: 1.
- [13] VERGNE R, BARLA P, FLEMING R W, et al. Surface flows for image-based shading design[J]. ACM Trans. Graph., 2012, 31(4):94.
- [14] RAMAMOORTHY R, MAHAJAN D, BELHUMEUR P. A first-order analysis of lighting, shading, and shadows[J]. ACM Trans. Graph., 2007, 26(1):2.
- [15] WEI L Y, WANG R. Differential domain analysis for non-uniform sampling[J]. ACM Trans. Graph., 2011, 30(4):50.
- [16] MAGNUS W, NAFEEES B Z, OLLIE H, et al. Production volume rendering systems[C]// ACM SIGGRAPH 2011 Courses. New York, NY, USA: ACM, 2011: 13.
- [17] BLINN J F. Light reflection functions for simulation of clouds and dusty surfaces[J]. SIGGRAPH Comput. Graph., 1982, 16(3):21–29.
- [18] JENSEN H W, CHRISTENSEN P H. Efficient simulation of light transport in scences with participating media using photon maps[C]// Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA: ACM, 1998: 311–320.
- [19] CEREZO E, PÉREZ F, PUEYO X, et al. A survey on participating media rendering techniques[J]. The Visual Computer, 2005, 21(5):303–328.
- [20] SUN B, RAMAMOORTHY R, NARASIMHAN S G, et al. A practical analytic single scattering model for real time rendering[J]. ACM Trans. Graph., 2005, 24(3):1040–1049.
- [21] HONG R, HO T C, CHUANG J H, et al. A real-time analytic lighting model for anisotropic scattering[C]// Computer Graphics Workshop. 2006: 18.
- [22] LECOCQ P, KEMENY A, MICHELIN S, et al. Mathematical approximation for real-time lighting rendering through participating media[C]// Proceedings of the 8th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2000: 400–401.
- [23] PEGORARO V, PARKER S G. An Analytical Solution to Single Scattering in Homogeneous Participating Media[J]. Computer Graphics Forum (Proceedings of the 30th Eurographics Conference), 2009, 28(2):329–335.

- [24] ABRAMOWITZ M, STEGUN I A. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables[M]. U.S. Department of Commerce, 1972.
- [25] PEGORARO V, SCHOTT M, PARKER S G. A closed-form solution to single scattering for general phase functions and light distributions[C]// Proceedings of the 21st Eurographics Conference on Rendering. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2010: 1365–1374.
- [26] ZHOU K, HOU Q, GONG M, et al. Fogshop: Real-time design and rendering of inhomogeneous, single-scattering media.[C]// Pacific Conference on Computer Graphics and Applications. IEEE Computer Society 2007: 116–125.
- [27] REN Z, ZHOU K, LIN S, et al. Gradient-based interpolation and sampling for real-time rendering of inhomogeneous, single-scattering media.[J]. Comput. Graph. Forum, 2008, 27(7):1945–1953.
- [28] WYMAN C, RAMSEY S. Interactive volumetric shadows in participating media with single-scattering[C]// IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing. 2008: 87–92.
- [29] ENGELHARDT T, DACHSBACHER C. Epipolar sampling for shadows and crepuscular rays in participating media with single scattering[C]// Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. New York, NY, USA: ACM, 2010: 119–125.
- [30] BARAN I, CHEN J, RAGAN-KELLEY J, et al. A hierarchical volumetric shadow algorithm for single scattering[J]. ACM Trans. Graph., 2010, 29(6):178–178.
- [31] CHEN J, BARAN I, DURAND F, et al. Real-time volumetric shadows using 1d min-max mipmaps[C]// Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. New York, NY, USA: ACM, 2011: 39–46.
- [32] RUSINKIEWICZ S, COLE F, DECARLO D, et al. Line drawings from 3d models[C]// ACM SIGGRAPH 2008 classes. New York, NY, USA: ACM, 2008: 39.
- [33] SAITO T, TAKAHASHI T. Comprehensible rendering of 3-d shapes[J]. ACM Trans. Graph., 1990, 24:197–206.
- [34] NIENHAUS M, DOLLNER J. Blueprints - illustrating architecture and technical parts using hardware-accelerated non-photorealistic rendering[C]// Graphics Interface. 2004: 49–56.

- [35] GOODWIN T, VOLICK I, HERTZMANN A. Isophote distance: A shading approach to artistic stroke thickness[C]// Proceedings of International Symposium on Nonphotorealistic Animation and Rendering. ACM 2007: 53–62.
- [36] MILLER G. Efficient algorithms for local and global accessibility shading[C]// Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA: ACM, 1994: 319–326.
- [37] PHARR M, GREEN S. GPU Gems, Ambient Occlusion[M]. Addison-Wesley, 2004.
- [38] CIGNONI P, SCOPIGNO R, TARINI M. A simple normal enhancement technique for interactive non-photorealistic renderings[J]. Computer & Graphics, 2005, 29(1):125–133.
- [39] LEE Y, MARKOSIAN L, LEE S, et al. Line drawings via abstracted shading[J]. ACM Trans. Graph., 2007, 26(3):18.
- [40] RUSINKIEWICZ S, BURNS M, DECARLO D. Exaggerated shading for depicting shape and detail[J]. ACM Trans. Graph., 2006, 25(3):1199–1205.
- [41] KOENDERINK J J. What does the occluding contour tell us about solid shape?[J]. Perception, 1984, 13(3):321–330.
- [42] GOOCH B, SLOAN P P J, GOOCH A, et al. Interactive technical illustration[C]// Proceedings of the 1999 Symposium on Interactive 3D Graphics. New York, NY, USA: ACM, 1999: 31–38.
- [43] HERTZMANN A, ZORIN D. Illustrating smooth surfaces[C]// Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA: ACM, 2000: 517–526.
- [44] DECARLO D, FINKELSTEIN A, RUSINKIEWICZ S, et al. Suggestive contours for conveying shape[J]. , 2003, 22(3):848–855.
- [45] DECARLO D, FINKELSTEIN A, RUSINKIEWICZ S. Interactive rendering of suggestive contours with temporal coherence[C]// Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-photorealistic Animation and Rendering. New York, NY, USA: ACM, 2004: 15–145.
- [46] OHTAKE Y, BELYAEV A, SEIDEL H P. Ridge-valley lines on meshes via implicit surface fitting[J]. ACM Trans. Graph., 2004, 23(3):609–612.

- [47] JUDD T, DURAND F, ADELSON E. Apparent ridges for line drawing[J]. ACM Trans. Graph., 2007, 26(3):19.
- [48] KOLOMENKIN M, SHIMSHONI I, TAL A. Demarcating curves for shape illustration[J]. ACM Trans. Graph., 2008, 27(5):1571–1579.
- [49] DECARLO D, RUSINKIEWICZ S. Highlight lines for conveying shape[C]// In Proceedings of the International Symposium on Non-photorealistic Animation and Rendering. 2007: 63–70.
- [50] BELKIN M, SUN J, WANG Y. Discrete laplace operator on meshed surfaces[C]// Proceedings of the 24th Annual Symposium on Computational Geometry. ACM 2008: 278–287.
- [51] ZHANG L, HE Y, XIE X, et al. Laplacian lines for real-time shape illustration[C]// Proceedings of Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. ACM 2009: 129–136.
- [52] VERGNE R, PACANOWSKI R, BARLA P, et al. Light warping for enhanced surface depiction[J]. ACM Trans. Graph., 2009, 28(3):25–25.
- [53] RITSCHER T, SMITH K, IHRKE M, et al. 3d unsharp masking for scene coherent enhancement[J]. ACM Trans. Graph., 2008, 27(3):90.
- [54] IHRKE M, RITSCHER T, SMITH K, et al. A perceptual evaluation of 3d unsharp masking.[C]// Human Vision and Electronic Imaging. vol 7240. SPIE 2009: 7.
- [55] FLEMING R W, TORRALBA A, ADELSON E H. Specular reflections and the perception of shape[J]. J. Vis., 2004, 4(9):798–820.
- [56] FLEMING R W, TORRALBA A, ADELSON E H. Shape from sheen[R]. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2009.
- [57] VERGNE R, PACANOWSKI R, BARLA P, et al. Radiance scaling for versatile surface enhancement[C]// Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. New York, NY, USA: ACM, 2010: 143–150.
- [58] ASHIKMIN M, PREMOŽE S, SHIRLEY P. A microfacet-based brdf generator[C]// Proceedings of Siggraph 2000. ACM 2000: 65–74.
- [59] FOO S C. A gonireflectometer for measuring the bidirectional reflectance of material for use in illumination computation 1997.

- [60] MARSCHNER S R, WESTIN S H, LAFORTUNE E P F, et al. Image-based bidirectional reflectance distribution function measurement[J]. *Applied Optics*, 2000, 39:2592–2600.
- [61] MARSCHNER S R, WESTIN S H, LAFORTUNE E P F, et al. Image-based brdf measurement including human skin[C]// *Proceedings of the 10th Eurographics Conference on Rendering*. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 1999: 131–144.
- [62] MATUSIK W, PFISTER H, BRAND M, et al. Efficient isotropic brdf measurement[C]// *Proceedings of the 14th Eurographics Workshop on Rendering*. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2003: 241–247.
- [63] YU Y, MALIK J. Recovering photometric properties of architectural scenes from photographs[C]// *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: ACM, 1998: 207–217.
- [64] YU Y, DEBEVEC P, MALIK J, et al. Inverse global illumination: recovering reflectance models of real scenes from photographs[C]// *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1999: 215–224.
- [65] RAMAMOORTHY R, HANRAHAN P. A signal-processing framework for inverse rendering[C]// *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: ACM, 2001: 117–128.
- [66] ROMEIRO F, VASILYEV Y, ZICKLER T. Passive reflectometry[C]// *Proceedings of the 10th European Conference on Computer Vision: Part IV*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008: 859–872.
- [67] ROMEIRO F, ZICKLER T. Blind reflectometry[C]// *Proceedings of the 11th European conference on Computer vision: Part I*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010: 45–58.
- [68] LENSCH H P A, KAUTZ J, GOESELE M, et al. Image-based reconstruction of spatial appearance and geometric detail[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2003, 22(2):234–257.
- [69] GOLDMAN D B, CURLESS B, HERTZMANN A, et al. Shape and spatially-varying brdfs from photometric stereo[J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2010, 32(6):1060–1071.

- [70] HOLROYD M, LAWRENCE J, ZICKLER T. A coaxial optical scanner for synchronous acquisition of 3d geometry and surface reflectance[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2010, 29(4):99.
- [71] ZICKLER T, ENRIQUE S, RAMAMOORTHY R, et al. Reflectance sharing: image-based rendering from a sparse set of images[C]// *Proceedings of the 16th Eurographics Conference on Rendering Techniques*. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2005: 253–264.
- [72] ALLDRIN N, ZICKLER T, KRIEGMAN D. Photometric stereo with non-parametric and spatially-varying reflectance[C]// *In Proceedings of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2008: 1–8.
- [73] DONG Y, TONG X, PELLACINI F, et al. Appgen: interactive material modeling from a single image[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2011, 30(6):146.
- [74] REINHARD E, ASHIKHMIN M, GOOCH B, et al. Color transfer between images[J]. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 2001, 21(5):34–41.
- [75] WELSH T, ASHIKHMIN M, MUELLER K. Transferring color to greyscale images[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2002, 21(3):277–280.
- [76] TAI Y W, JIA J, TANG C K. Local color transfer via probabilistic segmentation by expectation-maximization[C]// *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2005: 747–754.
- [77] LEVIN A, LISCHINSKI D, WEISS Y. Colorization using optimization[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2004, 23(3):689–694.
- [78] QU Y, WONG T T, HENG P A. Manga colorization[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2006, 25(3):1214–1220.
- [79] LUAN Q, WEN F, COHEN-OR D, et al. Natural image colorization[C]// *Proceedings of the 18th Eurographics Conference on Rendering Techniques*. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2007: 309–320.
- [80] ADELSON E H, FREEMAN W T. Estimating intrinsic component images using non-linear regression[C]// *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 1992: 1992–1999.

- [81] SHEN L, TAN P, LIN S. Intrinsic image decomposition with non-local texture cues[C]// IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2008: 1–7.
- [82] BOUSSEAU A, PARIS S, DURAND F. User-assisted intrinsic images[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2009, 28(5):130.
- [83] CARROLL R, RAMAMOORTHY R, AGRAWALA M. Illumination decomposition for material recoloring with consistent interreflections[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2011, 30(4):43.
- [84] DEBEVEC P. Rendering synthetic objects into real scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography[C]// Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA: ACM, 1998: 189–198.
- [85] ALNASSER M, FOROOSH H. Image-based rendering of synthetic diffuse objects in natural scenes[C]// Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2006: 787–790.
- [86] COSSAIRT O, NAYAR S, RAMAMOORTHY R. Light field transfer: global illumination between real and synthetic objects[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2008, 27(3):57.
- [87] LALONDE J F, EFROS A A, NARASIMHAN S G. Webcam clip art: appearance and illuminant transfer from time-lapse sequences[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2009, 28(5):131.
- [88] KARSCH K, HEDAU V, FORSYTH D, et al. Rendering synthetic objects into legacy photographs[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2011, 30(6):157.
- [89] JORGE L M, ANGEL C, DIEGO G. Image-based participating media[C]// CEIG 08. 2008: 179–187.
- [90] LAFORTUNE E P, WILLEMS Y D. Rendering participating media with bidirectional path tracing[C]// Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques. London, UK, UK: Springer-Verlag, 1996: 91–100.
- [91] PAULY M, KOLLIG T, KELLER A. Metropolis light transport for participating media[C]// Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering Techniques. London, UK, UK: Springer-Verlag, 2000: 11–22.

- [92] KAJIYA J T, VON HERZEN B P. Ray tracing volume densities[J]. SIGGRAPH Comput. Graph., 1984, 18(3):165–174.
- [93] NVIDIA. NVIDIA CUDA reference manual, version 2.3[R]. 2009.
- [94] DOTSENKO Y, GOVINDARAJU N K, SLOAN P P, et al. Fast scan algorithms on graphics processors[C]// Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Supercomputing. 2008: 205–213.
- [95] SATISH N, HARRIS M, GARLAND M. Designing efficient sorting algorithms for manycore gpus[C]// Proceedings of the 2009 IEEE International Symposium on Parallel&Distributed Processing. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2009: 1–10.
- [96] SENGUPTA S, HARRIS M, ZHANG Y, et al. Scan primitives for gpu computing[C]// Proceedings of the 22nd ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Symposium on Graphics Hardware. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2007: 97–106.
- [97] HILLIS W D, STEELE G L, JR. Data parallel algorithms[J]. Commun. ACM, 1986, 29(12):1170–1183.
- [98] NICKOLLS J, BUCK I, GARLAND M, et al. Scalable parallel programming with cuda[J]. Queue, 2008, 6(2):40–53.
- [99] HOBEROCK J, BELL N. Thrust: A parallel template library 2010.
- [100] PHARR M, HUMPHREYS G. Physically Based Rendering, Second Edition: From Theory To Implementation[M]. 2ndth ed. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2010.
- [101] RUSINKIEWICZ S. Estimating curvatures and their derivatives on triangle meshes[C]// Proceedings of the 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, 2nd International Symposium. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2004: 486–493.
- [102] ASHIKMIN M, PREMOŽE S, SHIRLEY P. A microfacet-based brdf generator[C]// Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000: 65–74.
- [103] 玛利·C.米勒. 室内设计色彩概论[M]. 上海: 上海人民美术出版社, 2009.

- [104] GLOVER F, MCMILLAN C. The general employee scheduling problem: an integration of ms and ai[J]. *Comput. Oper. Res.*, 1986, 13(5):563–573.
- [105] MAISCHBERGER M. Coin-or metslib: a metaheuristics framework in modern c++ 2011.
- [106] LIU Y, QIN X, XU S, et al. Light source estimation of outdoor scenes for mixed reality[J]. *Vis. Comput.*, 2009, 25(5-7):637–646.
- [107] ZHENG Y, CHEN X, CHENG M M, et al. Interactive images: Cuboid proxies for smart image manipulation[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2012, 3(4):99.
- [108] HOIEM D, EFROS A A, HEBERT M. Recovering surface layout from an image[J]. *Int. J. Comput. Vision*, 2007, 75(1):151–172.
- [109] GLASSNER A. Principles of digital image synthesis[M]. Morgan Kaufmann, 1995.
- [110] SIEGEL R, HOWELL J. Thermal Radiation Heat Transfer[M]. Hemisphere, 1992.
- [111] LALONDE J F, EFROS A A, NARASIMHAN S G. Estimating natural illumination from a single outdoor image[C]// ICCV. IEEE 2009: 183–190.
- [112] LALONDE J F, EFROS A A, NARASIMHAN S G. Estimating the natural illumination conditions from a single outdoor image.[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2012, 98(2):123–145.
- [113] XING G, LIU Y, QIN X, et al. A practical approach for real-time illumination estimation of outdoor videos.[J]. *Computers & Graphics*, 2012, 36(7):857–865.

攻读博士学位期间主要研究成果

论文发表

1. 赵福恺, 刘新国. GPU单散射并行绘制算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(1):32-39
2. 赵福恺, 刘新国. 从单张图像获取三维场景材质风格[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013 (accepted)
3. **Fukai Zhao**, Xinguo Liu. 3D Gradient Enhancement[J]. The Visual Computer, 2013, DOI: 10.1007/s00371-013-0787-3
4. Zhefeng Wu, **Fukai Zhao**, Xinguo Liu. SAH KD-Tree Construction on GPU[C]// Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on High Performance Graphics, 2011, 71-78
5. Ming Zeng, **Fukai Zhao**, Jiayang Zheng, and Xinguo Liu. A Memory-Efficient KinectFusion Using Octree[C]// Proceedings of First International Conference (CVM 2012), Lecture Notes in Computer Science, 7633, 234-241, 2012
6. Ming Zeng, **Fukai Zhao**, Jiayang Zheng, and Xinguo Liu. Octree-based Fusion for Real-time 3D Reconstruction[J]. Elsevier Graphical Models, 2013 (accepted).
7. **Fukai Zhao**, Ming Zeng, Bo Jiang, Xinguo Liu. Render Synthetic Fog into Interior and Exterior Photographs. Submitted to CVM2013

致谢

时光如梭，光阴似箭，转眼之间我的博士研究生生活即将结束。值此博士论文完成之际，谨向所有在学习和生活中给予我关心和帮助的老师、同学、朋友和亲人致以衷心的感谢！

感谢导师刘新国教授在我攻读博士研究生期间给予我的帮助和关怀。刘老师渊博的专业知识、实事求是的治学思想、严谨踏实的工作作风、兢兢业业的进取精神都深深地感染和影响了。回首过去，正是刘老师将我从一个对计算机图形学一无所知的门外汉领进了科研的殿堂。从我博士论文的选题、科研方向的确立到具体的算法设计、论文撰写以及各项科研任务的完成，都伴随着刘老师孜孜不倦、耐心细致的指导。每当我在科研的道路上遇到困难而感到沮丧时，刘老师总是不断的给与我鼓励和支持，让我重拾信心、克服困难、完成任务。在未来的学习和工作中，我将一直铭记刘老师对我的谆谆教诲，虚心学习、勤奋工作，向更高的目标迈进。

感谢实验室主任鲍虎军老师以及华炜老师对我在实验室学习期间的无微不至关心和帮助。在我初到实验室的第一年，鲍老师安排我跟随华老师学习计算机图形学绘制领域的相关技术。在王锐和盛崇山两位老师的指导下，我在参与完成工程项目的同时对图形绘制技术有了一定的了解，为以后在这一领域进一步研究打下了基础。

感谢彭群生老师以及彭老师讨论班上的老师和同学们。每次讨论班中同学们精彩的报告、畅所欲言的讨论以及彭老师一针见血的点评都开拓了我的科研视野、丰富了我的领域知识，让我印象深刻、受益匪浅。感谢为讨论班付出心血的老师们，他们是：彭群生、刘新国、于金辉、陈伟、王章野、万华根、郑文庭老师。同时，我还要感谢我的师兄师弟师姐师妹们在我的博士研究生期间陪伴我度过美好的时光，他们是：姜玻、杨勇杰、曾鸣、吴子朝、康菁菁、陈剑辉、吴哲锋、栾勖、梁伯均、王开盛、王鹏、陈坤、寿如阳、程轩、郑家祥、蒋剑、谭歆。

感谢亲爱的父母，你们在我成长过程中对我无私的爱和悉心关怀让我倍感温暖。你们是我人生旅途的启蒙导师，对我一直以来的教导和帮助将激励我不断进步，勇攀高峰。

赵福恺

2013年6月于浙大紫金港