

分类号 TP3

密级 \_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

编号 \_\_\_\_\_

# 中国科学院研究生院

## 博士学位论文

基于数据驱动的表面质感建模与绘制

王嘉平

指导老师 沈向洋 博士

微软亚洲研究院 中科院计算所客座博士生导师

申请学位级别 工学博士 学科专业名称 计算机应用技术

论文提交日期 2007年5月 论文答辩日期 2007年6月

培养单位 中国科学院计算技术研究所

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 \_\_\_\_\_



# 声 明

我声明本论文是我本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，本论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。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了谢意。

作者签名：

日期：

## 论文版权使用授权书

本人授权中国科学院计算技术研究所可以保留并向国家有关部门或机构送交本论文的复印件和电子文档，允许本论文被查阅和借阅，可以将本论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编本论文。

（保密论文在解密后适用本授权书。）

作者签名：

导师签名：

日期：



## 摘要

表面质感建模与绘制是计算机图形学的重要研究课题，也是真实感绘制技术中的核心课题之一。这个研究课题的主要内容是让计算机可以真实地模拟自然界中物体的外观。本文提出了基于数据驱动的表面质感建模思想，在此基础上自行搭建数据采集设备，研究了全效果的几何细微结构模型、准同质半透明材质模型和时变材质模型三个方面，具体如下：

1. 提出了新的基于细微结构距离函数(MDF)的细微结构模型，用于描述细微结构的几何特征，并且这个模型可以方便地在BTF数据采集的过程中一起获取。MDF函数记录了光线沿视点方向从参考平面起第一次和细微结构的几何微面相交的距离。这个方法在两个方面增强了BTF的绘制效果，使其能够处理不均匀的入射光并且有细微尺度的边缘轮廓效果。这个模型可以支持实时绘制并可以处理复杂的非高度场的细微结构不需要涉及到除物体几何网格之外的几何面片信息。MDF表达比原先基于可见性纹理的表达要紧凑，并且首次提出了可以从真实世界的样本中采样的模型。文中列举了多个材质的绘制实例来展示MDF模型的有效性，其中包括用我们自行搭建的BTF-MDF测量设备采集的真实世界的样本。
2. 提出了新的半透明材质模型，这里我们称之为准同质半透明材质。这个模型是用来表述真实世界中具有均匀分布的异质颗粒的半透明材料。同时这个方法也解决了从真实世界样本中获取模型数据的问题，并且能够将采样得到的半透明效果应用到任意物体上。在研究这个材质模型的过程中，我们利用了准同质半透明材料次表面散射的一个重要特性。其在局部，由于材质的异构性，次表面散射是各向不同的。而整体上，我们验证了光子在穿越有一定长度且均匀分布的异质材料时，其轨迹在统计意义上和穿越同质材料类似。基于这种观察，我们可以描述和测量准同质材质中全局光线传播，以及光线通过表面的细微结构传入、传出物体的情况。这个模型可以应用在任意形状的几何模型，并且可以很快速的绘制不需要做复杂的次表面光线传输的物理模拟。
3. 提出了基于“表观流形”的视觉模拟方法，用来描述时变表面质感。这个方法的一个重要的特点是只需要一个时间点上的样本数据就可以模拟时变表面质感的变化过程。“表观流形”方法基于这样的观察，即同一时刻的表面质感样本在空间上的变化包含了处于不同时间阶段的表面质感样本。通过对这些不同位置上的表面质感样本的合理组织可以揭示各点上表面质感样本的相对时间关系。然后根据这个关系来推导时变表面质感的空间上和时间上的演化过程，进而合成具有

高真实感的表面质感变化序列。文中还列举了其他基于对自然界表面质感的非线性变化的分析所引入的其他应用，包括在三维物体上模拟风化效果、真实世界中物体的风化过程的正/逆向模拟以及风化效果的置换。

基于数据驱动的建模思想利用模型解构、本征数据模型等方法多渠道地表达已知的表面质感内在机制，并协同使用多种不同方式的表面质感建模方法分别以最有效的方法处理模型解构后的子模型。这样的方式，结合个各种表面质感建模方法的优势，并成功地应用于几何细微结构建模、半透明材质建模和时变材质的建模。

**关键词：** 真实感绘制,双向纹理函数,着色模型, 双向反射分布函数, 次表面散射, 时变材质模型

## Data-Driven Appearance Modeling

Jiaping Wang (Computer Application Technology) Directed By Heung-Yeung Shum

In recent years, appearance modeling and rendering has been a hot topic in computer graphics research, and has also been a key for realistic rendering. Appearance modeling aims to model how light interacts with objects. A data-driven approach of appearance modeling is proposed in this dissertation. Additionally, modeling and rendering of mesostructures, translucent materials, and time-variant materials is addressed based on this approach.

Specifically, this dissertation proposes appearance models using a data-driven approach, including mesostructure models with full shading effects, quasi-homogeneous translucent materials and time-variant material models:

1. A new mesostructure representation, called a *mesostructure distance function* (MDF), is presented to describe the detailed geometric features of mesostructure which can be easily acquired in a BTF capturing process. The MDF tabulates the displacement from a reference frame where a ray first intersects the underlying meso-scale geometry as a function of ray direction and ray position along the reference plane. This method augments BTF rendering with the capability of handling non-uniform lighting and obtaining approximate mesoscale silhouettes. Our approach allows real-time rendering, handles complex, non-height-field mesostructure, requires that no additional geometry to be sent to the rasterizer other than the mesh triangles, is more compact than textured visibility representations used previously, and for the first time can be easily measured from physical samples. We demonstrate the efficiency of our algorithm on a variety of BTF data, including real data acquired using our BTF-MDF measurement system.
2. A new material model, for *quasi-homogenous* materials, is proposed for capturing and rendering of translucent materials with evenly-distributed heterogeneous elements. This method addresses the problem of acquiring materials from physical samples in a way that allows arbitrary geometry models to be rendered with these materials. In developing a material model with these attributes, we capitalize on a key observation about the subsurface scattering characteristics of quasi-homogeneous materials at different scales. Locally, the non-uniformity of these materials leads to inhomogeneous subsurface scattering. For subsurface scattering on a global scale, we show that a lengthy photon path through an even distribution of heterogeneous elements statistically resembles scattering in a homogeneous medium. This observation allows us to represent and measure the

global light transport within quasi-homogeneous materials as well as the transfer of light into and out of a material volume through surface mesostructures. This material model can be applied to geometric models of arbitrary shapes, and the resulting objects can be efficiently rendered without expensive subsurface light transport simulation.

3. A visual simulation technique called *appearance manifolds* is proposed for modeling the time-variant surface appearance of a material from data captured at a single instant in time. In modeling time-variant appearance, our method takes advantage of the key observation that concurrent variations in appearance over a surface represent different degrees of weathering. By reorganizing these various appearances in a manner that reveals their relative order with respect to weathering degree, our method infers spatial and temporal appearance properties of the material’s weathering process that can be used to convincingly generate its weathered appearance at different points in time. Results with natural non-linear reflectance variations are demonstrated in applications such as visual simulation of weathering on 3D models, increasing and decreasing the weathering of real objects, and material transfer with weathering effects.

The data-driven approach expresses the intrinsic mechanism of appearance generation in multiple ways, including model decomposition and intrinsic data model. The data-driven approach allows simultaneously use of multiple methods to handle the decomposed sub-models based on their characteristics. Advantages of different appearance models are integrated in this approach and are successfully applied in modeling mesostructure surfaces, translucent materials, and time-variant materials.

**Keywords:** Realistic rendering, Bidirectional texture functions, Reflectance and shading models, BRDF, Subsurface scattering, Time-variant material model

# 目 录

摘 要	I
目 录	V
图目录	VIII
表目录	XII
<b>第一章 绪论</b>	<b>1</b>
1.1 真实感图形学和表面质感建模	1
1.2 表面质感的物理学描述	3
1.2.1 表面交互过程	4
1.2.2 次表面交互过程	6
1.2.3 时变交互过程	8
1.3 表面质感的全光函数描述	8
1.3.1 不透明材质的全光函数描述	12
1.3.2 半透明材质的全光函数描述	13
1.3.3 时变材质的全光函数描述	14
1.4 表面质感的参数化解析表达	15
1.5 本文的贡献及组织	18
<b>第二章 基于数据驱动的建模和绘制</b>	<b>21</b>
2.1 基于图像建模的方式	21
2.2 参数化建模方式	23
2.3 基于数据驱动的建模方式	24
2.3.1 本征数据模型	26
2.4 表面质感建模实践	29

<b>第三章 表面质感的数据采集设备</b>	<b>33</b>
3.1 程控多功能光学平台	33
3.1.1 光学平台的基本构造	34
3.1.2 图像数据的处理	35
3.1.3 实验结果	36
3.2 线性光源平面反照度测定仪	36
3.2.1 光学原理	37
3.2.2 实验结果	38
<b>第四章 全效果几何细微结构模型</b>	<b>39</b>
4.1 几何细微结构模型及相关工作	41
4.2 几何细微结构深度函数	42
4.3 几何细微结构深度函数的获取	43
4.3.1 细微结构距离函数的数据采集	43
4.3.2 细微结构距离函数的数据处理	44
4.4 全效果几何细微结构的实时绘制	47
4.4.1 处理双向纹理函数绘制中的不均匀光照	47
4.4.2 判定双向纹理函数绘制中的细节轮廓可见性	48
4.4.3 基于硬件加速的实现细节	50
4.5 结果及讨论	51
4.6 本章小结	53
<b>第五章 准同质半透明材质模型</b>	<b>55</b>
5.1 半透明材质建模方式	57
5.1.1 物体模型	57
5.1.2 材质模型	57
5.2 准同质半透明材质的数学模型	58
5.3 准同质半透明材质模型的获取	60
5.3.1 表面细微结构入射函数	63
5.3.2 扩散近似模型的参数拟合	63
5.3.3 表面细微结构出射函数	65
5.3.4 局部反射函数	66
5.4 准同质半透明材质的绘制	66
5.5 实验结果	67
5.6 本章小结及讨论	71

<b>第六章 基于表观流形的时变表面质感建模</b>	<b>73</b>
6.1 现有的风化模拟技术及相关工作	74
6.2 表观流形	75
6.3 时变表面质感样本的分析	76
6.3.1 基于近邻图的分析过程	77
6.3.2 风化程度的空间分布	79
6.4 时变表面质感序列的合成	80
6.4.1 帧间一致性纹理合成算法	81
6.5 表观流形的应用及实验结果	84
6.5.1 三维物体表面的风化效果映射	85
6.5.2 风化过程的正向和逆向模拟	86
6.5.3 风化效果的置换	87
6.6 本章小结及讨论	89
<b>第七章 总结与展望</b>	<b>91</b>
<b>参考文献</b>	<b>93</b>
<b>致 谢</b>	<b>i</b>
<b>作者简介</b>	<b>ii</b>



# 图目录

1.1	真实世界中的物体外观	2
1.2	表面质感建模与绘制在计算机图形学中的位置	3
1.3	不同尺度上光线与物体表面的交互过程	4
1.4	由表面细微产生的各种视觉效果	5
1.5	几种典型的相函数形状	6
1.6	单次散射过程和多次散射过程	7
1.7	物体表面反射光线的几种不同情况	9
1.8	双向表面扩散反射分布函数	10
1.9	静态表面质感全光函数描述及其各种简化	11
1.10	BTF模型的光学机理	12
1.11	不同粗糙度的Blinn Phong模型的绘制效果	15
1.12	对偶极子(dipole)模型及其绘制结果	16
1.13	尘埃积累过程的参数化时变表面质感模型的绘制结果	17
2.1	表面质感建模的相关流程	21
2.2	基于图像建模方式的流程	22
2.3	参数化建模方式的流程	23
2.4	基于数据驱动建模方式的框架	25
2.5	表面质感样本空间模型的建模方式	27
2.6	基于样例的产生式模型的建模方式	28
2.7	细微结构距离函数模型的解构过程	29
2.8	准同构半透明材质模型的解构过程	30
2.9	基于表观流形时变材质模型的解构过程	31
3.1	多功能光学平台	33
3.2	图像数据的处理流程	34
3.3	标准色板和标准棋盘格	35
3.4	不同视点方向和光照方向下的样本外观图像	36

3.5	线性光源平面反照度测定仪 . . . . .	37
3.6	线性光源平面反照度测定仪的光学原理 . . . . .	37
3.7	线性光源平面反照度测定仪的绘制结果 . . . . .	38
4.1	全效果几何细微结构模型渲染结果和BTF渲染结果的比较 . . . . .	39
4.2	细微结构距离函数的含义 . . . . .	40
4.3	细微结构距离函数MDF的定义 . . . . .	42
4.4	双向纹理函数以及对应的细微结构距离函数(样本:花生盒子, 草编) . . . . .	43
4.5	细微结构距离函数MDF的采样位置 . . . . .	44
4.6	初始深度图像的分析过程 . . . . .	45
4.7	初始深度图像和融合后深度图像的比较(样本:草编) . . . . .	46
4.8	几个不同视点方向下的MDF图像(样本:花生) . . . . .	46
4.9	细微结构造成入射点在参考平面上的位置偏移 . . . . .	47
4.10	阴影判定计算的几何示意图 . . . . .	48
4.11	视点和光照方向的细节轮廓可见性 . . . . .	49
4.12	细微轮廓的可见性判定 . . . . .	49
4.13	单纯BTF绘制结果、BTF+MDF绘制结果和真实绘制结果的比较 . . . . .	52
4.14	BTF/MDF数据在不同的纹理平铺倍数下的绘制结果。 . . . . .	53
4.15	真实采样的BTF/MDF材质贴图表面的绘制结果。 . . . . .	54
4.16	合成BTF/MDF材质贴图表面的绘制结果。 . . . . .	54
4.17	带阴影和轮廓效果的BTF/MDF贴图表面的三个例子。 . . . . .	54
5.1	准同质半透明材质模型的实物示例 . . . . .	55
5.2	在准同质半透明材料中的光线散射情况。 . . . . .	59
5.3	准同质半透明材质模型数据捕获设备。 . . . . .	61
5.4	扩散方程近似模型的拟合结果。 . . . . .	64
5.5	侧向衰减距离定义以及恢复细微结构出射函数的有效区域。 . . . . .	65
5.6	准同质半透明材质模型采样时获取的原始数据 . . . . .	68
5.7	准同质半透明材质模型和蒙特卡罗物理模拟的比较 . . . . .	69
5.8	准同质半透明材质模型和真实物体照片的比较 . . . . .	69
5.9	海绵的背光绘制效果 . . . . .	70
5.10	海绵应用在bunny模型上绘制效果 . . . . .	70
5.11	米花糖应用在teapot模型上绘制效果 . . . . .	70
5.12	面包片的全局光照绘制效果 . . . . .	70
6.1	时变表面质感建模:样本以及合成结果 . . . . .	73
6.2	时变表面质感建模的基本流程 . . . . .	76

6.3	表观流形分析和非监督流形学习方法的比较 . . . . .	79
6.4	时变表面质感序列的合成 . . . . .	81
6.5	帧间一致性纹理合成 . . . . .	82
6.6	抖动初始解对合成结果的影响 . . . . .	84
6.7	时变表面质感实验中采集的样本 . . . . .	85
6.8	风化过程的正向和逆向模拟 . . . . .	86
6.9	风化过程的正/逆向模拟的交互系统 . . . . .	87
6.10	基于表观流形流形的合成结果和纹理线性插值的比较 . . . . .	88
6.11	香蕉皮的失水过程模拟 . . . . .	88
6.12	一片树叶的正/逆向风化模拟 . . . . .	89
6.13	风化效果的置换 . . . . .	89



# 表 目 录

4.1	细微结构距离函数MDF的硬件加速绘制伪代码 . . . . .	50
4.2	BTF/MDF数据的采样分辨率和数据大小 . . . . .	51
4.3	不同场景BTF/MDF的绘制帧率。 . . . .	52
5.4	准同质半透明材质模型数据采样步骤伪代码。 . . . .	62
5.5	准同质半透明材质模型采样得到的原始数据。 . . . .	62
5.6	准同质半透明材质模型数据采集系统的规格 . . . . .	67
5.7	测量的实验材质光线散射属性 . . . . .	67
6.8	多尺度纹理优化步骤的伪代码。 . . . .	83
6.9	时变表面质感实验中采集的样本的规格 . . . . .	84

# 第一章 绪论

## 1.1 真实感图形学和表面质感建模

计算机图形作为最前沿的媒体形式之一，承载了众多现代文明的产物如数字化艺术(Digital Art)、动画漫画、计算机游戏以及虚拟现实系统等，同时也增强了其他媒体表现力，如电影和电视等。计算机图形学，作为这一媒体形式的技术基奠，也在近年来得到蓬勃的发展。

计算机图形学是研究利用计算机来合成图像以及运动图像序列的科学。真实感图形学作为计算机图形学的一个活跃的分支，着重研究如何在计算机上合成和照片一样具有高度真实感的图像。

现实世界中，我们经常可以看到正午时分波光粼粼的湖面、夕阳下气势恢弘的古代宫殿遗迹、金碧辉煌的艺术馆大厅以及悠远的峡谷、深邃的洞窟。同时我们还可以看到闪闪发亮的金属器皿、温润通透的玉石雕像、晶莹炫目的水晶饰品以及粗糙的树干、锈蚀的旗杆。这些视觉效果是由于复杂的光照条件，光线在场景中复杂的传播过程和光线与物体发生的复杂交互过程所造成的。这三个因素也是真实感图形学主要研究的内容。其中，前两个因素取决于光源和物体在场景中的全局设定(如相对位置、形状等)，是真实感绘制的研究课题。第三个因素，光线与物体的交互过程，是场景中的物体本征属性，只同物体的物质构成及分布有关，和场景的全局设定无关，在真实感图形学中，我们将这个因素称为物体的**表面质感(Appearance)**。

图1.1<sup>1</sup>给出了一些真实世界中物体的例子。图1.1的第一行列举了几种不透明的物体，这些物体不同的表面几何细节影响了光线在物体表面的反射过程，使得有的看起来粗糙(b,c)，有的看起来细腻(a)，图1.1的第二行列举了几种透明和半透明的物体，这些物体的光学特性影响了光线在物体内部的传输过程，包括光线的折射和次表面散射过程，使得有的看起来透亮(d)，有的看起来温润(c,g)。图1.1的第三行列举了一些外观随时间发生了显著变化的物体。这里随时间发生变化的可以是光线反射过程(i,j)，也可以是光线在物体内部的传输过程(h)。

---

<sup>1</sup>图中照片源自Mayang图像数据库(<http://mayang.com/textures/>)

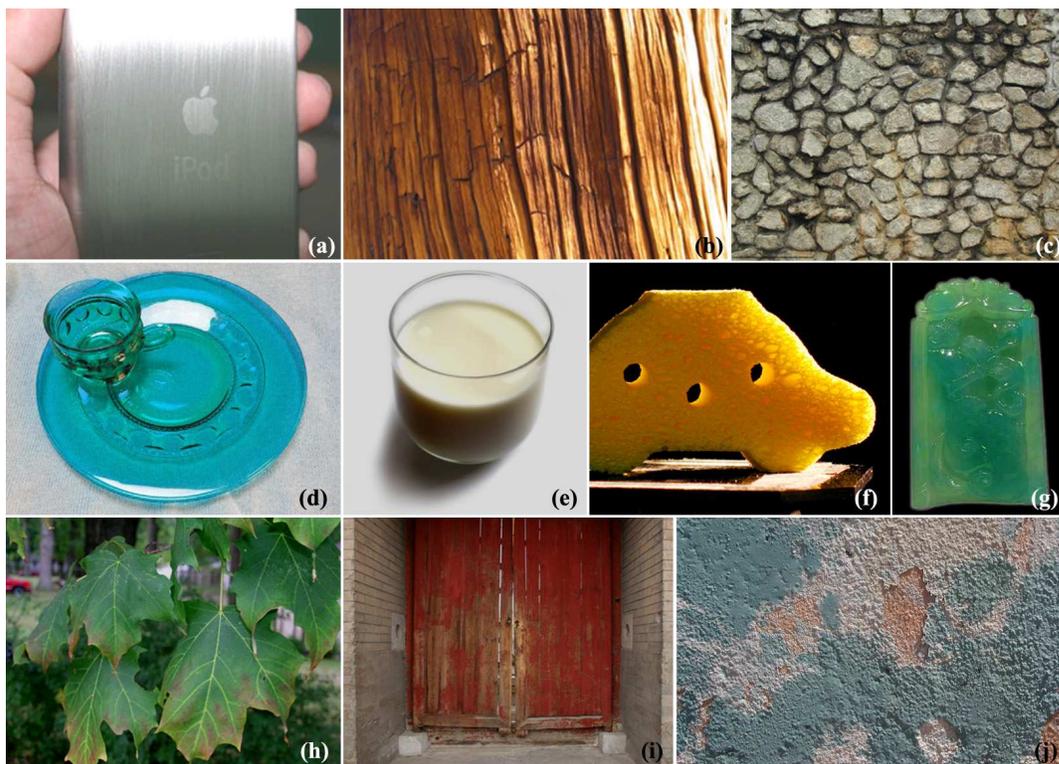


图 1.1: 真实世界中的物体外观

这里千变万化的表面质感，本质上是由物体表面及内部介质的物质及其分布决定，它决定了物体表面及内部介质在同光线发生交互时的行为。这里的物体表面本质上是指不同介质的边界面，可以是平面、曲面甚至是更为复杂的非二维流型曲面(如泡沫)；这里的介质抽象指影响光线传播的物质，可以是不透明的(如金属)、半透明的(如玉器)和透明的(如玻璃)，可以是单一物质构成(如纯净的石蜡)、均匀分布的多种物质组成(如海绵)或不均匀分布的多种物质组成(如矿石)；这里的光线是指入射光线，包括不同入射方向上的强度分布和不同入射位置上的强度分布；这里的交互行为是指对于特定的入射光线会有怎样的出射光线，当然出射光线也包括方向上和位置上的强度分布。如果不考虑物体表面及内部介质的物质及其分布随时间的变化，表面质感可以分成**表面交互过程**和**次表面交互过程**两类。前者主要指发生物体表面的光线反射过程和光线折射过程，表面质感主要由表面细微几何结构决定；后者主要指发生在物体内部的光线散射和衰减的过程，表面质感主要由物体内部物质的光学特性决定。

物体的外观随着时间发生的改变，本质上物体外观的改变是由于其物质构成发生了各种物理或化学变化而导致的，在本文中被统称为**风化(weathering)**过程。在大尺度上各处风化程度的不同是由物体的几何形状、外界环境等全局因素决定的，而在小尺度上特定风化阶段的外观特征则是由物体本身的材质构成以及特定的风化过程的机

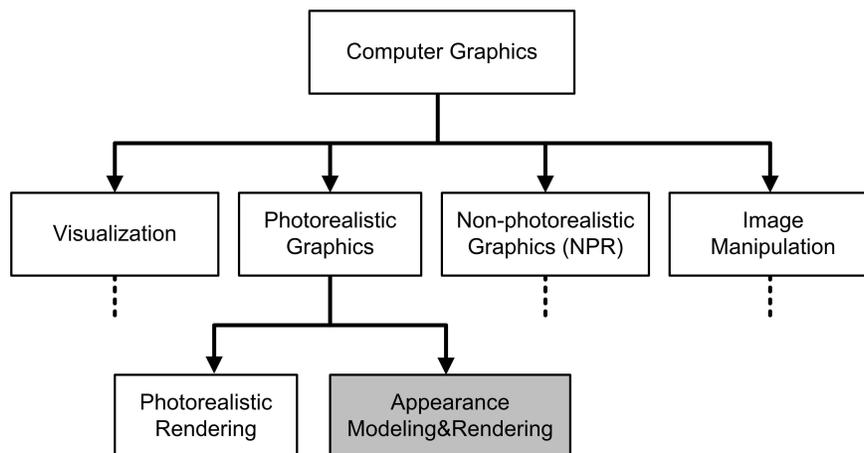


图 1.2: 表面质感建模与绘制在计算机图形学中的位置

理所决定的，这是材质所固有的属性。考虑物质构成随时间变化而导致的外观改变，我们把具有这种特征的物体外观称为**时变表面质感(time-variant appearance)**。随时间改变的可以是表面交互过程，我们称为时变表面交互过程；也可以是次表面交互过程，我们称为时变次表面交互过程。我们也将这两者统称为**时变交互过程**。

在真实感图形学中，表面质感建模与绘制主要研究如何表达物体的表面质感，并有效地绘制物体的表面质感。图1.2 给出表面质感建模与绘制在计算机图形学中的位置。表面质感建模的研究涉及到数学、物理、心理学及计算机科学等学科，以人类视觉认知为准则，描述自然界中各种物体同入射光的交互过程，建立相应的数学模型，并用计算机程序来实现。同表面质感建模密切相关的两个课题是表面质感模型的获取和表面质感模型的绘制。表面质感模型的获取是指从真实世界中的物体利用特定的光学仪器获取样本数据从而得到可以建立对应的表面质感模型的数据；其研究的目标是节省数据采集的时间、降低设备的成本以及对真实世界中各种不同材质的广泛通用性。表面质感模型的绘制即指对已知表面质感模型进行求值，给定入射光求得出射光；其研究的目标是尽可能加速求值过程，对各种光强描述形式(局部光照、全局光照等)的适应性以及对各种绘制框架的适应性(光线跟踪、辐射度、硬件光栅化流水线等)。表面质感模型的绘制和真实感绘制技术紧密相关，但有区别，从光线传播过程看，前者关注局部物体表面和入射光的交互过程，而后者则关注光源的分布以及光线在物体间的全局传播过程，如光照的表达、可见性的判定、光线和物体求交等。本文将专注于表面质感建模与绘制的研究，并同时讨论相关的模型采样和绘制问题。

## 1.2 表面质感的物理学描述

在这一节中，我们将详细讨论光线和介质交互过程的物理机制，包括表面交互

过程、次表面交互过程以及时变交互过程。这些光线交互过程的物理机制是表面质感建模的依据。它可以帮助我们分析特定表面质感现象，建立有效的模型。

### 1.2.1 表面交互过程

对于特定的物质构成，物体表面在微观尺度的局部都可以看成理想的镜面[Ashikmin et al., 2000]，光线将仅发生镜面反射和折射，如图1.3(a)所示，当光线以入射方向 $\omega_i$ 越过物体表面从一种介质传播到另一种介质时，将部分在 $\omega_o$ 方向上反射，部分在 $\omega'_o$ 方向上折射，并且有入射和出射方向和物体表面的法线方向是共面的：

$$\omega_i \cdot n = \omega_o \cdot n \quad \omega_i \times n = n \times \omega_o \quad \omega_i \times n = n \times \omega'_o \quad (1.1)$$

式中 $n$ 是入射点处的法线方向。在这个尺度上，菲涅耳方程[Jenkins and White, 1976]可以描述光线在这个理想的镜面上的反射和折射，对于非极化(unpolarized)的入射光光线出射能量 $I_r$ 与反射能量 $I_i$ 比为：

$$\frac{I_r}{I_i} = \frac{1}{2} (r_{\perp}^2 + r_{\parallel}^2) = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\frac{n_1}{\mu_1} \cos \theta - \frac{n_2}{\mu_2} \cos \theta'}{\frac{n_1}{\mu_1} \cos \theta + \frac{n_2}{\mu_2} \cos \theta'} \right)^2 + \left( \frac{\frac{n_1}{\mu_1} \cos \theta' - \frac{n_2}{\mu_2} \cos \theta}{\frac{n_1}{\mu_1} \cos \theta + \frac{n_2}{\mu_2} \cos \theta'} \right)^2 \right] \quad (1.2)$$

式1.2中 $\theta$ 为入射方向和反射方向同法线方向的夹角，两者是相等的。 $\theta'$ 为折射方向同法线方向的夹角，由Snell折射定律[Jenkins and White, 1976]有 $n_1 \cdot \sin \theta = n_2 \cdot \sin \theta'$ ； $n$ 和 $\mu$ 分别为电介系数(dielectric constant，即折射率)和导磁率(magnetic permeability)。由于自然界中大部分物质的磁介系数几乎都为1，这样我们可以将式1.2近似为：

$$F_r(\theta; \eta) = \frac{I_r}{I_i} = \frac{1}{2} (r_{\perp}^2 + r_{\parallel}^2) \cong \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\sin(\theta - \theta')}{\sin(\theta + \theta')} \right)^2 + \left( \frac{\tan(\theta - \theta')}{\tan(\theta + \theta')} \right)^2 \right] \quad (1.3)$$

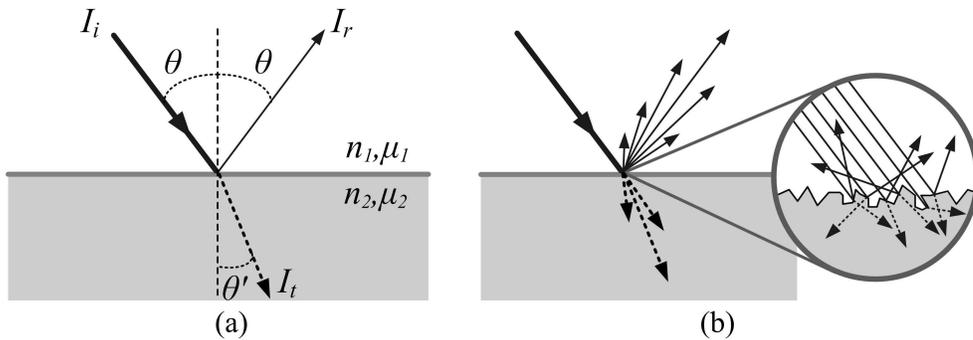


图 1.3: 不同尺度上光线与物体表面的交互过程

其中 $\eta = n_2/n_1$ 即相对折射率，上式也称为Fresnel反射衰减函数(Fresnel reflectance)，与之相对应的是Fresnel传输衰减函数(Fresnel transmission)，也就是折射光线的能量，可以根据能量守恒得到：

$$F_t(\theta; \eta) = \frac{I_t}{I_i} = 1 - F_r(\theta; \eta) \quad (1.4)$$

通常真实世界中的物体表面不是理想的镜面，而是凹凸不平的，如图1.3(b)所示，由于凹凸不平的表面所造成的法线方向的扰动，反射光线和折射光线将转向各处，并且不一定在入射方向和法线方向所构成的平面上。如果几何造型可以在这样的微观尺度上描述包含物体表面的几何微观结构，那么用菲涅耳方程描述光线在物体表面的交互过程就足够了。但现实情况是，几何造型不可能刻画到这样细致的程度，即使有这样细致的几何模型，绘制的开销也是十分昂贵的，从而呈现这些细致几何所带来的视觉效果也成为了表面质感建模的任务。在表面质感建模中，我们用细微结构(mesostructure)[Koenderink et al., 1996]来表示这些几何细节，细微结构是介于用几何网格表达的宏观结构(macro-structure)和用镜面微面表达的微观结构(micro-structure)之间的物体表面特性。宏观结构描述的是物体的形状，微观结构描述的是人肉眼无法辨别的微面元，而细微结构描述了肉眼可见的几何细节变化，并且这样细致程度的结构用几何网格模型建模的话代价太大。表面质感建模将在细微结构尺度上描述光线和物体表面交互的过程，这个过程不仅受表面物质的光学特性的影响，也取决于表面的细微几何结构。

图1.4是细微结构同光线交互的几种不同情形，其中有法线方向扰动造成的明暗变化(bump shading)；表面凹凸不平造成的遮挡包括光线方向的遮挡(self-shadow)和视线方向的遮挡(masking)；表面的相对凹陷使得光线可能被多个面反射后才出射(inter-reflection)。物体表面还有很多光学特性的变化，如反照率(albedo)的分布以及各向异性的BRDF，如图1.1的(a)。表面光学特性的变化也会和几何细节交织在一起，例如图1.1的(c)，展现出更为复杂的视觉效果。这些特性通常指不透明的物体表面，他们的相互作用仅限于物体表面的局部区域，不依赖于物体的宏观结构。而对于透明物体，折射光线在穿越物体表面后在物体内部继续传播，光线沿着直线传播，能量呈指

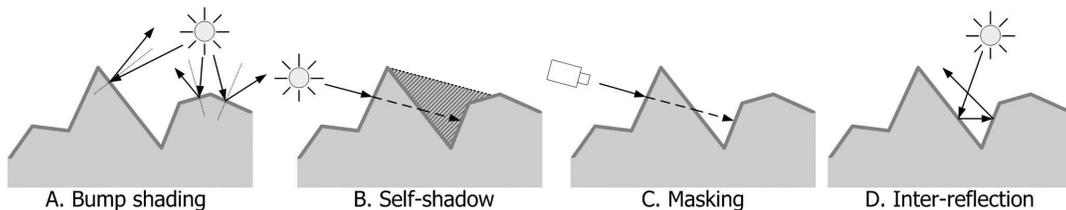


图 1.4: 由表面细微产生的各种视觉效果

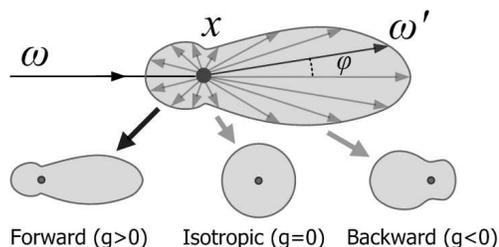


图 1.5: 几种典型的相函数形状

数衰减，直到碰到下一个介质边界再一次发生折射。这个交互过程涉及到物体宏观几何形状。

## 1.2.2 次表面交互过程

入射光线跨越物体边界发生折射后，将进一步在物体内部传播。光线在物体内部传播的过程中，能量会不断地被损耗，并在遇到异质粒子时发生散射(改变传播方向)，最后逸出物体表面或损耗殆尽。光线在物体内部传输使得光强可以透过物体，呈现如背光(back-lighting)如图1.1(f)，色彩浸润(color bleeding)如图1.1 (g)以及物体的漫反射分量等效果。

光线在物体内部的传播过程可以用辐射度传输方程(radiative transport equation) [Ishimaru, 1978a] [Ishimaru, 1978b] 来描述：

$$(\omega \cdot \nabla)\phi_d(x, \omega) = -\sigma_t\phi_d(x, \omega) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} p(\omega, \omega')\phi_d(x, \omega)d\omega' + \phi_i(x, \omega) + \phi_s(x, \omega) \quad (1.5)$$

其中， $\sigma_t$ 损耗系数是同具体物质相关的。 $\phi_s$ 是物体自发光的光场，通常认为是0。 $\phi_i$ 是入射光在物体内部的分布，被称为弱入射光强(reduced incident intensity)。 $\phi_d$ 是入射光在物体内部发生散射传输后形成的光场分布，被称为漫射光强(diffuse intensity)。这里的位置 $x$ 指的是包括物体内部的三维空间，而非通常所指的二维平面或物体表面的二维流形。式1.5中的函数 $p(\omega, \omega')$ 是相函数(phase function)它描述了光线在发生一次散射时散射光线沿各个方向的出射能量分布，也可以理解成一个光子在发生一次散射的时候它的运动方向朝各个方向发生偏转的概率。在图1.5中给出了几个相函数的例子，这里假设在垂直于 $\omega$ 的方向上散射光线在各个方向上的分布是对称的，从而使相函数仅由和 $\omega$ 和 $\omega'$ 的夹角(相对偏转角)决定， $p(\omega, \omega') = p(\omega \cdot \omega') = p(\cos \varphi)$ 。图1.5 中的 $g$ 成为散射角主余弦(mean cosine of scattering angle)，是相对偏转角的余弦的平均值：

$$g = \int_0^{2\pi} \cos \theta \cdot p(\cos \theta)d \cos \theta \quad (1.6)$$

它表明了相函数的类型(如图1.5下部所示):  $g > 0$ 的相函数为前向性的, 较多光线在散射后继续向前传播;  $g = 0$ 的相函数为各向同性的, 散射后的光线方向分布与散射前的光线方向无关;  $g < 0$ 的相函数为后向性的, 较多光线在散射后朝反方向继续传播。相函数常用的表示方式是一个近似的参数化模型, 被称为Henyey-Greenstein 相函数[Henyey and Greenstein, 1993]。

$$p_{HG}(\omega, \omega') = \frac{1}{4} \frac{1 - g^2}{(1 - 2g \cdot \omega\omega' + g^2)^{3/2}} \quad (1.7)$$

由于次表面交互过程的存在, 出射光线将不仅来自出射点处的入射光线, 更多的是来自周围甚至是物体上更远的其他位置。这样出射光线的能量不仅取决于出射点处物体的光学特性也取决于该点周围物质的光学特性, 这样就会有色彩浸润效果(color bleeding), 也同物体其他位置入射光强有关, 这样就会有背光效果(back-lighting)。辐射度传输方程(式1.5)描述了光线在物体内部的传播情况, 但是这个微分方程没有解析解。我们可以根据这个方程利用蒙特卡罗方法(Monte Carlo simulation)[Pharr and Hanrahan, 2000]来模拟这个光子的物理传播过程, 但是这种方法计算量很大无法实现快速计算。为了实现快速绘制我们需要更显式更易于计算的模型。

根据光线在内部传播过程中历经的光线散射事件的次数, 我们可以将次表面交互过程分成两类: 单次散射过程(single scattering)和多次散射过程(multiple scattering)。前者仅在物体内部发生一次散射事件便逸出物体表面, 这个过程可以根据几何关系确定传播的轨迹就可以确定出射光线的方向, 线积分沿轨迹上的光线衰减就可以确定出射光线强度。后者通常是光线在物体中发射多次散射后, 最终逸出物体表面, 类似于粒子的随机游走过程, 很难用几何轨迹来简单描述。当光线的次表面交互过程发生在光学稠密(optically thick)的材质[Stam, 1995](如牛奶)中时, 光子将在物体内部发生成千上万次的散射事件。在这样高度散射的传播过程中, 物体各处的光线传输将变得近似各向同性, 即使在相函数有很强的极性或者入射光线只有单一的方向的情况下仍旧成立。在这种情况下, 我们可以用辐射度传输方程(式1.5)的二阶球面调和

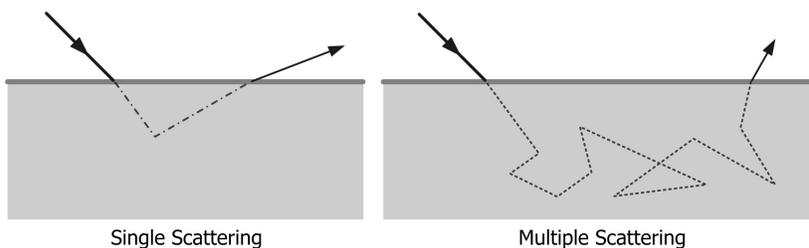


图 1.6: 单次散射过程和多次散射过程

展开来近似原方程[Ishimaru, 1978a][Stam, 1995]:

$$\nabla \cdot \left( \frac{\nabla \phi_d^0(x)}{\sigma_s(1-g/2) + \sigma_a} \right) - \sigma_a \phi_d^0(x) + S(x) + \sigma_a \phi_s^0(x) = 0 \quad (1.8)$$

其中 $\sigma_a$ 是吸收系数,  $\sigma_s$ 是散射系数, 它们之和就是损耗系数 $\sigma_t$ 。对于各处异质的材质这里的 $\sigma_a$ 和 $\sigma_s$ 都是 $x$ 的空间函数。函数 $S$ 表示入射光场的球面调和展开项:

$$S(x) = \sigma_t \phi_i^0(x) - \frac{\sigma_s}{\sigma_s(1-g/2) + \sigma_a} \nabla \cdot \phi_i^1(x) \quad (1.9)$$

对于半透明物体, 方程1.8定义在物体体内部, 边界条件定义在物体表面的二维流形上:

$$\phi_d^0(x) + 2\kappa(x) \frac{\partial}{\partial n} \phi_d^0(x) + 2 \frac{\sigma_s}{\sigma_s(1-g/2) + \sigma_a} n \cdot \phi_i^1(x) = 0 \quad (1.10)$$

其中 $\frac{\partial}{\partial n}$ 表示沿法向量方向求导, 在上面的式子中法向量是朝外的。方程1.8属于微分方程中的扩散方程, 故而这个近似形式被称为扩散方程近似(Diffusion Approximation)[Ishimaru, 1978a]。这个方程没有解析解, 但是可以用有限元或有限差分等方法进行数值求解[Haber et al., 2005]。这样的解法会比直接对辐射度传输方程做蒙特卡罗模拟要快很多。

### 1.2.3 时变交互过程

时变过程可以是表面几何细微结构随时间的变化, 如土墙的剥落, 图1.1中的(j); 也可以是光学特性随时间的变化, 如油漆的褪色, 图1.1中的(i)。发生时变的材质可以是不透明的物体, 也可以是透明、半透明的物体, 甚至包含透明程度的变化, 如树叶枯黄的过程, 如图1.1中的(h)。时变过程可以看成是静态光线交互过程(包括表面交互过程或次表面交互过程)的时间函数。在任一时间点上, 其光线交互过程的物理机制和静态光线交互过程完全相同。物体表面的细微几何结构和物质构成的光学特性随时间发生的逐渐变化是由各种各样不同的物理变化或化学变化所驱动的, 并且各个过程通常比较复杂, 目前尚没有统一的模型。时变表面质感的研究主要是为了重现物体表面外观的时变过程, 而不是研究其时变过程的机理, 虽然有的时候这是一种研究的途径。

## 1.3 表面质感的全光函数描述

上一节中, 我们讨论了光线与物体的交互过程, 包括发生在物体的表面的表面交互过程, 也包括发生在物体的内部的次表面交互过程。我们根据这两个过程对物体外观的所起作用的不同, 将物体分成三类:

1. 不透明物体(opaque materials), 光线仅在表面发生反射(图1.7a), 没有显著的光线进入物体内部, 比如金属, 陶瓷等。这类物体的外观主要由表面交互过程决定。
2. 半透明物体(translucent materials), 光线在表面同时发生反射和折射, 进入物体内部的光线在传播路径上不断发生散射而改变传播方向, 最后逸出(图1.7b), 比如牛奶, 玉石等。这类物体的外观主要由次表面交互过程决定。
3. 透明物体(transparent materials), 光线在表面同时发生反射和折射, 进入物体内部的光线不改变传播方向, 只有在遇到介质表面才再一次发生射和折射(图1.7c), 如玻璃, 钻石等。这类物体的外观由表面交互过程和次表面交互过程共同决定。

本文的研究集中在不透明物体和半透明物体的表面质感建模和绘制, 对于透明物体的绘制主要在于研究光线同物体宏观几何形状的快速求交, 一般属于真实感绘制的研究范畴。

如果我们忽略光线交互过程的物理机制, 从另一个角度看, 我们可以将表面质感看成是一个将入射光映射为出射光的系统。如果我们用定义在表面上的全光函数(Plenoptic Function) [Landy and Movshon, 1991] 来描述入射光场 $\phi_i$ 和出射光场 $\phi_o$ 的话, 那么表面质感建模就是为特定的材质建立两者之间的映射关系 $\mathbb{F}$ :

$$\mathbb{F} : \phi_i(x, \omega, \lambda, t) \rightarrow \phi_o(x, \omega, \lambda, t) \quad (1.11)$$

在计算机图形学中, 我们用色彩系统来近似不同波长的光线所带来的颜色的不同, 所以这里我们忽略波长的不同, 只考虑一个色彩通道 $c$ 上的光场映射关系, 上式将简化为:

$$\mathbb{F}_c : \phi_i(x, \omega, t) \rightarrow \phi_o(x, \omega, t) \quad (1.12)$$

利用光强的线性可叠加性和无后效性(忽略光线传播的时间), 我们用时变双向散射反

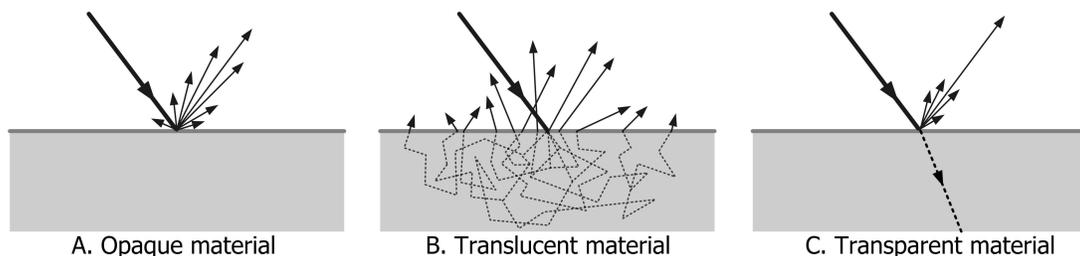


图 1.7: 物体表面反射光线的几种不同情况



图 1.8: 双向表面扩散反射分布函数

射分布函数 $\mathcal{R}$ 来简化描述上式的映射关系：

$$\mathcal{R}(x_o, \omega_o, x_i, \omega_i, t) = \frac{d\phi_o(x_o, \omega_o, t)}{d\phi_i(x_i, \omega_i, t)} \quad (1.13)$$

函数 $\mathcal{R}$ 描述了在特定时刻 $t$ ，特定位置 $x_i$ 和入射方向 $\omega_i$ 的光强能够传输到特定位置 $x_o$ 和出射方向 $\omega_o$ 的光强。对于静态的材质，我们可以进一步省略时间 $t$ 这个参数，将上式简化为：

$$\mathcal{S}(x_o, \omega_o, x_i, \omega_i) = \left. \frac{d\phi_o(x_o, \omega_o, t)}{d\phi_i(x_i, \omega_i, t)} \right|_{t=0} \quad (1.14)$$

上式中的8维的 $\mathcal{S}$ 函数就是双向表面扩散反射分布函数(Bidirectional Surface Scattering Reflectance Distribution Function, BSSRDF) [Nicodemus et al., 1977]，如图1.8它描述了从特定位置 $x_i$ 沿特定方向入射 $\omega_i$ 的单位光强在特定位置 $x_o$ 上沿特定方向 $\omega_o$ 出射的量，BSSRDF函数描述了完整的表面质感光学特性。这个模型在理论上可以直接采样和绘制。但是实际上由于这个函数维度太高，一个可用的模型需要存储几个TB的数据，采样数据需要几周甚至更长的时间，使得这样的做法变得十分低效和不切实际。在表面质感建模的研究中，我们往往通过对这个模型的合理简化，提出更低维的模型甚至解析模型，来实现对复杂物体表面质感的获取和快速绘制。图1.9<sup>2</sup>给出了BSSRDF的各种简化模型及其之间的关系图，从上到下是逐步简化的关系。左边部分主要针对不透明的材质，主要考虑细微结构的复杂程度以及反射特性的复杂程度；右边部分主要针对半透明的材质，主要考虑散射特性的复杂程度以及空间分布的复杂程度。

<sup>2</sup>此图修改自Pat Hanrahan教授的讲义(<http://graphics.stanford.edu/courses/cs448c-00-fall/notes/>) ‘Appearance Models for Computer Graphics and Vision’

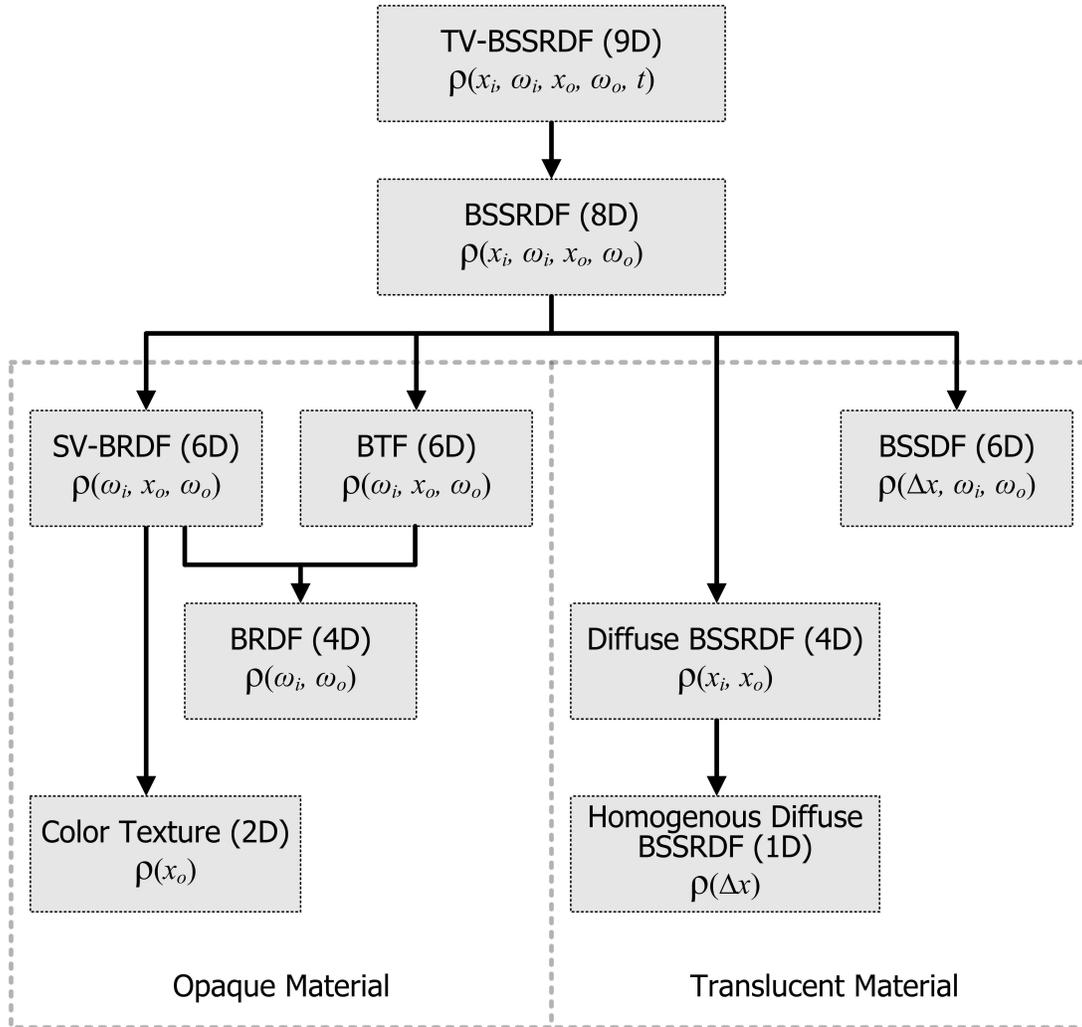


图 1.9: 静态表面质感全光函数描述及其各种简化

### 1.3.1 不透明材质的全光函数描述

表面变化的BRDF(SV-BRDF)在BSSRDF基础上假设物体表面平整和不透明材质，独立记录表面各点在不同视线和光线方向下的反射率:

$$\mathcal{S}(x_o, \omega_o, x_i, \omega_i) = \delta(\|x_i - x_o\|) \rho_{SVBRDF}(x_o, \omega_o, \omega_i) \quad (1.15)$$

它描述了表面各点反射特性的变化，忽略了细微结构的几何变化带来视觉效果和次表面散射效果。式中 $\delta(\cdot)$ 是单位冲击函数，下同。

双向纹理函数(BTF)[Dana et al., 1999]忽略了入射光线的空间分布的差异，假设入射线各点相同，从而省略了入射位置 $x_i$ 。描述了各点随不同视线和光线方向下的反射率，记录了细微结构的几何变化带来视觉效果和局部的次表面散射以及材质的表面变化。

$$\mathcal{S}(x_o, \omega_o, x_i, \omega_i) = \delta(\|x_i - x_o\|) \rho_{BTF}(x_o, \omega_o, \omega_i) \quad (1.16)$$

形式上，BTF和SV-BRDF都是6维，并且参数的含义都相同，但是本质上他们描述了不同结构的材质。如图1.10所示，BTF描述的是具有表面细微结构的材质，但是位置参数定义在一个虚拟的参照平面(reference plane)上，给定光照和视线方向，入射点 $x_i$ 和出射点 $x_o$ 通常不是同一个点(而SV-BRDF始终假设 $x_i = x_o$ )，虽然实质上这个反射仍旧发生在一个点上(图中的 $x_s$ )，但是由于BTF数据中没有关于细微结构显式几何信息，这个点是无法直接求得的。

双向反射分布函数(BRDF)[Nicodemus et al., 1977]可以理解成SV-BRDF和BTF忽略了表面变化，也可以理解成BSSDF(Bidirectional Subsurface Scattering Distribution Function)在不透明表面上的简化( $\Delta x \equiv 0$ )，它记录特定点上随视线和光线方向变化反射率。

$$\mathcal{S}(x_o, \omega_o, x_i, \omega_i) = \delta(\|x_i - x_o\|) \rho_{BRDF}(\omega_i, \omega_o) \quad (1.17)$$

它表达了更小尺度的细微结构(micro-structure)，这些结构的尺寸小于人眼可以辨析的

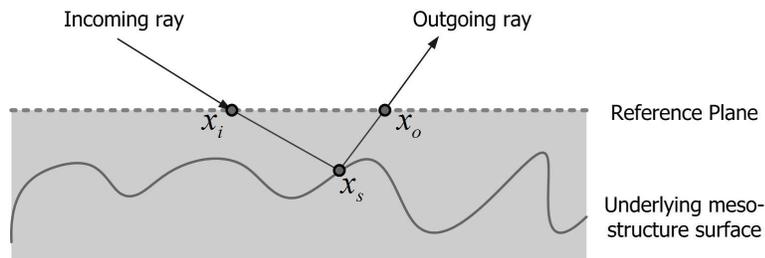


图 1.10: BTF模型的光学机理

程度，其效果主要体现为漫反射的强度和光洁程度(高光)等。有些物体的这种细微结构在微观上呈现一些方向性的规则排列，则会体现各向异性的反射特性，如粗粒度抛光的金属表面，图1.1中的(a)。

**二维彩色纹理(Color Texture)**也是SVBRDF的进一步简化，假定物体表面是完全漫反射的，从而忽略了出射光线方向 $\omega_o$ 和入射光线方向 $\omega_i$ ：

$$\mathcal{S}(x_o, \omega_o, x_i, \omega_i) = \delta(\|x_i - x_o\|) \rho_{\text{Texture}}(x_o) \quad (1.18)$$

二维彩色纹理描述了漫反射材质的反照率在空间上的变化。

### 1.3.2 半透明材质的全光函数描述

**BSSDF(Bidirectional Subsurface Scattering Distribution Function)**在BSSRDF基础上假设各点材质相同(Homogenous)，它记录了次表面散射随光线传播相对距离变化的衰减情况，忽略了表面变化并假设光线传播各向同性。

$$\mathcal{S}(x_o, \omega_o, x_i, \omega_i) = \rho_{\text{BSSDF}}(\|x_i - x_o\|, \omega_i, \omega_o) \quad (1.19)$$

**Diffuse BSSRDF**[Goesele et al., 2004][Peers et al., 2006]，将BSSRDF函数分解成物体表面点间的传输函数 $\rho_{\text{rd}}$ 和Fresnel 衰减项的乘积：

$$\mathcal{S}(x_o, \omega_o, x_i, \omega_i) = \frac{1}{\pi} F_t(\theta_i; \eta) \rho_{\text{rd}}(x_i, x_o) F_t(\theta_o; \eta) \quad (1.20)$$

式中 $\eta$ 是相对折射率，这里认为是常数； $\theta_{i/o}$ 是 $\omega_{i/o}$ 与法线方向的夹角； $F_t$ 函数是Fresnel 传输衰减函数(Fresnel transmission)，即式1.4。这个模型可以很有效地描述光学稠密的半透明材质，并且允许各处变化的物质分布(heterogeneous)。其中 $\rho_{\text{rd}}$ 函数描述了由 $x_i$ 处入射的单位光强经由光子扩散过程之后从 $x_o$ 出逸出的强度。

**Homogeneous Diffuse BSSRDF**[Jensen et al., 2001]，在均质物体的假设下进一步简化Diffuse BSSRDF表达，认为光线传输的衰减仅跟出射点 $x_o$ 和入射点 $x_i$ 的相对距离有关：

$$\mathcal{S}(x_o, \omega_o, x_i, \omega_i) = \frac{1}{\pi} F_t(\theta_i; \eta) \rho_{\text{Homogeneous}}(\Delta x) F_t(\theta_o; \eta) \quad (1.21)$$

其中， $\Delta x = \|x_i - x_o\|$ 。

从上面的演化可以看出，静态表面质感中主要含有两类信息，几何信息和材质信息。SVBRDF和BSSDF方向忽略了表面几何细节，而认为表面是平的，法线方向都是一致朝上的，这样这些高维函数所表达的材质信息就变得显式而具有物理意义，使得参数化变得可能；但是忽略细微结构的几何细节很大程度上限制了其表达能力和绘制效果。BTF模型保留了细微结构的几何细节，而具有很强的表达能力，但是由于其中隐式的几何信息和材质信息结合在一起，使得进一步的简化变的很困难。而次表面散射模型，对于均质物体对偶极子模型给出了非常紧凑的表达并具有很高的计算有效性，而对于异质物体仍旧是一个尚未解决的问题。

### 1.3.3 时变材质的全光函数描述

时变表面质感就是随时间变化的表面质感(式1.13)。如果在上两节所讨论的静态表面质感表达的函数中引入时间变量 $t$ ，那么时变表面质感也具有类似静态表面质感的模型演化图。时变表面质感的建模和获取是近几年来刚刚为大家所关注的课题。例如[Georghiadis et al., 2005][Lu et al., 2006]提出的材质历史(Material History)模型，在二维彩色纹理的表达(式1.18)中，引入时间变量 $t$ ：

$$\mathcal{R}(x_o, \omega_o, x_i, \omega_i, t) = \delta(\|x_i - x_o\|) \rho_{MaterialHistory}(x_o, t) \quad (1.22)$$

作者通过固定视点的相机连续捕获物体外观图像来建立时变彩色纹理模型。

[Gu et al., 2006]用多视点多光照的高速外观图像采集设备，获取了样本的SVBRDF时间序列，建立了TVSVBRDF (time-variant spatial-variant BRDF)模型：

$$\mathcal{R}(x_o, \omega_o, x_i, \omega_i, t) = \delta(\|x_i - x_o\|) \rho_{TVSVBRDF}(x_o, \omega_o, \omega_i, t) \quad (1.23)$$

这类模型可以获得真实的物体表面质感以及随时间的变化过程，主要的问题就是获取时间序列是一个很耗时的过程，尤其是对于变化缓慢的时变过程，并且这类方法要求每帧图像是严格逐像素对齐的，需要较高的实验条件。

## 1.4 表面质感的参数化解析表达

全光函数描述给出了各种表面质感的基本模型，这些基本模型以黑箱的方式描述了表面质感。对于一部分类型的表面质感，我们可以基于物理学原理或经验性的知识建立显式的模型，将全光函数表达描述为参数化解析公式。解析表达只要若干个参数就可以建立，模型简洁，但是解析表达不够通用，还有很多表面质感无法用解析的形式来表达。下面我们列举几个典型的表面质感参数化表达。

### 参数化的BRDF模型

BRDF函数(式1.17)是关于方向的分布函数，相对比较规律。[Phong, 1975] 基于对物体反射情况的现实观察，建立了BRDF函数的经验模型：**Phong模型**。之后，很多研究工作根据实际材质的特性或对细微结构的理论假设，提出了很多BRDF函数的解析形式如**Blinn Phong模型**[Blinn, 1977]、**Cook-Torrance模型**[Cook and Torrance, 1982]、**Ward模型**[Ward, 1992] 等。BRDF的参数化表达通常具有以下的形式：

$$\rho_{BRDF}(\omega_i, \omega_o) = k_d + k_s \psi(\omega_i, \omega_o; r) \quad (1.24)$$

表达分成漫反射项和镜面反射项。 $k_d$ 为漫反射系数， $k_s$ 为镜面反射系数，解析函数 $\psi$ 描述了镜面反射项的方向分布，这个函数通常是以理想镜面方向为尖峰的球面函数，故而被成为球面突起函数(lobe)。这个函数通常有一个控制球面突起尖锐程度的参数 $r$ ，这个参数反应了物体外表的粗糙程度。

参数化的BRDF模型在各种绘制系统中又被成为光照模型(lightning model)。由于这个表达涉及的数据量少，计算简便，被广泛应用于现实的绘制系统中。图1.11<sup>3</sup>展示了粗糙呈度从小到大的参数化BRDF模型的绘制效果(Blinn Phong模型)。

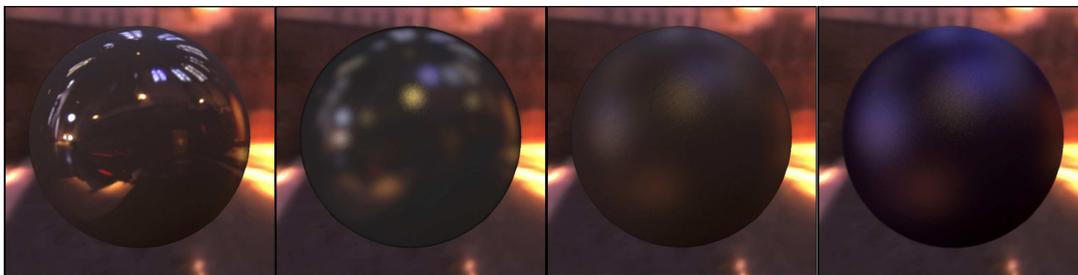


图 1.11: 不同粗糙度的Blinn Phong模型的绘制效果

<sup>3</sup>图中绘制结果摘自[Ngan et al., 2005]的附录

## 参数化的Homogeneous Diffuse BSSRDF模型

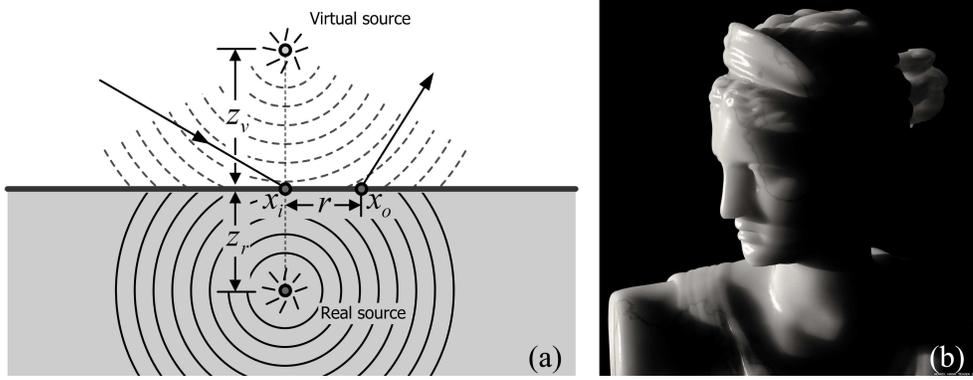


图 1.12: 对偶极子(dipole)模型及其绘制结果

Homogeneous Diffuse BSSRDF模型1.21将光线在均质半透明物体中的传播表达为物体表面点关于相对距离的衰减。在[Jensen et al., 2001]中, 给出了这一表达的近似解析形式。这个解析形式是扩散方程(式1.8) 在一个无限大的均质(homogeneous)半平面上的得到的近似解析解[Jensen et al., 2001][Jensen and Buhler, 2002], 其具体形式如下:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{Homogeneous}}(\Delta x) &= R_{\text{dipole}}(r) \\ &= \frac{\sigma_s}{4\pi\sigma'_t} \left[ \left( \sigma_{tr} + \frac{1}{d_r} \right) \frac{z_r \cdot e^{-\sigma_{tr}d_r}}{d_r^2} + \left( \sigma_{tr} + \frac{1}{d_v} \right) \frac{z_v \cdot e^{-\sigma_{tr}d_v}}{d_v^2} \right] \quad (1.25) \\ &\begin{cases} d_r = \sqrt{z_r^2 + r^2} \\ d_v = \sqrt{z_v^2 + r^2} \end{cases} \quad \begin{cases} z_r = 1/\sigma'_t \\ z_v = (3 + 4A)/3\sigma'_t \end{cases} \quad A = \frac{1 + F_{dr}}{1 - F_{dr}} \end{aligned}$$

其中 $\sigma_{tr} = \sqrt{3\sigma_a\sigma'_t}$ 是有效损耗系数(effective extinction coefficient)[Jensen et al., 2001]。 $\sigma'_s$ 和 $\sigma'_t$ 是弱散射系数和弱损耗系数, 分别为 $\sigma'_s = (1 - g)\sigma_s$ ,  $\sigma'_t = (1 - g)\sigma_s + \sigma_a$ 。式1.25中的 $F_{dr}$ 是平均Fresnel漫反射因子(average diffuse Fresnel reflectance):

$$F_{dr} = \int_{2\pi} F_r(\eta, n \cdot \omega)(n \cdot \omega) d\omega \quad (1.26)$$

在[Egan and Hilgeman, 1979]中, 给出了上式的近似表达:

$$F_{dr} = \frac{-1.440}{\eta^2} + \frac{0.710}{\eta} + 0.668 + 0.0636\eta \quad (1.27)$$

图1.12(a)给出了这个模型的一个形象的解释。在 $x_i$ 射入物体的光线对物体表面的贡献等价于两个点光源对物体表面的贡献之和。一个点光源位于 $x_i$ 点正上方的 $z_v$ 处, 另一个位于正下方 $z_r$ 处。对于表面上的任一 $x_o$ 点, 通过 $x_i$ 点到 $x_o$ 点在物体表面的直线距

离 $r$ 来计算两个虚拟点光源到 $x_o$ 点的贡献。因此,在很多文献中,这个模型也称被为对偶极子模型(dipole)[G. Eason and Turnbull., 1978][T. J. Farell and B.Wilson., 1992]。利用Dipole模型,对于物体表面的每一点就可以仅按照距离来计算其对周围区域的贡献。对偶极子模型对辐射度传输方程的近似仅限于均质的物体,即其中的光学属性 $\sigma_s, \sigma_a$ 等都是常数,不能是空间位置的函数。图1.12(b)是基于该模型的绘制结果<sup>4</sup>。

### 参数化的TVSVBRDF模型

时变SVBRDF模型(式1.23)描述了空间各处反射特性随时间的改变,针对尘埃积累的过程,[Hsu and Wong, 1995]给出了时变SVBRDF模型解析表达。他们根据物体表面的朝向和可见性因素,建立物体表面尘埃积累厚度的随时间的改变,然后用[Blinn, 1982]的尘埃反射模型来建立尘埃积累的时变表面质感:

$$\rho_{TVSVBRDF}(x_o, \omega_o, \omega_i, t) = \frac{\alpha \varphi(\tau)}{n \cdot \omega_i + n \cdot \omega_o} \left( 1 - e^{-\pi \eta p^2 \left( \frac{1}{n \cdot \omega_i} + \frac{1}{n \cdot \omega_o} \right) \cdot T(x_o, t)} \right) \quad (1.28)$$

其中, $n$ 为法向量, $\alpha$ 为尘埃颗粒的反照率(albedo), $p$ 为尘埃的直径, $\eta$ 为尘埃在空间中分布的密度。 $\varphi(\tau)$ 是尘埃颗粒相函数,这里 $\tau$ 是指入射方向 $\omega_i$ 和出射方向 $\omega_o$ 之间的夹角。函数 $T(x_o, t)$ 表示灰尘厚度在物体表面的空间分布以及随时间的改变。图1.13<sup>5</sup>是两个尘埃积累物体在不同程度的绘制效果。

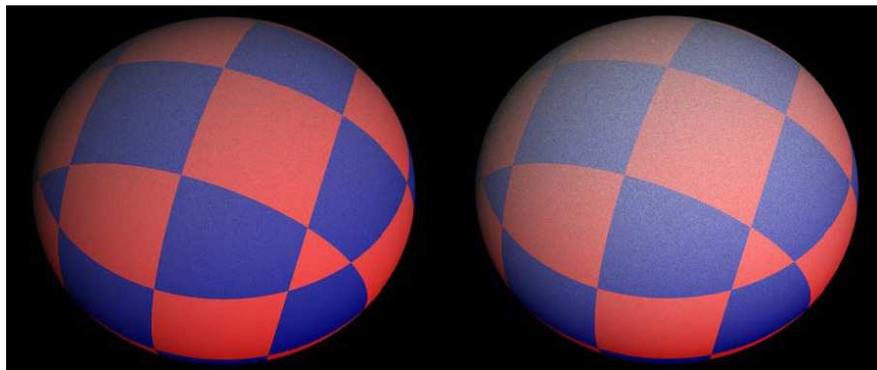


图 1.13: 尘埃积累过程的参数化时变表面质感模型的绘制结果

<sup>4</sup>绘制结果源自Henrik Wann Jensen的个人主页<http://graphics.ucsd.edu/~henrik>

<sup>5</sup>绘制结果源自[Hsu and Wong, 1995]

## 1.5 本文的贡献及组织

表面质感模型是对特定类型表面质感现象的抽象，用一致的形式来表示同类型的各个表面质感实例。通常我们希望表面质感模型本身比较简洁，不需要涉及太多的存储和计算；也希望建立模型的过程尽量简便而模型又能涵盖范围较广的表面质感实例。从表面质感建模和绘制的整个流水线来看，我们还希望模型可以从较少的采样数据中获取，并且采样数据的过程尽量简便廉价；希望表面质感的绘制能够支持各种真实感绘制的框架，处理各种形式的光照，并且尽量较少绘制过程中时间和存储的开销。我们可以归纳这些要求，将对一个表面质感模型的评价准则总结如下：

- **完备性**：完备性是指表面质感模型的能力，包括能够表达的视觉效果种类，能够描述的真实世界材质的范围，以及能够处理的光照形式等。
- **有效性**：有效性是指表面质感模型的开销，包括模型数据的存储大小，以及模型求值的计算量等。
- **易用性**：易用性是指获取和绘制表面质感模型过程的难易程度，包括数据获取的难易程度，是否需要完整采样，对各种真实感绘制流水线的支持程度等。

以上几点是表面质感建模与绘制的研究的主要目标。为了实现这些目标，表面质感模型通常建立在对复杂的表面质感现象的分析研究的基础上，是通过对特定类型的表面质感的物理成因、光学特性等方面的分析，并将这些先验知识用表面质感模型来表达。传统的表面质感通常把这些先验知识表达为显式的参数化解析公式或规则，但是由于受到解析方式表达能力的限制，很难得到高真实感的效果，并且很多表面质感不具有解析表达。本文提出了基于数据驱动的建模框架，将特定类型的表面质感的先验知识用多种途径来表达，包括模型的解构、表面质感样本空间模型、基于样例的生成式模型等，当然也包括传统的参数化建模方式以及对全光函数表达的直接采样。其中，模型的解构是基于数据驱动建模的基础，这个步骤根据表面质感的内在机理，将表面质感表达分解成若干个子部分，然后任何根据各个部分的特点应用最有效的方法分别建模。本文根据这一框架，在几何细微结构模型、半透明材质模型和时变材质模型方面提出了新的方法，取得了重大成果。同时也研究了同表面质感建模相关的从真实物体中获取模型的问题以及快速绘制表面质感模型的问题。

本文的主要贡献如下：

1. 提出了基于数据驱动建模的新型表面质感建模方式，并分析了这一方式同传统的基于图像建模方式和参数化建模方式的联系和区别，并将这一理论其应用到具体的表面质感模型分析。

2. 提出了细微结构距离函数(MDF)的细微结构表达, 可以表达由表面细微结构所造成的所有视觉效果。并且该模型可以从真实世界的样本中测量得到。同时也提出了相应的硬件加速实时绘制算法, 首次使BTF绘制有了细节轮廓效果以及正确处理非均匀入射光的能力。
3. 提出了准同质半透明材质模型, 可以同时表达由表面细微结构以及非均质半透明材质所带来的视觉效果。成功模拟了真实准同质半透明材质的外观。该模型推动了半透明材质建模的进展, 使能够测量真实样本的范围从均质物体拓展到了异质物体。
4. 提出了基于“表观流形”的时变表面质感模型, 是第一个不需要测量时间序列, 仅用单一时间点上的测量数据, 就可以建立时变表面质感模型的方法, 并提出了帧间一致性纹理合成算法。同时也首次实现了若干时变表面质感建模的应用如风化过程的正/逆向模拟和风化效果的置换等。

在后续章节中, 本文的主要内容安排如下:

第二章提出了基于数据驱动建模的基本框架。讨论了这一方法同基于图像建模方式和参数化建模方式的联系和区别, 综览了分别属于这三类建模方式的现有表面质感模型, 比较了基于这几类建模方式的具体表面质感模型的优劣。基于数据驱动建模本质上是一种混合建模方式, 该章根据具体表面质感模型中隐式建模成份和显式建模成份的比率, 定量建立了表面质感隐式模型到表面质感显式模型以及一系列中间混合模型的谱系。

第三章介绍了两个用于表面质感模型数据采集的设备。一个是主要用于BTF数据的采集, 并在细微结构建模(第三章)和准同质半透明材质的建模(第四章)担当数据采样的任务。另一个主要用于SVBRDF的采集, 为时变表面质感建模(第五章)采集样本。前者以程控的半圆机械臂和程控载物云台为核心, 可以很灵活地安装相机阵列和光源阵列, 实现快速的多视点方向多光照方向的表面质感外观图像的获取。后者是用LEGO积木搭建的线光源扫描机构, 是[Gardner et al., 2003]中提出的设备的简化, 其结构简单且部件廉价。这部分先给出了采集设备的光线原理以及程控机械机构, 然后讨论了成像系统以及光源的校准, 包括相机内外部几何参数的校准, 相机CCD响应曲线的校准, 色彩的校准, 光源几何位置, 光源相对强度等。在各项具体研究工作中, 设备的特别配置分别在后面的相应章节一一讨论。

第四章论述了基于细微结构距离函数(MDF)的细微结构模型, 给出了融合在BTF数据采集过程中的模型数据获取方法, 讨论了基于图像空间的物体分层剥离的绘制算法, 并给出了这个算法的实时硬件加速绘制的实现。文中首次提出了可以从真实世界的样本中采样的细微结构模型, 深入讨论了各个角度下激光扫描图像系列的

数据处理以及深度恢复方法，以及对这些深度图像的综合处理得到细微结构距离函数。文中列举了多个材质的绘制实例来展示MDF模型的有效性，其中包括用第二章给出的设备采集的真实世界的样本。

第五章给出了准同质半透明材质的概念定义，描述了这些物体的光学特性和外观视觉特点，并在此基础上建立了针对这类物体的BSSRDF分解模型，将光线传输分成了局部贡献和全局贡献。然后给出了类似于BTF采样方式的局部贡献模型的数据采样方法。重点讨论了基于稀疏激光线扫描的全局贡献模型数据的获取方法，包括根据线型侧向衰减曲线来恢复同质扩散方程近似模型的参数以及细微结构对出射光线的空间衰减函数。文中也讨论了将该模型在任意形状物体上的绘制的细节，并给出了多个从真实物体中采样得到的模型数据。

第六章阐述了“表观流形”的建模思想，以及在此基础上的建立的时变表面质感模型。文中主要以SVBRDF为例，讨论了自然界中的样本在时间状态和空间状态上的重叠特性。重点论述了应用流形学习思想的逐点表面质感样本空间分析方法，从单一时间样本分析随时间演变的表面质感变化趋势。这部分的另一个重点是通过渐变2D样本来构造表面质感的时变序列的方法。文中解释了其中主要的难点，并提出了帧间一致性纹理合成算法，兼顾表面质感时变序列在空间上的真实性以及在时间上演变的一致性。对表面质感样本空间的非线性分析同时也带来了一些新的应用，括在三维物体上模拟风化效果、增加或减少真实世界中的物体的风化程度以及风化效果的置换，文中对此也逐一作了讨论和效果演示。

第七章总结本文的基于数据驱动的表面质感建模的工作，并展望了这个研究方向的发展趋势。对于进一步的工作，文中就表面质感模型的通用性、模型采样的效率以及对实时绘制的支持可能性等方面展望了基于数据驱动的表面质感建模工作的未来。

## 第二章 基于数据驱动的建模和绘制

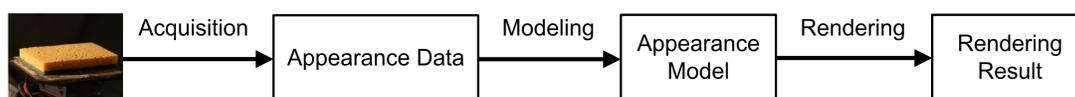


图 2.1: 表面质感建模的相关流程

在1.3节中，我们根据表面质感模型的表达能力或者说是其可以表现的视觉效果，建立了表面质感模型的演化关系，并讨论了各个模型的优缺点。在这一章里，我们将进一步讨论表面质感模型不同的建模方式及其优势和弱点。图2.1展示了表面质感建模的一般过程，根据具体模型的需要采集样本物体的外观数据，然后获取模型，并最终用于真实感绘制。

现有的表面质感模型大体可以分成两种建模方式：**基于图像建模方式**和**参数化建模方式**。基于图像建模方式是指以一定的精度直接采样表面质感全光函数表达(节1.3)，或针对特定类型表面质感的简化表达。参数化建模方式是指用参数化的公式来描述表面质感模型，用数值拟合的方法从采样数据中估计公式的参数，给定新的输入条件可以直接通过公式计算来重现物体的外观。这种方式利用了表面质感的内在机制，但是要求这种机制必须能够表达为参数化的解析公式。本文提出了基于数据驱动的建模，介于基于图像建模方式和参数化建模方式。这种建模方式利用了表面质感的内在机制，并采用多种途径来表达这个机制，而非单一的只用解析公式。通过对表面质感全光函数表达的合理解构，协同应用多种建模手段分别处理解构后的各个子模型。下面我们将分别介绍这几种建模方式，并比较其优缺点。

### 2.1 基于图像建模的方式

基于图像建模的方式是将表面质感模型的基本形式(式1.13)看成一个黑盒的系统来对待。图2.2给出了基于图像建模的流程，这种方式直接记录对全光函数表达的采样来建立对表面质感模型的描述。由于数据量较大，通常利用实际采样数据的内在相关性，通过适当的数据组织方式，用通用数据压缩方法压缩采样数据。其绘制过程，就

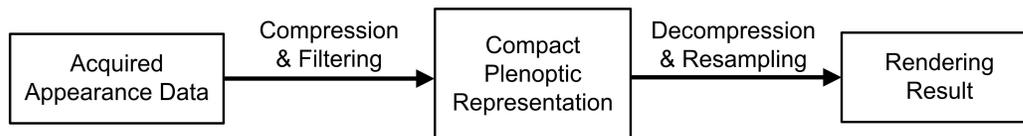


图 2.2: 基于图像建模方式的流程

是数据解压缩和重采样(Resampling)的过程, 由于表面质感绘制的时候需要随机访问表面质感数据, 故而我们通常采用能够支持随机访问的通用数据压缩方法, 如主成分分析、矩阵分解等。基于图像建模方式的研究主要集中在数据压缩方法和数据采样过滤方法两个方面。

在表面反射模型中, BTF模型(式1.16)[Dana et al., 1999], 以及后续的各种基于数据压缩的BTF表达采用的是基于图像建模方式, 例如基于PCA [Sattler et al., 2003] [Matusik et al., 2002a] [Liu et al., 2004] [Mueller et al., 2003] 的方法和基于张量分解的方法[Vasilescu and Terzopoulos, 2004a] [Wang et al., 2005a]。这类方法都是通过直接记录并压缩6维的BTF函数(式1.16), 来表示几何细微结构模型。此外, 也有基于图像建模的BRDF模型[Kautz and McCool, 1999] [McCool et al., 2001] 等。

在次表面散射模型中, DISCO模型[Goesele et al., 2004]采用了基于图像建模方式, 用激光射线以一定的采样精度均匀扫描物体表面, 并在每一次扫描时记录所有物体表面位置的出射光强。这样4维的Diffuse BSSRDF函数(式1.20)就被完整地采样下来。这样, 可以在新的光照条件下, 通过查表插值来绘制经过采样的半透明物体。

在时变表面质感模型中, Material History模型[Georghiadis et al., 2005](式1.22)用固定视点的相机, 连续拍摄外观变化中的物体, 记录时变的彩色纹理序列, 这样就得到了基于图像建模方式的表达。当Material History模型给应用到新的物体表面时可以通过查表插值得到绘制结果。

基于图像建模方式优点是能够得到原物体表面质感真实的绘制结果, 保留了原物体外观的各种细节, 具有很好的真实感, 同时模型也具有相当的通用性, 并不依赖于特定的材质。这个方法的主要缺陷是需要完整地记录全光函数表达, 需要大量的存储空间来表示, 即使有了压缩方法的帮助, 其数据存储和数据访问的开销也是不可忽略的。对于受到全局因素(如物体的几何形状)的表面质感, 由于全局因素的组合空间太大, 基于图像建模方式将变得不适用。限制了基于图像建模方式的适用范围。基于图像建模的方式虽然在设计适当的数据组织方式中可以利用表面质感数据的一些内在相关性, 但是这类方法没有充分利用表面质感数据的内在属性, 只将其看成一个入射光线到出射光线的黑盒映射, 通常应用在低维函数表达的表面质感(如BRDF), 对需要高维函数表达的表面质感不适用。

## 2.2 参数化建模方式

参数化建模方式是将表面质感模型当成一个彻底的白盒来对待，通过建立解析公式来刻画表面质感模型。图2.3是参数化建模方式的流程，这种方式研究各种表面质视觉现象的物理机制，在建立物理模型或经验模型的基础上，给出解析的数值表达或显式的规则描述，以此建立表面质感模型。获取模型的过程通常是拟合实际采样到的表面质感数据，获得模型参数。表面质感的绘制过程，就是对数值表达求值的过程或执行显式规则的过程。参数化建模方式主要集中在研究特定表面质感的物理机制，建立解析表达或基于规则的描述。

在表面反射建模中，光照模型，也就是各种参数化BRDF模型[Phong, 1975] [Blinn, 1977] [Cook and Torrance, 1982] [Ward, 1992] [Lafortune et al., 1997]属于参数化建模的方式。这类方法将4D的BRDF函数(式1.17)，用解析公式来表达，用若干个参数来表述BRDF模型的特性，其中有些是基于经验公式的如[Phong, 1975]，有些是基于一定的物理机制如[Ward, 1992]。

在次表面散射模型中，偶极子模型[Jensen et al., 2001]将4维的Diffuse BSSRDF函数(式1.20)用一个解析公式来表示(式1.25)。这个模型利用了次表面散射光线在均匀光学致密物质传播的物理机制，很简洁地描述了均质物体的次表面散射过程。

在时变表面质感模型中，以铜锈模型[Dorsey and Hanrahan, 1996]为例，文中研究了铜在各种环境在氧化并形成氧化物结晶的过程，建立氧化过程中各种氧化物的光学特性模型以及这些氧化物在空间分布的演化规则，在这些数值关系和演化规则的基础上建立了铜锈的时变表面质感模型。另外还有很多基于物理的风化模拟方法都属于参数化建模方式[Dorsey and Hanrahan, 1996] [Dorsey et al., 1996] [Dorsey et al., 1999] [Jensen et al., 1999] [Merillou et al., 2001]。

参数化建模通常具有较少量的未知参数，我们可以通过少来的样本表面质感数据，联立方程，理论上就可以求得这些参数。实际操作中，为了抑制噪声的干扰，通常用比理论上需要的样本多一些的数据，通过过约束的拟合过程得到模型参数。这个过程中，表面质感样本数据的需求量同模型参数有关，与模型所表达的表面质感全光函数形式无关，故而参数化建模的表面质感模型可以处理不完整的采样数据集，并且通常只要很少的样本数据就可以建立特定材质的模型。但是参数化建模往往强烈地依

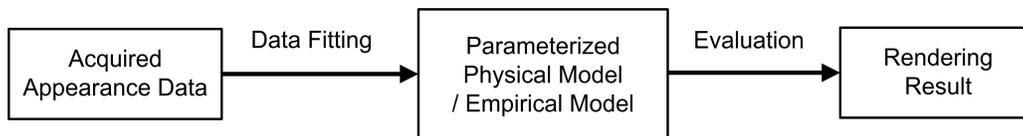


图 2.3: 参数化建模方式的流程

限于特定的物理过程或特定的材质特性，缺乏通用性。另外受到解析表达的能力限制，参数化模型与原物体的外观相比，常常缺乏很多细节，很多真实世界中的物体外观细节在数据拟合的过程中丢失掉了，缺乏真实感。从上面几个举例的参数化模型可以看到，基于数值解析公式的表达都仅限于均质物体，空间分布的变化很难被形式化成数值解析公式。基于演化规则的参数化表达能在一定程度上改善这个状况，但是这种方法所能表达的空间分布样式还是很受限制的。

### 2.3 基于数据驱动的建模方式

基于图像的建模方式和参数化建模方式是两种典型的建模方式，前者是纯粹的黑盒方式，后者是纯粹的白盒方式。两者有各自在表面质感建模上的优势和缺陷，但是大部分情况下基于图像的建模方式涉及太多数据的采集和存储，参数化建模方式又太过于局限。在表面质感建模研究的发展过程中，我们可以看到还有一类方法，在建立模型是混合采用这两种方法，综合两者的优点。表面反射模型中的材质纹理(Material Maps)[Blinn and Newell, 1976]就是这类方法的一个例子。材质纹理是用来表达6维的SVBRDF函数的，它将BRDF在空间中的分布用基于图像建模的2维分布图来表达，并在每一个点上记录该位置的BRDF的参数化模型的相应参数：

$$\rho_{SVBRDF}(x_o, \omega_o, \omega_i) = \rho_L(\omega_o, \omega_i; p_M(x_0)) \quad (2.29)$$

其中， $\rho_L$ 是某种光照模型(即参数化BRDF模型)， $p_M$ 就是记录光照模型参数分布的空间函数，是基于图像的建模方式。材质纹理嵌套了基于图像的表达和参数化表达，将6维的SVBRDF数据降为2维表达，同时保留了空间分布的真实感细节。在次表面散射模型中也有在类似的方法。在[Jensen et al., 2001]中，用彩色纹理 $\rho_r$ 来描述透射属性的空间变化，并和均质扩散方程近似结合在一起近似异质半透明材质的表面质感：

$$\rho_{rd}(x_i, x_o) = R_{dipole}(\|x_i - x_o\|)\rho_r(x_i) \quad (2.30)$$

其中 $R_{dipole}$ 是均质扩散方程近似模型(式1.25)，是参数化表达， $\rho_r$ 则是基于图像的表达。很多基于规则的风化(weathering)效果模拟技术都采用了多重纹理映射(multi-texturing)来刻画物体风化过程中的表面质感，从时变表面质感建模的角度来看，这是一种利用了基于图像的建模方法和参数化建模方法的混合表达。例如[Chen et al., 2005]，将材质历史模型(式1.22)表达为：

$$\rho_{MaterialHistory}(x_o, t) = p_0(x_o)(1 - \rho_t(x_o, t)) + p_1(x_o)\rho_t(x_o, t) \quad (2.31)$$

其中 $p_0$ 和 $p_1$ 是两张纹理图像，分别表示未风化和彻底风化时物体的表面质感，然后用

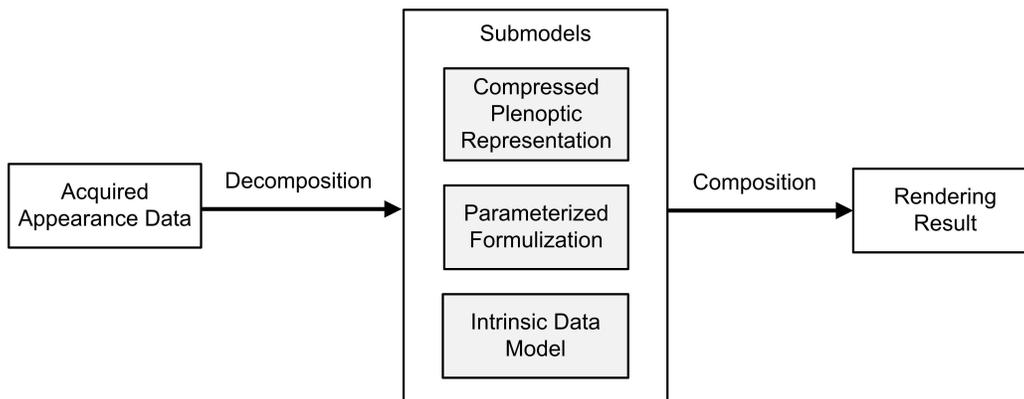


图 2.4: 基于数据驱动建模方式的框架

线性插值来表示风化过程中的表面质感，是基于图像的建模方式。线性插值的比例系数在空间上的分布和时间上的演化由 $\rho_t$ 函数确定，这个函数是一个参数化的模型，描述了物体在风化过程中的各处风化程度的演化，在[Chen et al., 2005]中，提出了一套可配置的脚本系统，用一系列规则来描述 $\rho_t$ 函数。

上面我们例举了几个混合使用基于图像建模和参数化建模的表面质感模型，这类方法在模型通用性，模型数据大小和绘制结果真实感程度这三个目标上取得了较好的平衡。从上面的例子我们可以看到，这几个方法有一个共同的特点，就是将全光函数表达解构(decompose)成几个嵌套或叠加的部分，然后采用不同的建模方式分别建模各个部分。我们将这类方法称为**基于数据驱动的建模方式**。基于数据驱动的建模方式是建立在对表面质感成因及其物理机制的分析和理解的基础上的，通过对原始全光函数表达的适当解构，然后根据解构后各个部分自身的特性分别用最合适的方式建立模型，模型绘制的过程涉及到各个子模型的绘制并组合(compose)子模型的结果，得到最终绘制结果。基于数据驱动的建模方式中的解构不同于矩阵分解(matrix factorization)，前者建立在数据的物理机制上，将数据分解成若干个有物理意义的部分，而后者从数值分析的角度出发，将数据分解成若干矩阵的乘积，不一定具有特定的物理含义。

本节伊始我们介绍了几种基于数据驱动建模方式的简单例子，都是分解成两部分，并用参数化方式和基于图像方式分别建模。当然基于数据驱动建模不仅仅是这两种传统建模方式的简单组合。图2.4是基于数据驱动建模方式的一般性框架，基于数据驱动的建模方式将表面质感原始模型的**解构**成子模型并根据各子模型的特性分别建模。子模型的建模除了传统的参数化建模方式和基于图像的建模方式之外，还有基于数据驱动的建模特有的方法，这里我们统称这些方法为本征数据模型(Intrinsic Data Model)。在本文中我们主要讨论其中的**表面质感样本空间模型**和**基于样例的产生式模型**。在重现表面质感时，合成(compose)各个子模型的绘制结果得到最终的绘制结果。

这里我们可以看到基于数据驱动建模的主要内容包括两个方面：一是模型解构，二是本征数据模型。模型解构是基于数据驱动建模的基础，只有在原始的模型被适当地解构成几个部分之后，我们才可能协同发挥各种子模型建模方法的优势，分别建模。原则上讲，模型解构服务于各子模型的建模方法，模型解构所采用的具体形式取决于分解后的子模型能否被有效地建模。模型的解构还可以是递归嵌套的形式，使得基于数据驱动建模方式可以非常灵活地描述各种复杂的表面质感。

### 2.3.1 本征数据模型

本征数据模型包含基于数据驱动建模方法中独特的子模型处理方式，和传统方法不同，本征数据模型不仅考察当前正在建模的表面质感实例，还关注同一类型表面质感所有实例的集合以及他们之间的关系。表面质感样本空间模型通过分析同一类型表面质感所有实例的高维样本空间来表达表面质感的实例。基于样例的产生式模型用表面质感样本的部分数据来生成其他部分的数据，从而得到完整的表面质感模型。在本文中，我们主要讨论表面质感样本空间模型和基于样例的产生式模型，前者利用已知的大量表面质感样本训练集构建样本空间，用这个空间的相对位置关系表达新的样本；后者是利用少量的表面质感样本并结合特定表面质感的内在机制用基于样例的纹理合成技术来生成新的表面质感样本数据。

#### 表面质感样本空间模型

表面质感的全光函数表达是入射光场到出射光场的映射函数，各种不同的物体具有不同的映射函数，但是这个映射函数不是任意是有一定规律的。对于某种特定类型的表面质感，如果我们收集自然界中各种物体，测量各个物体的表面质感映射函数，我们将得到这个映射函数的函数空间，每个特定物体的表面质感是这个空间中特定位置上的一个点。特定类型的表面质感的集合不会充满整个函数空间，而通常是嵌入在函数空间中的一个子空间(embedding)。通过建模这个子空间，我们就可以根据子空间中的相对位置关系来描述某一个特定表面质感的映射函数。这里我们举一个BRDF建模的实例。在[Matusik et al., 2003]中，采样了一百个不同材质的物体的BRDF函数，通过对这些样本所撑开的函数空间的分析，建立了各向同性BRDF函数的流形子空间模型。基于这个模型，任意各项同性BRDF都可以表示为这个子空间中的点。文中采用了流形分片(charting a manifold)的方法[Brand., 2002]对BRDF函数空间进行非线性降维，得到了这个空间的紧凑表达，使得高维的BRDF函数向量化形式可以用十几维的向量来表示。这里我们将这类方法称为**表面质感样本空间模型**。

表面质感样本空间模型就是用能够涵盖目标表面质感所有可能的变化的表面质感样本来建立表面质感样本空间，然后用特定测量数据在这个空间中的投影位置来表

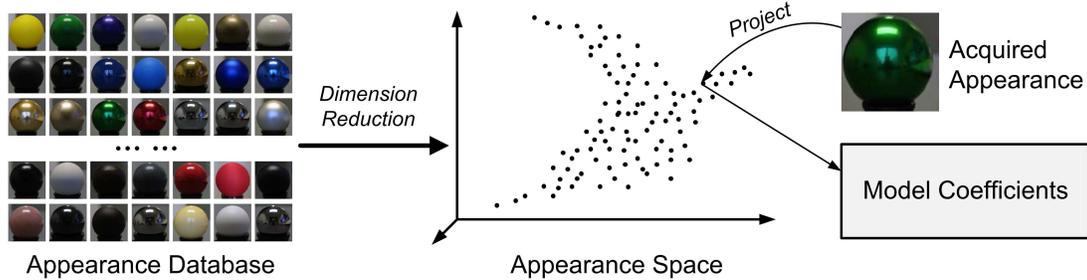


图 2.5: 表面质感样本空间模型的建模方式

示表面质感的模型。通常为了更有效地用样本空间相对位置来表达表面质感，采用非线性数据降维的方法降低表面质感样本空间的维度。图2.5给出了表面质感样本空间模型的建模流程，建模的过程就是向子空间投影(project)的过程，绘制的时候表面质感通过对其所在位置周围表面质感样本的采样得到。表面质感样本空间中样本，可以是表面质感的全光函数表达(如上例的BRDF函数)，也可以是其他形式的表面质感模型。例如我们可以用参数化BRDF模型来表示样本，这样表面质感样本空间本质上这是参数化BRDF模型的参数空间。表面质感样本空间模型本质上是用数据来表示数据的模型，用已知的样本数据库来表示新的数据，模型的表达是新的数据同样本数据的相对近邻关系。通常表面质感模型关心的是当前正在建模的表面质感的实例，而表面质感样本空间模型关注的是同一类型的表面质感集合的特性以及其内在的关系，通过对这个集合的合理组织来建立紧凑的模型。这种模型表达方式通常不依赖于特定表面质感的内在机制，具有较好的通用性，同时方式保留了真实样本数据中的表面质感细节，具有高真实感的绘制效果。

### 基于样例的产生式模型

高维的全光函数形式通常意味着要采集大量的不同条件下的照片才能获得目标物体的完整表面质感样本数据。但是由于受到各种现实实验条件的限制我们通常无法全部完整表面质感数据。参数化模型的一个优势就是可以拟合不完整的表面质感样本数据来建立模型，但是能有参数化表达的表面质感为数甚少。对于没有参数化模型的表面质感，很难利用不完整的表面质感样本数据进行建模。基于样例的产生式模型就是用来解决这个问题的。这里我们以处理不完整的BTF样本数据为例，论述基于样例的产生式模型的建模方式。6维的BTF函数(式1.16)也可以看成是视点方向-光照方向组合到二维纹理的函数映射：

$$\rho_{BTF}(x_o; \omega_o, \omega_i) : \omega_o \times \omega_i \rightarrow \rho_{texture}(x_o) \quad (2.32)$$

BTF的表面质感数据采样就是以这种方式，采集样本物体在不同的视点方向-光照方向

组合下的外观纹理图像。这里我们将空间变化参数以外的所有参数称为观测条件，如BTF中就是视点方向-光照方向组合 $\omega_i, \omega_o$ ，Material History中就是时间 $t$ 。CURET数据库[Dana et al., 1999]中给出了采样的BTF数据，但是数据中缺乏部分观测条件下的图像。[Liu et al., 2001]中在假设细微结构是高度场的前提下，用部分可用的观测条件下的图像重构细微结构的高度场表达，然后在高度场的约束下利用基于样本的纹理合成方法(example-based texture synthesize)以可用的观测条件下的图像为样本，合成那些缺失的观测条件下的图像，从而得到完整的BTF模型。在这里例子中，高度场约束了缺失的观测条件下图像的合成过程，这个约束是至关重要的，否则纹理合成只会是复制了已有观测条件下图像的纹理样式，并产生同缺失的观测条件不一致的结果。我们将这样的表面质感建模过程称为**基于样例的产生式模型**。

基于样例的产生式模型简单讲就是用表面质感样本的部分数据来产生另一部分数据的模型。本文主要讨论利用空间分布样式的相似性应用纹理合成来产生新数据，但是基于样例的产生式模型并不仅指利用利用空间分布样式的相似性，也可以是同方向相关的光学特性的相似性。大部分涉及空间分布的表面质感(如BTF、SVBRDF等)都没有参数化形式的表达，其中一个原因就是空间分布信息没有通用规律，无法形式化成解析表达来统一描述。而基于样例的产生式模型很好地弥补了这一空缺，基于样例的方式使得产生式模型具有极强的通用性，可以描述各种形式的纹理样式。图2.6给出了基于样例的产生式模型建模过程的图示。对于模型中缺失的数据(图中空白的切片)，在现有的数据(图中蓝色的切片)中选取适当的样本集合，在特定的约束条件下进行基于样本的纹理合成，生成缺失部分的数据。还有一种数据缺失的形式是各个观测条件下的图像都有但都不完整，那么通常会采用同一观测条件下可用的区域作为样本，来合成残缺的区域。

样本集合的选取和特定的约束条件是产生式模型研究的两个重要的方面，这两个方面通常和表面质感的内在机理相关。不同观测条件下的图像具有特定的相似性，

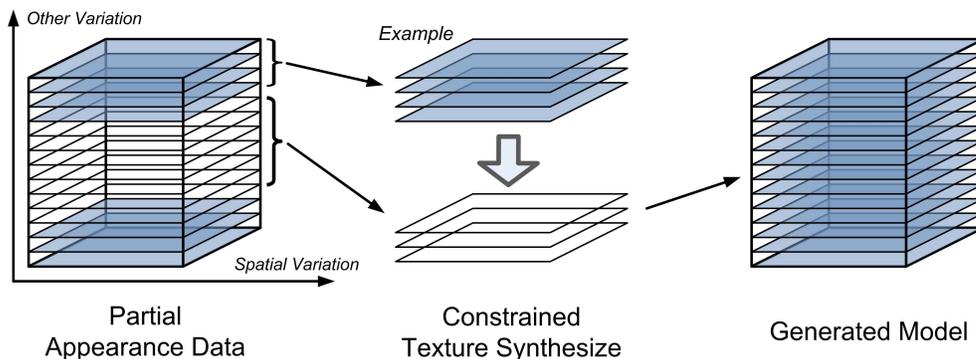


图 2.6: 基于样例的产生式模型的建模方式

这个相似性的对应关系以及具体形式是和特定类型的表面质感相关的。在合成缺失的数据，我们需要在既有数据中确定那些数据具有较好的相似程度，可以作为合成过程中特定缺失数据的对应样本。特定的约束条件是为了满足两方面的要求，一是使合成的结果和缺失数据的观测条件一致，二是使合成的结果和相邻观测条件的图像保持变化的连续性。第一个方面主要是指当样本来自其他观测条件下的图像，不同观测条件下的图像毕竟是不同的，我们需要在合成过程中引入必要的约束是合成结果属于目标观测条件。第二个方面，是为了使当观测条件发生连续变化的时候(如时间的变化、视点方向的变化等)，各帧图像的内容应该要有一致的和连续的变化，而避免闪烁。

基于样例的产生式模型是根据原始样本来合成缺失的数据的，原始样本中各种表面质感的细节也一起被传递到了生成的数据，从而保证了模型的高度真实感。当然模型的质量一定程度上也取决于所采用的纹理合成方法。如果将观测条件和空间变化参数的分离看成是一种解构，那么基于样例的产生式模型本质上是在利用解构后的子模型(二维纹理)的样本空间结构。以BTF为例，所有经过采样的观测条件下的纹理图像将构成一个高维的向量空间。这是由这些样本纹理所撑开的图像空间，基于样例的产生式模型本质上就是在这一空间中以一定的约束条件作非线性的重采样。

## 2.4 表面质感建模实践

本文将基于数据驱动的建模框架应用于建模实践，提出了细微结构距离函数(第四章)、准同构半透明材质(第五章)和表观流形(第六章)三个应用于不同类型材质的表面质感模型，分别针对不透明材质、半透明材质和时变材质。在这里我们统一论述这三个模型的解构形式和子模型建模方法，各个模型的建模、数据采样和绘制方法等细节可以分别参考第四至第六章。

### 细微结构距离函数模型(MDF)

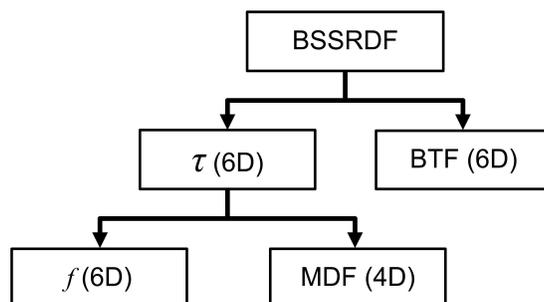


图 2.7: 细微结构距离函数模型的解构过程

该模型建模的是带有表面细微结构的不透明材质，我们假设光线在细微结构

表面上的某一点上发生一次反射，任何一点 $x_o$ 的出射光线只由某一点 $x_i$ 决定，但是和BTF不同，我们不假设 $x_i = x_o$ ，这样这个模型就可以正确地处理不均匀光照。这个模型的全光函数表达为：

$$\mathcal{S}(x_o, \omega_o, x_i, \omega_i) = \delta(\|x_i - \tau(x_o, \omega_o, \omega_i)\|) \rho_{BTF}(x_o, \omega_o, \omega_i) \quad (2.33)$$

其中函数 $\tau(x_o, \omega_o) \rightarrow x$ 确定了 $x_o$ 在观测条件为 $\omega_o, \omega_i$ 时对应的入射点 $x_i$ 。如图2.7所示模型首先被解构成可见性部分 $\tau(x_o, \omega_o, \omega_i)$ 和反射特性部分 $\rho_{BTF}(x_o, \omega_o, \omega_i)$ 的乘积。在细微结构距离函数模型中，后者是一个6维函数直接用BTF函数建模，属于基于图像的建模方式；前者也是一个6维函数，被进一步解构为一个6维解析表达 $f$ 和4维细微结构距离函数(MDF)的嵌套：

$$\begin{aligned} \tau(x_o, \omega_o, \omega_i) &= f(x_o, \omega_o, \omega_i, \rho_{MDF}(x_o, \omega_o)) \\ &= x_o - \vec{v}_o (\cos \theta_o \tan \theta_i + \sin \theta_o) \cdot \rho_{MDF}(x_o, \omega_o) \end{aligned} \quad (2.34)$$

$\vec{v}_o$ 是 $\omega_o$ 在参考平面上的投影， $\theta_{i/o}$ 是 $\omega_i/o$ 同法向量的夹角。式中， $\rho_{MDF}(x_o, \omega_o)$ 是细微结构距离函数(MDF)，这个函数给出了特定出射点 $x_o$ 沿特性出射方向 $\omega_o$ 的相对于细微结构表面的深度，是一个视点相关的深度图像，这个4维函数采用了基于图像建模的方式。

#### 准同构半透明材质(Quasi-Homogeneous Material)

该模型建模的是准同构半透明材质，是一种带有表面细微结构的异质半透明材质，关于准同构半透明材质的特性以及模型假设可以参考第五章。准同构半透明材质的全光函数表达是8维的BSSRDF函数(式1.14)，如图2.8所示，准同构半透明材质模型首先根据光线在半透明材质中的传播特性，模型被解构成局部散射反射分量和全局散射分量之和：

$$\mathcal{S}(x_o, \omega_o, x_i, \omega_i) = \rho_{Local}(x_o, \omega_o, x_i, \omega_i) + \rho_{Global}(x_o, \omega_o, x_i, \omega_i) \quad (2.35)$$

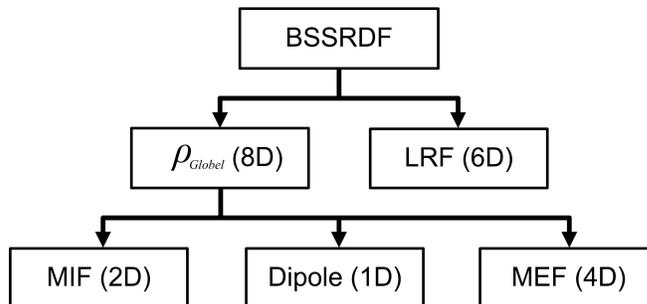


图 2.8: 准同构半透明材质模型的解构过程

其中，局部散射反射分量在均匀光照的假设下被表示为6为的局部反射函数 $\rho_{LRF}$ ：

$$\rho_{Local}(x_o, \omega_o, x_i, \omega_i) = \delta(\|x_i - x_o\|) \rho_{LRF}(x_o, \omega_o, x_i) \quad (2.36)$$

这个函数包含了均匀光照下局部散射反射分量的出射情况，这是一个类似BTF的表达，我们采用了基于图像的建模方式加以描述。根据准同构半透明材质的光线散射特性，全局散射分量被进一步解构为细微结构出射函数 $\rho_{MEF}$ 、偶极子模型 $R_{dipole}$ (式1.25)和细微结构入射函数 $\rho_{MIF}$ 的乘积：

$$\rho_{Global}(x_o, \omega_o, x_i, \omega_i) = \rho_{MEF}(x_o, \omega_o) \cdot R_{dipole}(\|x_i - x_o\|) \cdot \rho_{MIF}(\omega_i) \quad (2.37)$$

其中细微结构出射函数 $\rho_{MEF}$ 是4维函数，细微结构入射函数 $\rho_{MIF}$ 是2维函数这两个部分我们采用了基于图像的表达，偶极子模型 $R_{dipole}$ 是一个解析的模型。

### 表观流形(Apppearance Manifolds)

该模型建模的是时变的表面反射过程，其全光函数表达为TVSVBRDF函数(式1.23)。时变的表面反射过程包含两方面的时变特性：表面反射特性随时间的变化以及空间上纹理样式的变化。如图2.9所示，该模型首先将模型分解成时变的BRDF $\rho_{TVBRDF}$ 和时变的纹理样式 $\rho_{DMS}$ ：

$$\rho_{TVSVBRDF}(x_o, \omega_o, \omega_i, t) = \rho_{TVBRDF}(\omega_o, \omega_i, \rho_{DMS}(x_o, t)) \quad (2.38)$$

式2.38中的 $\rho_{DMS} : (x_o, t) \rightarrow d$ 是用来刻画随着全局时间 $t$ 的推移的，空间上各处局部”时间”的变化，我们将这个局部”时间”成为风化程度 $d$ 。函数 $\rho_{DMS}$ 可以看成观测条件为 $t$ 的风化程度分布图(Degree Map)的序列，虽然对于各种不同的时变材质这个分布的样式各异，但是他们随着时间的演化都遵循相同的规律：风化程度单调增长和帧间一致的样式演化过程。根据这个特性，我们采用了基于样例的产生式模型。我们将一帧空间上带有各个风化阶段的风化程度分布图 $\rho_{DM}$ 为样本，以单调增长和帧间一致为约

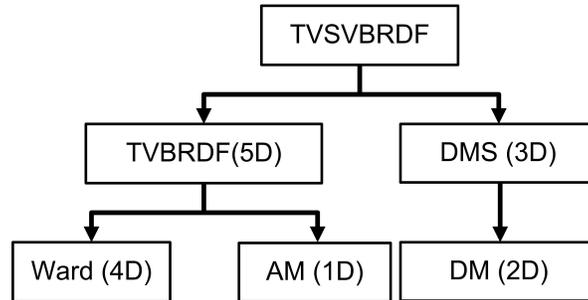


图 2.9: 基于表观流形时变材质模型的解构过程

束合成风化程度分布图的序列 $\rho_{DMS}$ 。

式2.38中的 $\rho_{TVBRDF}(\omega_o, \omega_i, d)$ 描述了在风化程度为 $d$ 时的物体表面点的反射特性。我们可以将这个式子看成是风化程度 $d$ 到BRDF函数的映射：

$$\rho_{TVBRDF}(\omega_o, \omega_i, d) : d \rightarrow \rho_{BRDF}(\omega_o, \omega_i) \quad (2.39)$$

而我们观察到，对于一个特定时刻的时变表面质感样本，通常在其空间各处具有不同风化程度，使得我们可以在空间各处收集BRDF样本，针对特定的时变过程构造这个过程中涉及到的BRDF的子空间。这里我们用表面质感样本空间模型来描述这个部分。通过对这个BRDF子空间的流形分析，可以得到一个本征维度为1的流形嵌入。我们将这个维度上的坐标定义为风化程度，这样就可以得到 $d \rightarrow \rho_{BRDF}(\omega_o, \omega_i)$ 的函数映射。在我们的分析中，每个表面质感样本采用了Ward模型[Ward, 1992](一种参数化BRDF模型)来描述，所以我们建立的表面质感样本空间本质上是Ward模型的参数空间，同时得到的是风化程度 $d$ 到Ward模型参数的函数映射，这样模型就被进一步解构成：

$$\rho_{TVBRDF}(\omega_o, \omega_i, d) = \rho_{ward}(\omega_o, \omega_i; \rho_{AM}(d)) \quad (2.40)$$

其中 $\rho_{AM}$ 就是基于Ward模型参数样本建立的表观流形。

# 第三章 表面质感的数据采集设备

## 3.1 程控多功能光学平台

程控多功能光学平台是一个由程控机械旋转臂为基础的表面质感主动成像系统。它通过从各个不同方向主动照射平行光并在各个方向拍摄样本的外观图像，来获取样本物体的表面质感。相机、光源以及机械部件都由一台PC控制，也包括相机图像数据的获取和处理，实现了全自动的多视点方向多光照方向的表面质感外观图像的获取。这个设备典型的应用是采集双向纹理函数，在细微结构建模(第四章)和准同质半透明材质的建模(第五章)等工作中实现数据采样的过程。这个系统允许各种光源的灵活配置，例如可以在上面安装激光扫描部件，以实现多角度的激光扫描成像。

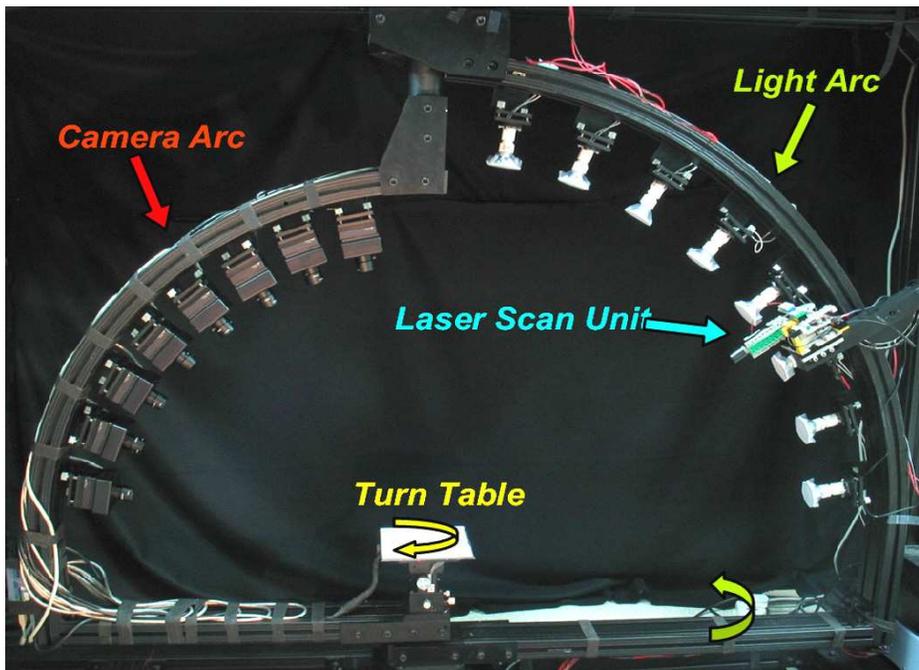


图 3.1: 多功能光学平台

### 3.1.1 光学平台的基本构造

图3.1为多功能光学平台，其主体由一个可以旋转的载物台(tune table)以及同轴的两个拱形的臂，一个是固定的(camera arc)，另一个是可以旋转(light arc)。系统中的可旋转部件都是由程控步进电机驱动的，可以做到精确角度的水平旋转。通常我们在固定的拱形臂上安装相机阵列，在可旋转的拱形臂上安装光源设备，如卤素灯阵列或激光扫描机构等。

在我们的实验设置中，相机阵列采用了8个Dragonfly视频相机，每个相机可以以15赫兹的速率提供分辨率为1024\*768的24位色彩色图像。这8个相机通过两个IEEE1394集线器和控制PC的数据采集卡连接。光源阵列采用了8个卤素灯，用程控开关电源和控制PC相连。

图3.1中还包括了一个装载在仰角控制器上的激光发射器。图中的激光发射器是一个红色的半导体激光发生器，我们通过在其前面安装柱面镜，将激光束展开成激光扇面以实现线型扫描。激光发射器可以很容易地替换成其他类型，在准同质半透明材质的建模(第五章)工作中，我们还另外采用了绿色(532nm)和蓝色(473nm)的宝石激光器。激光扫描装置被手工安装在光源拱形臂，可以程控调整激光扫描的角度。

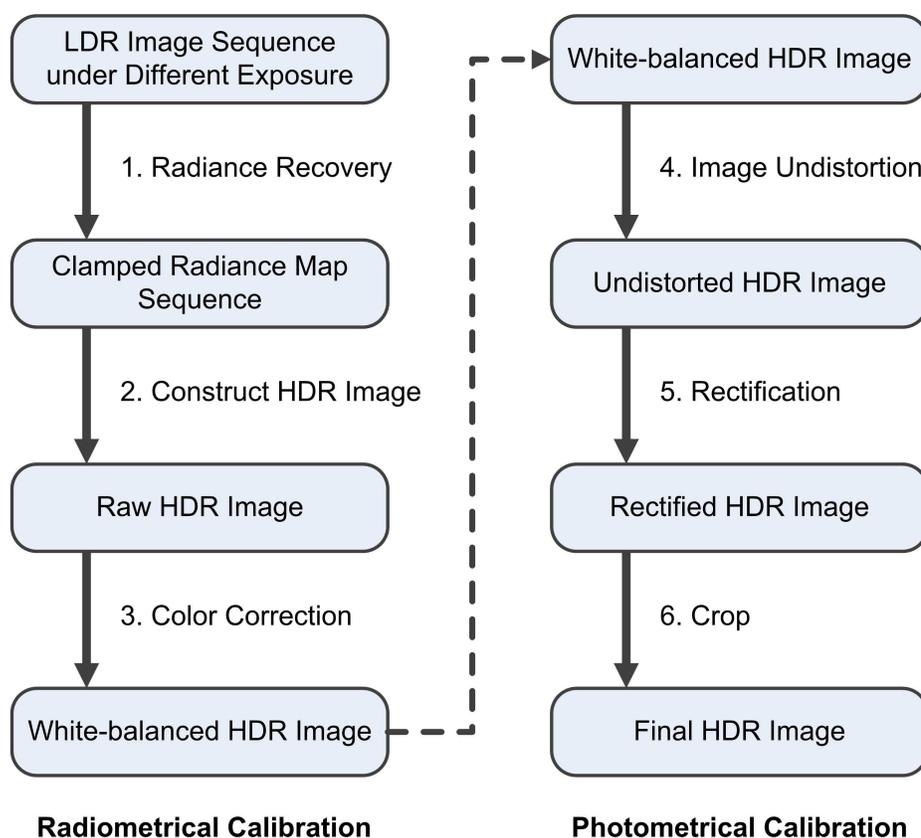


图 3.2: 图像数据的处理流程

### 3.1.2 图像数据的处理

在每次获取样本的外观图像时(例如给定的视点、光照方向或激光扫描中的一步), 8个相机将同时捕获物体的外观图像, 并在控制PC上作为原始数据存储下来。在这个数据采集完成后我们将对原始数据进行后期处理, 以生成最终的图像。图3.2中给出了后期处理的主要流程, 主要包括辐射度的校正(Radiometrical Calibration)和几何光学的校正(Photometrical Calibration)两大步骤。

**辐射度的校正** 我们采用了通过融合用不同曝光量下拍摄的图像, 来重构高动态范围图像的方法[Debevec and Malik, 1997]。图3.2给出了最终获取高动态范围(HDR)图像的完整流程, 先是将各个原始照片进行照度(radiance)的恢复, 通过相机的响应曲线的反函数将图像的像素值转换成各点的实际照度。我们用[Debevec and Malik, 1997]中提到的方法预先求出相机的相对响应曲线, 对于各个颜色通道相对响应曲线是互相独立的。然后根据曝光量将照度图(radiance map)序列各帧恢复到同样的单位, 然后加权求和就得到了原始的高动态范围图像。如果只需要低动态范围的图像, 那么可以省略重构高动态范围图像的步骤(2)。最后是色彩的校正, 由于我们只求得相机相对响应曲线, 也就是说各个色彩通道之间有各自不同的线性缩放因子( $S_r, S_g, S_b$ ), 同时通常光源也不是纯粹的白色。我们不单独校正相机以及光源的白平衡, 而是校正相机-光源联合系统的白平衡。我们用真实捕获数据时的光源照射反射率已知的材料, 从而反求这个线性缩放因子。在我们的实验中采用了GretagMacbeth的迷你标准色板(图3.3a)。用这个线性缩放因子反除原始的高动态范围图像, 就可以校准其白平衡。

**几何光学的校正** 通常表面质感数据都是定义在局部的参考坐标系下的, 我们的在实验中选取了和载物台平行并和采集的样本的上表面齐平的平面作为局部的参考坐标系的X-Y平面, 以载物台旋转0度的方向作为X方向。所有采集下来的图像, 由于视角位

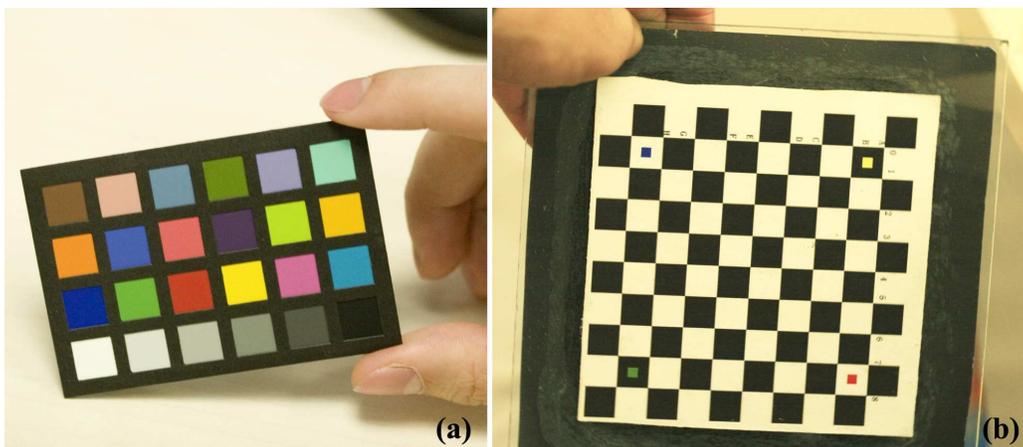


图 3.3: 标准色板和标准棋盘格



图 3.4: 不同视点方向和光照方向下的样本外观图像

置的不同, 都需要根据相应相机的位置对图像进行几何变换, 将图像投影到参考坐标系的X-Y平面上(rectification步骤)。在几何变换之前, 我们先要消除由于相机镜头造成的径向畸变(radial distortion)。我们采用[Zhang, 2000]中给出的参数化径向畸变模型来拟合实际拍摄到的标准棋盘格图像。然后根据相机的内部参数和外部参数建立特定视点方向下图像空间到参考坐标系的X-Y平面的变换矩阵, 并根据这个变换矩阵对原图进行重采样, 得到一致坐标系下的图像。最后一步是在生成的图像中裁剪有效区域(通常为正方形), 得到最终的多视点多光源方向的表面质感外观图像。对于各个相机, 我们拍摄多个不同位置放置的标准棋盘格(图3.3b), 然后用[Zhang, 2000]的方法获得各相机的内部和外部参数。

### 3.1.3 实验结果

图3.4中给出了不同视点方向和光照方向下拍摄的样本外观图像在经过上一节的处理过程后的情况。图中上行是同一视点方向下不同光照方向的变化, 下行是同一光照方向下不同视点方向的变化。

## 3.2 线性光源平面反照度测定仪

线性光源平面反照度测定仪是用来获取平面物体的SVBRDF, 由于可以采用通用的数码相机作为图像采集设备, 并且不需要图像对准, 故而这个设备可以快速获得高分辨率的参数化SVBRDF。这个设备是[Gardner et al., 2003]的简化, 我们通过线性光源对平坦的反射物体样本作水平扫描, 并用视角固定的相机连续拍摄整个扫描过程, 然后利用逐像素的出射光强变化序列恢复各点的BRDF模型。图3.5给出了设备的

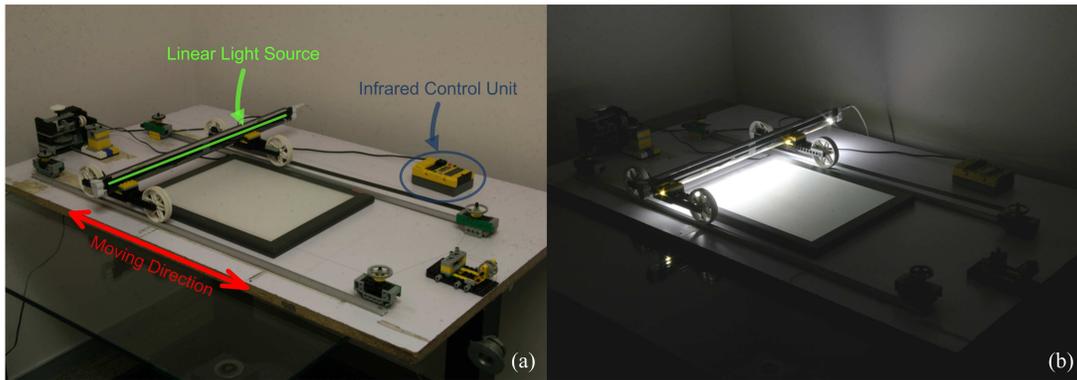


图 3.5: 线性光源平面反照度测定仪

外观，设备的机械部件全部用LEGO积木建造，主要包括承载线性光源的小车，变速齿轮箱，传动部件以及尾部的坠重。各部件间用渔线连接，可以实现小车的前后平滑移动，图中的红色箭头表示小车移动的方向。变速齿轮箱由一个直流电机驱动，图中的红外线控制器可以控制电机的启停及转动方向，红外线发射装置通过USB接口与一台PC相连，实现程控的自动数据捕获。线性光源采用的是15瓦的日光灯管，为了使光源更细，日光灯管两侧用不透明胶纸覆盖。该设备还包括一个背光板，用来测量物体的透明度。图3.5 (b)是平面线性光源反照度测定仪实际工作时的示意图。

### 3.2.1 光学原理

图3.6展示了线性光源平面反照度测定仪的光学原理。考虑样本平面上的特定点 $p$ 以及它的法线方向 $n$ ，线性光源 $l$ 在扫描过程中的移动造成了入射角 $\theta_i$ 的改变，这样我们就可以在固定视点的相机 $v$ 的图像序列中获得 $p$ 点在多个光照角度下的反射量。这里我们假设物体表面的反射特性是各向同性的，和[Gardner et al., 2003]一样我们采用了各向同性的Ward模型[Ward, 1992]来表示各点的BRDF。在这个假设下，对于特定点的扫描序列通常有两个峰值点，一个是在线性光源移动到镜面反射的位

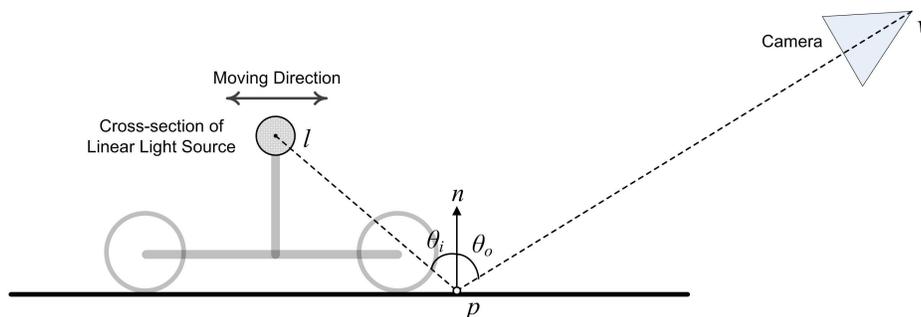


图 3.6: 线性光源平面反照度测定仪的光学原理

置(即 $\theta_i = \theta_i$ ), 另一个是在线性光源移动到法线方向的正上方(即 $\theta_i = 0$ )。这个设备的一个重要的特点就是通过在扫描序列上查找这两个峰值点来确定该点光照模型中的漫反射系数 $\rho_d$ 、镜面反射系数 $\rho_s$ 以及光洁系数 $\alpha$ , 而不是用几何校准的方法来确定对应峰值点在序列中的位置。这样做的好处是在很大程度上消除样本表面细微的几何起伏导致的法向量扰动所带来的影响。[Gardner et al., 2003]文中, 详细讨论了这部分时间序列分析方法以及Ward模型的拟合过程。

### 3.2.2 实验结果

图3.7给出了用线性光源平面反照度测定仪采样的例子, 这个样本包括表面反射属性和透明度属性。其中(a)是漫反射系数的分布图, (b)是镜面反射系数, (c)是光洁系数, (d)是透明度。(e)~(g)是这个数据实时绘制的结果。



图 3.7: 线性光源平面反照度测定仪的绘制结果

## 第四章 全效果几何细微结构模型

真实世界的纹理细节主要是由两方面引起的，一个是表面反射属性的空间变化，另一个是表面细微结构的变化，即表面几何细节的变化[Koenderink et al., 1996]。6维的双向纹理函数(Bidirectional Texture Function, BTF)[Dana et al., 1999]能够完整地描述这样的视觉变化，同时也能够从真实材料中测量得到，并且BTF可以作为贴图映射到任意形状的几何模型上去[Tong et al., 2002] [Sloan et al., 2003a] [Suykens et al., 2003] [Sattler et al., 2003]。BTF映射的表面能够绘制出很多视觉效果比如细节明暗、自阴影、互反射和自遮掩等，但是BTF不能处理细节轮廓效果，以及不能处理不均匀光照。这是因为BTF提供的反射数据只是关于光源和视点方向的函数，细微结构的可见性被隐式的包含在基于图像的表达中。因此，无法绘制细节轮廓的效果，如图4.1(a)所示，并且阴影的边界也是光滑的，而没有同细微结构相一致的偏移，如图4.1(b)。

这里我们所谓的全效果几何细微结构模型是指能够绘制几何细微结构的五个视觉效果，即法线扰动、自阴影、自遮挡、互反射和细微轮廓(参考1.2.1节)。为了绘制几何细微结构的这些效果，一类方法是基于显式局部可见性的表达。View-dependent displacement map(VDM)方法[Wang et al., 2003]将细微结构可见性看成纹理位置、视

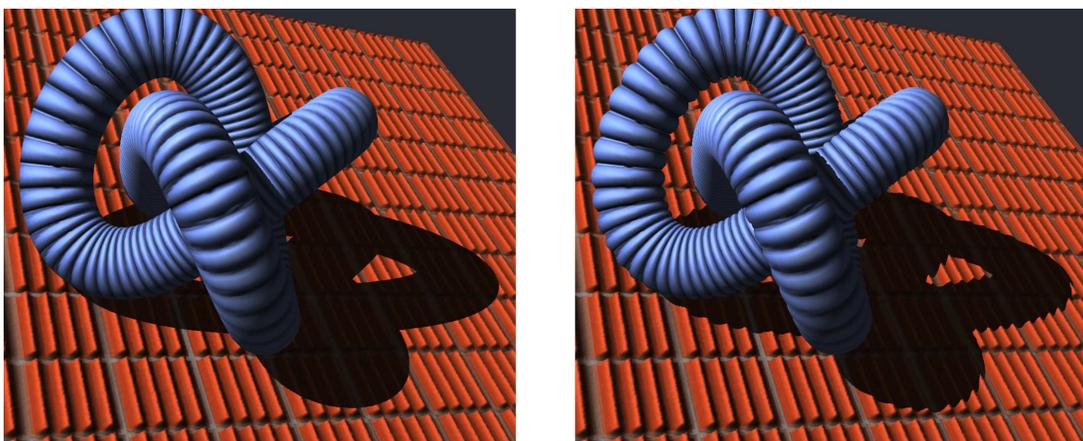


图 4.1: 全效果几何细微结构模型渲染结果和BTF渲染结果的比较

点方向和以及曲率的函数进行预计算。VDM将这个预计算的结果存为一个5维数据，并通过图形硬件加速可以达到实时帧率。Generalized displacement map (GDM)方法[Wang et al., 2004]也是保存了一个5维的数据，但是与VDM不同，GDM是作为光线方向和3维体位置的函数。然而，上述两种方法都只能使用人工合成的可见性数据，无法从实际物体中采样到这样的数据。另外，5维函数的数据需要较多的硬件内存，使得这样的方法损失了实用性。而且，他们都不能和BTF数据结合起来，而是只能使用传统的法向贴图和两次遍历的阴影绘制方法。BTF不需要阴影缓存就可以有效地绘制局部阴影效果，同时BTF还能绘制其他很多传统绘制技术不能实现的绘制效果，如相互反射效果和局部的次表面散射效果等。

我们提出了一种新的隐式几何表达方法，可以实现细节轮廓和处理不均匀入射光的绘制。这个方法可以很自然地同BTF的采样以及绘制过程融合在一起，实现全效果的细微结构建模和绘制。我们的表达基于一个4维细微结构距离函数(mesostructure distance function, MDF)。它是作为一个特定BTF数据的伴随函数，为BTF中每个视点方向记录从参考平面沿着视点方向到细微结构几何表面的距离，参考图4.2中的 $p$ 点到 $p'$ 点的距离 $d$ 。这样，我们可以这样判断轮廓处细微结构是否可见：首先计算正向表面到对应的背向表面的距离，然后检查这个距离是否大于MDF中记录的他们的细微结构距离之和。因为物体表面存在自遮挡，所以在轮廓的绘制中我们采用多次深度层剥离(multi-pass depth peeling)绘制算法保证能够得到正向表面和与其对应的背向曲面。除此之外，该算法同样保证我们可以透过未交到细微结构的较近的层，而相交到与视线真实相交的较远的层。结果显示，我们的方法能绘制出很好的视觉效果和正确的阴影效果，如图4.1(b)。MDF可以看作是去掉曲率参数的VDM的一种简化。但是这种简化并不像它看上去那样直接。VDM是依赖于曲率去获得轮廓可见性。换句话说，如果将曲率参数设置为0，使用VDM绘制[Wang et al., 2003]将只能得到和模型一样不够细致的轮廓，这和BTF的绘制效果是一样的。只有通过使用MDF的表达和绘制方法，我们才可以绘制出轮廓效果。同样，通过MDF函数，我们在计算入射光的时候，可以确定实际的入射点图4.2中 $p'$ ，而不是像传统BTF绘制那样直接将 $p$ 点作为入

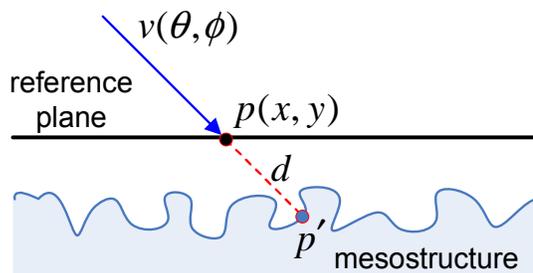


图 4.2: 细微结构距离函数的含义

射点。

## 4.1 几何细微结构模型及相关工作

基于BTF的模型可以从真实材质中获取，如[Dana et al., 1999] [Dana, 2001] [Furukawa et al., 2002] [Sattler et al., 2003] [Han and Perlin, 2003] [Yamauchi et al., 2003]。获取的BTF数据可以被直接映射到几何模型上用于绘制，或者使用纹理合成技术[Liu et al., 2001] [Tong et al., 2002]合成到几何模型上。BTF表达复杂的非高度场的细微结构，比如纺织物[Sattler et al., 2003] 和皮毛[Furukawa et al., 2002]。Polynomial Texture Mapping (PTM)[Malzbender et al., 2001]可以看作是一种固定视点的特殊形式的BTF。

尽管BTF需要存储高维数据，BTF仍然可以实现实时的绘制[Suykens et al., 2003] [Sattler et al., 2003][Mueller et al., 2003][Liu et al., 2004][Vasilescu and Terzopoulos, 2004b]。这些方法将6维的BTF数据分解为较低维纹理数据，这些低维纹理数据可以在硬件上轻易的加载和绘制。[Sloan et al., 2003a]还将预计算辐射传输(PRT)方法应用到BTF上。但是这些技术都忽略了细微结构的细节轮廓，同时也不能处理非均匀入射光的情况。

如果仅仅针对高度场细微结构，如凸凹贴图[Blinn, 1978][Cook, 1984]，存在很多现成的方法可以绘制逼真的效果。Horion Mapping在凸凹贴图的基础上，绘制细微结构级别的阴影效果[Max, 1988]，这种方法可以在图形加速硬件上实现实时的绘制[Sloan and Cohen, 2000]，并且该方法的表达也可以从实际采样数据中获得[Rushmeier et al., 2001]。另外一类基于预计算可见性的方法[Heidrich et al., 2000]也可以在凹凸贴图上绘制细微结构级别的阴影和互反射效果。然而，上述这些方法都忽略了表面细微结构的自遮挡(凸凹产生的视差)以及细微轮廓的可见性，他们也缺少BTF绘制的通用性和真实感。

Parallax map方法[Kaneko et al., 2001]可以实时捕捉高度场的局部视差。就在最近，[Policarpo et al., 2005]提出了一种实时绘制这种浮雕表面的自遮挡，自阴影效果的技术。和BTF所遇到的问题一样，这些方法中贴图之后的物体模型的边缘轮廓没有改变。另外，绘制仍然使用的是传统的技术，而不是BTF绘制技术，没有互反射以及次表面散射等效果。

Hirche等人[Hirche et al., 2004]提出了一种在像素基础上绘制位移表面的方法。在他们的的方法中，网格的每一个三角形都被延升成一个棱柱。光线和延升三角形的交点在棱柱表面上每个像素计算(GDM方法中使用了一个类似的方法，而且也必须光栅化棱柱表面而不仅仅是网格的三角形)。尽管这种技术可以实时绘制位移表面的细节

轮廓，但是它仅仅局限在高度场细微结构，因此它不能处理非高度场细微机构，如很多我们的结果中草和纺织物之类的真实世界的材质。我们还提出了一种可以同时测量实际材料的BTF和MDF模型数据的系统，以及一种高真实感的以BTF为基础的全效果细微结构绘制方法。

## 4.2 几何细微结构深度函数

我们先回顾一下BTF函数的定义：

$$\rho_{BTF}(x_o, \omega_o, \omega_i) \tag{4.41}$$

其中 $x_o$ 是出射点，即视线方向 $\omega_o$ 看到的点， $\omega_i$ 是指入射光的方向。如图4.3所示，BTF记录了在特定方向光照下 $x_s$ 点的出射，由于BTF假定均匀的入射光，所以它就不用在乎真正的入射点的位置 $x_i$ ，当然BTF中也不包含这个信息。但是当均匀入射这个假设不成立的时候，为了得到正确的出射光强，我们必须得到在参考平面上入射到 $x_s$ 的入射点 $x_i$ ，以确定该点的入射强度。但是仅有BTF数据是没有办法做到这一点的。下面我们给出MDF函数的定义：

$$l_{MDF}(x_o, \omega_o) \tag{4.42}$$

参数的含义同BTF的定义一样，但是这个函数的值指的是出射点 $x_o$ 到细微结构的交点 $x_s$ 距离 $l$ 。偏移距离同出射点位置和角度都有关，其本质上描述了出射点位置附近的几何结构。在给入射光的角度，根据距离 $l$ 就可以求得入射点 $x_i$ 的位置。这样我们就可以根据三角关系得出入射点相对于出射点的位置：

$$x_i = \frac{l \sin(\theta_i + \theta_o)}{\sin \theta_i} \cdot \vec{v}_o + x_o \tag{4.43}$$

其中 $\vec{v}_o$ 是方向 $\omega_o$ 在参考平面上的投影，并单位化。 $\theta_i$ 和 $\theta_o$ 分别是入射/出射角的仰角。

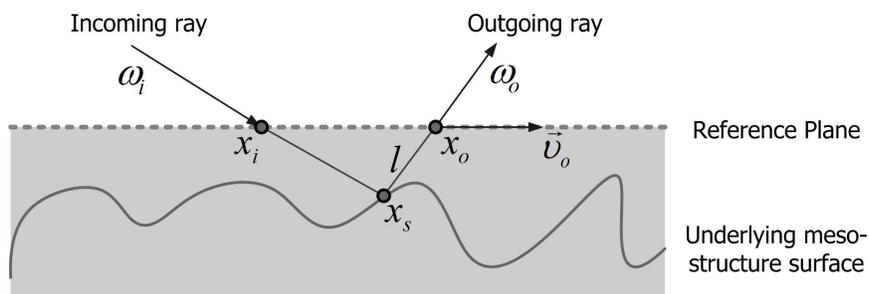


图 4.3: 细微结构距离函数MDF的定义

这样根据MDF数据确定了入射点 $x_i$ 后，在绘制的时候每个出射点 $x_o$ 就可以根据这个位置采样到正确的入射光强进而参与着色运算。

### 4.3 几何细微结构深度函数的获取

给定一个BTF，对应的MDF记录了细微结构表面沿着BTF某一视线方向到参考表面的距离，如图4.4 (a和c是顶部视点下的BTF数据，b和d是对应的MDF数据)。MDF是一个4维函数 $l = D(x, y, \theta, \phi)$ ，其中 $(x, y)$ 表示纹理坐标，单位向量 $(\theta, \phi)$ 是球形坐标系下BTF某一采样视点方向。如图4.3所示，对于一个给定的方向 $(\theta, \phi)$ ，参考表面上的一点 $x_o$ 沿着 $(\theta, \phi)$ 方向相交到细微结构面上一点 $x_s$ ，函数 $D(x, y, \theta, \phi)$ 就定义了 $x_o$ 到 $x_s$ 之间的距离。为了简化细微结构可见性的计算，我们在细微结构面上方的参考面上定义BTF和MDF。

我们的BTF+MDF测量设备采用了3.1中提到的设计。由一个由激光光源和一个扫描控制器组成的激光扫描单元。激光扫描单元加在了一个现有的BTF测量系统上面，为每一个BTF测量其对应的MDF。特别地，我们为BTF的每一个视点方向 $\omega_o$ 生成一个深度图像 $D_{\omega_o}(x, y) = D(x_o, \omega_o)$ 。理论上，我们可一个单独建立一个激光扫描器去测量MDF。但是将MDF和BTF测量装置建造在一起，可以避免不同成像系统间的相互对准问题。我们的激光扫描单元可以很容易的搭建并且很容易加到已有的BTF采集设备上面。

#### 4.3.1 细微结构距离函数的数据采集

MDF测量过程包括3步：首先，我们将激光束发射到需要测量的材质样本上，当激光束扫描样本的时候，每一个相机都会记录一个图像序列。对于一个给定视点方向 $\omega_o$ 上的照相机，激光束经常会被正在测量的细微结构部分遮挡。因此必须从多个光源位置往扫描样本分别投射激光束，使得细微结构中的每一点至少有一次在照相机中是可见的。这样，对于每一个视点方向，我们都得到了一系列的激光扫描图像序列，

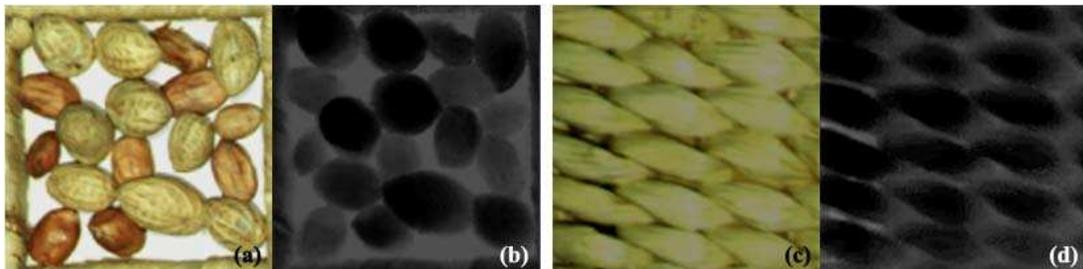


图 4.4: 双向纹理函数以及对应的细微结构距离函数(样本:花生盒子, 草编)

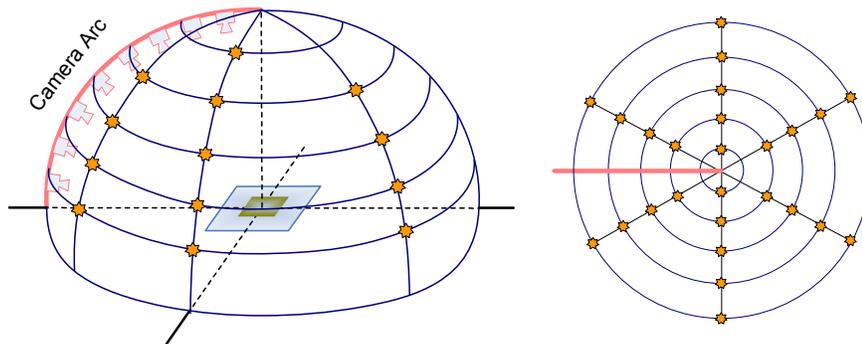


图 4.5: 细微结构距离函数MDF的采样位置

每个序列都对应于一个光源位置。然后我们应用空间-时间分析方法从每一个图像序列中重构得到一个深度图像。最后，对每一个视点方向 $\omega_o$ ，我们合并其各个光源方向下恢复的深度图像得到 $D_{\omega_o}(x, y)$ 。如图 4.5所示，对每一个视点方向 $\omega_o$ ，我们从26个光源位置扫描材质样本。图中激光发射器的位置用橙色点标出。目前，我们只是简单的将激光发射单元手动布置在光源固定拱上(每个拍摄过程换5次位置)。当然，我们也可以在光源固定拱上同时放置5个相同的激光发射器或是使用一个可移动激光发射器。因为激光扫描器离转盘比较远，我们可以注意到一次扫描中所有的激光平面（一个激光平面就是激光束和激光光源所在平面）都是平行的。细微结构表面的互反射会给扫描图像带来噪音。我们使用一个比较快的快门速度来解决这个问题，这样互反射就会曝光不足，以便在后期处理中去掉。或者，我们也可以给材质样本上面涂上漫反射的涂料。

在为一个激光光源的位置记录扫描图像时，我们首先计算激光平面和参考平面(载物平台)的夹角。为了计算这个角度，我们把激光束投射到两个高度不一样的平面上，从两张扫描图片计算出激光束在两个平面上的偏移量。根据这个偏移量，我们可以计算出激光平面和参考平面之间的夹角。一旦这个角度计算出来，材质样本的扫描图像就会被自动保存。特别地，我们将光源和载物台旋转到的位置。当激光束扫描材质样本的时候，每个BTF相机就会以7.5赫兹的频率记录下一个扫描过程的图像序列。一个MDF获取阶段在几何校准之后(3.1.2节)将生成一系列的激光扫描图像序列，对应于激光光源方向 $\omega_i$ 和视点方向 $\omega_o$ 的图像序列则表示成 $\{I_{\omega_i, \omega_o}(x, y, t)\}$ 。

### 4.3.2 细微结构距离函数的数据处理

**初始深度图像** 根据每一个激光扫描图像序列 $\{I_{\omega_i, \omega_o}(x, y, t)\}$ ，我们使用空间-时间分析法去计算距离图 $D_{\omega_i, \omega_o}(x, y)$ [Curless and Levoy, 1995]。类似的方法也被用来扫描阴影[Bouguet and Perona, 1998]。在空间-时间分析之前，我们分两步对每一个扫描图像 $I_{\omega_i, \omega_o}(x, y, t)$ 计算激光平面。第一步是在扫描图上探测激光扫描线。在材质样本

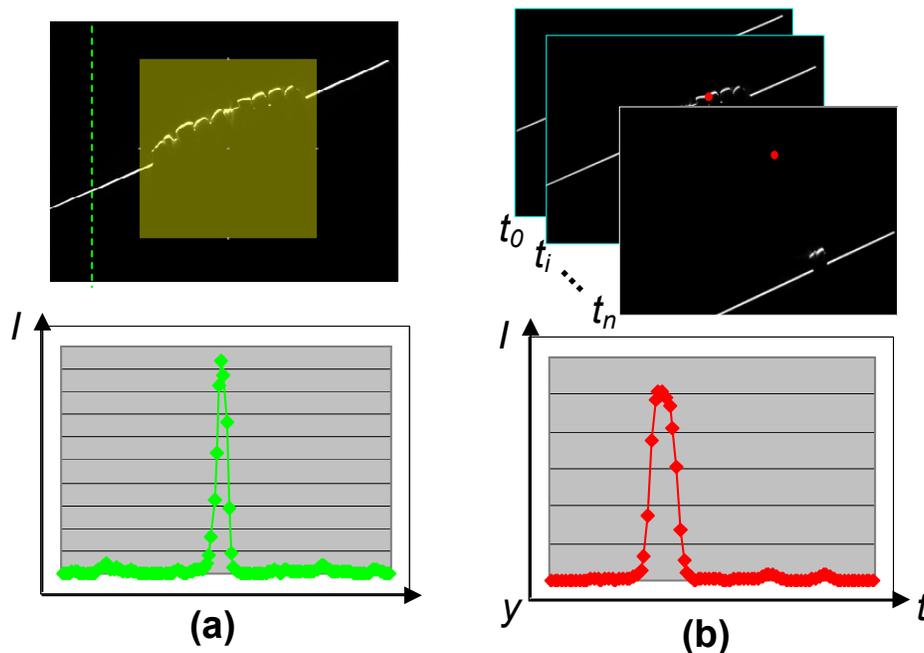


图 4.6: 初始深度图像的分析过程

的包围盒之内，我们将  $I_{\omega_i, \omega_o}(x, y, t)$  分成两部分：只包含载物台的参考区域和材质样本成像的采样区域。这个包围盒是在拍摄之前人工指定的，如图 4.6a 中的绿色矩形区域。在参考区域，激光束应该是直线因为参考区域是平的。如图 4.6a 所示，图中底部的绿色曲线对应于垂直线上各个像素点的亮度值。为了找到激光扫描线，我们搜索参考区域，沿着扫描方向(和激光扫描线垂直)去寻找可能在这条线上的候选像素。由于候选像素比图像上其它点亮很多，所以使用一个指定的阈值就很容易去掉周围像素。为了减少噪音点，我们在搜索先之前对图像进行高斯滤波。第二步，我们通过将激光扫描线从  $I_{\omega_i, \omega_o}(x, y, t)$  投影到 3D 参考平面来计算对应的激光平面。求出了所有图像的激光平面以后，就可以使用空间-时间分析方法进行分析了。如图 4.6b 所示，图中底部的红色曲线对应于某个像素点在整个扫描序列过程中的亮度值变化。峰值点对应于该像素点为一个细微结构表面的时间值。对采样区域的特定像素  $(x_p, y_p)$ ，我们搜索整个图像序列  $\{I_{\omega_i, \omega_o}(x_p, y_p, t)\}$ ，以寻找最亮的  $(x_p, y_p, t_0)$ 。如果  $I_{\omega_i, \omega_o}(x_p, y_p, t_0)$  的亮度大于指定的阈值，那么这个像素  $(x_p, y_p, t_0)$  就是一个细微结构点  $x_s$  的映射。我们通过将像素  $(x_p, y_p, t_0)$  投影到图像  $I_{\omega_i, \omega_o}(x, y, t_0)$  的激光平面来找到  $x_s$ 。然后我们计算从参考平面到  $x_i$  点的距离值(这个可以用先前检测到的激光扫描线方程得到)，并且把结果存在初始深度图像  $D_{\omega_i, \omega_o}(x_p, y_p)$  中。图 4.7 中的 (a) 和 (b) 是同一视点方向两个不同激光扫描方向下重构的初始深度图像。如果  $I_{\omega_i, \omega_o}(x_p, y_p, t_0)$  比指定的阈值小，那么像素  $(x_p, y_p, t_0)$  就对应于一个被遮挡的细微结构点，在这种情况下，我们设定  $D_{\omega_i, \omega_o}(x_p, y_p) = -1$ ，标记为该激光扫描方向下被遮挡的点，图 4.7 (a)(b) 中的

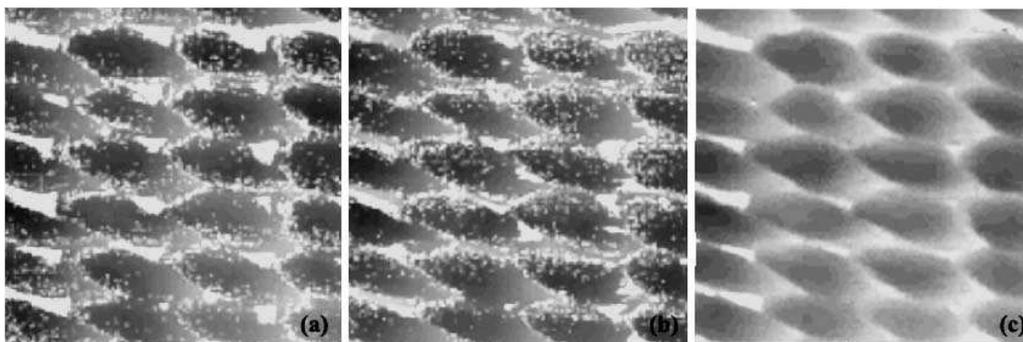


图 4.7: 初始深度图像和融合后深度图像的比较(样本:草编)

细碎的白点。

**合并深度图像** 对于每一个视点方向 $\omega_o$ ，我们合并所有的初始深度图像 $D_{\omega_o, \omega_i}(x, y)$ 生成 $D_{\omega_o}(x, y)$ 。图4.7中的(c)是合并包括(a)(b)在内的这个视点方向下所有用不同激光扫描方向下的扫描序列恢复的初始深度图像。合并步骤本质上是对各个初始深度图像的加权求和：

$$D_{\omega_o}(x, y) = \frac{\sum_{\omega_i} \tau(\omega_o, x, y) D_{\omega_o, \omega_i}(x, y)}{\sum_{\omega_i} \tau(\omega_o, x, y)} \quad (4.44)$$

其中 $\tau(\omega_o, x, y)$ 是各初始深度图像合并时的权重函数：

$$\tau(\omega_i, x, y) = \begin{cases} 0 & D_{\omega_o, \omega_i}(x, y) = 0 \\ \nu(\omega_i) & D_{\omega_o, \omega_i}(x, y) \neq 0 \end{cases} \quad (4.45)$$

权重函数在碰到被遮挡的点(记为-1)的时候取0，在其他的正常的像素位置则取激光光源位置、照相机位置和激光线上穿过载物台旋转中心的两点形成的四面体的体积 $\nu(\omega_i)$ [Bouquet and Perona, 1998]。在理论上可能出现某些位置始终被遮挡，也就是

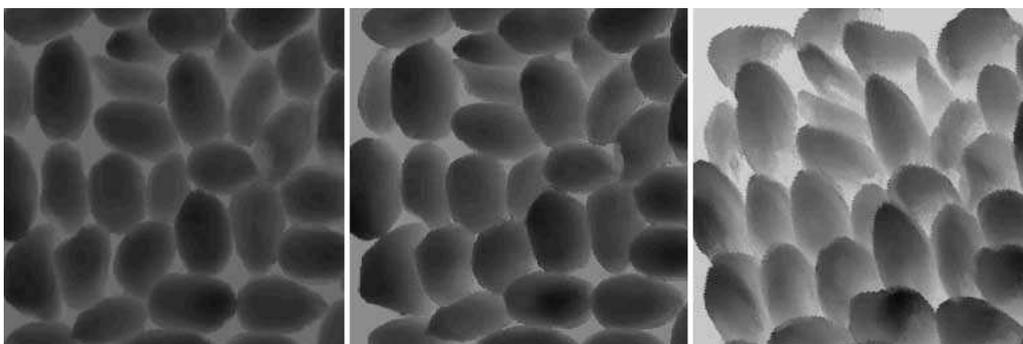


图 4.8: 几个不同视点方向下的MDF图像(样本:花生)

会出现 $\sum_{\omega_o} \tau(\omega_o, x, y) = 0$  的情况。对于这样的点，所形成的无效区域，我们可以用图像处理的补洞(hole filling)方法[Bertalmio et al., 2000, Ballester, 2001] 作特殊处理，但在实际的情况中，这种区域占总区域的1%以下。图4.8给出了最终得到的细微结构距离函数数据的几个特定视点方向下的深度图像。

## 4.4 全效果几何细微结构的实时绘制

双向纹理函数被映射或者合成[Tong et al., 2002]到几何网格表面以后，对应的细微结构距离函数也可以使用相同的纹理坐标映射到表面上。利用映射到表面的MDF数据我们可以绘制细微结构轮廓和细微结构轮廓的自阴影，也可以用来增强双向纹理函数的绘制效果使其能够处理不均匀的入射光强。这些都可以在显卡的像素着色器中实现，进行有图形硬件加速的实时绘制。这里我们只讨论局部光照的情况(方向光源或点光源)，全局光照的情况可以结合下面讨论的方法和全局光照下BTF绘制算法[Sloan et al., 2003b]来实现。

### 4.4.1 处理双向纹理函数绘制中的不均匀光照

为了绘制高真实感的BTF映射的表面，我们还需要考虑投射到BTF表面的不均匀光照的情形，典型的例子就是阴影的边缘。现有的一些绘制算法的问题在于在阴影边界处没有考虑细微结构所造成的入射点偏移效果。图4.9(a) 显示了目前的BTF绘制算法进行阴影测试的例子，假定入射点和出射点相同。参考平面上的两点 $p_1$ 和 $p_2$ ，有同样的视点方向 $v$ 和光源方向 $l$ 。如果不考虑细微结构，我们会错误地将两个点都绘制成亮的。而正确的情况如图4.9(b)所示， $p_2$ 点应被判定为阴影内部，从而绘制成暗的。为了得到真实的阴影，我们需要考虑大尺度的物体阴影投射到细微结构上面发生的偏移，MDF表达了计算这个偏移所需要的几何信息。简单起见，我们假设光源是点光源，投射的是硬阴影。如图 4.10所示，表面上每

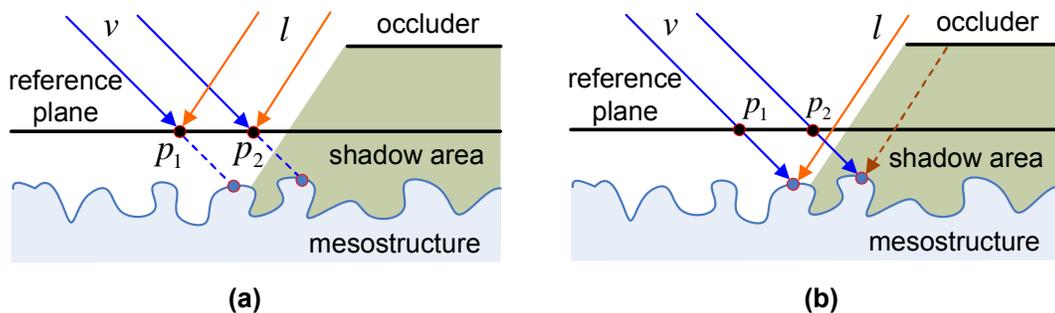


图 4.9: 细微结构造成入射点在参考平面上的位置偏移

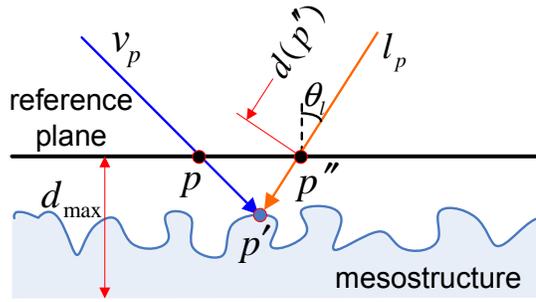


图 4.10: 阴影判定计算的几何示意图

一个点 $p$ ，它的纹理坐标是 $(x, y)$ ，我们可以找到通过 $p$ 点的视线与细微结构相交的点 $p'$ ， $p' = p + s D(x, y, v_p) \cdot v_p$ ，其中 $s$ 是纹理缩放系数即纹理空间和物体空间的尺度缩放比例， $v_p$ 是纹理空间坐标系中的视线方向。通过使用阴影贴图(Shadow map)方法[Williams, 1978]，我们可以测试 $p'$ 是否在细微结构阴影中。因为细微结果的自阴影的效果已经包含在了BTF中，所以我们只为BTF贴图表面生成其作为遮挡物的阴影贴图，其中每一点的深度是从细微结构的参考平面去测量。如图4.10所示， $p''$ 点的阴影贴图深度为 $d(p'') + \frac{d_{max}}{\cos \theta_l}$ ，其中 $d(p'')$ 是从光源到该点的深度，可以使用大尺度几何计算， $d_{max}$ 是细微结构的最大深度。这部分算法可以很容易地和细节轮廓可见性计算算法集成在一起，表4.1给出了完整的绘制算法。特别的，为了生成阴影贴图，我们将 $z(p_f) + \frac{d_{max}}{\cos \theta_l}$ 写入阴影缓冲区，其中 $\theta_l$ 是在 $p_f$ 局部坐标系下光源的方向，为了绘制最终的结果，我们用 $p_f$ 的深度值 $z(p_f) + d(p_f)$ 计算细微结构上的点。根据各点是否处在阴影中，我们使用一个漫反射光强 $L_a(x, v_p)$ 或者BTF函数值 $\rho_{BTF}(x, v_p, l_p)$ 来对该点进行着色，其中 $L_a(x, v_p)$ 是BTF函数在半球面 $\Omega$ 上的所有光源方向 $\omega_l = (\theta_l, \phi_l)$ 的积分。

$$L_a(p, v_p) = \int_{\Omega} \rho_{BTF}(p, v_p, \omega_l) d\omega_l. \quad (4.46)$$

#### 4.4.2 判定双向纹理函数绘制中的细节轮廓可见性

使用MDF我们可以绘制细微结构轮廓(图4.11b)和带细微结构轮廓的阴影(图4.11c)。图4.11中(a)是用来绘制(b)和(c)的几何网格，比较(a)和(b)可以看到图中的环状突起都是由细微结构来表达的。这两种效果都与细微结构引起的可见性有关。对于细微轮廓来说，可见性就是指从视点出发，是否能看见该细微结构上的点(或穿透，看到背景)；对于阴影的细微轮廓来说，可见性就是指从光源出发的可见性。这里讨论的可见性算法仅限于闭合物体。

图 4.12展示了计算细微结构轮廓的算法。简单起见，我们仅考虑在2维情况下的轮廓判断问题(通过对图像的每条扫描线使用轮廓判断算法，就可以将3维的问题转化

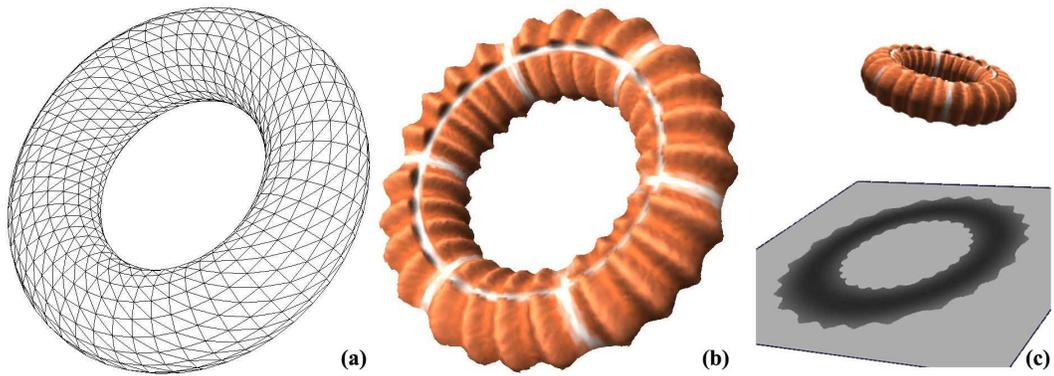


图 4.11: 视点和光照方向的细节轮廓可见性

为2维)。考虑从视点方向发出的光线 $r_0$ ，它从物体的正向表面上的点 $p_f$ 进入，从反向表面上的点 $p_b$ 离开。用点 $p_f$ 处的MDF值 $D(p_f, v_f)$ ，我们可以计算沿着 $r_0$ 方向从 $p_f$ 到细微结构表面的距离 $d_f = D(x_f, v_f)s_f$ ，其中 $s_f$ 是指 $p_f$ 点的纹理缩放系数， $x_f$ 是 $p_f$ 点的纹理坐标， $v_f$ 是视点方向 $r_0$ 在 $p_f$ 点局部坐标系中的值。类似地，从点 $p_b$ 到细微结构表面的距离是 $d_b = D(p_b, v_b)s_b$ 。如图 4.12所示，如果 $d_f + d_b \leq \|p_f - p_b\|$ ，那么光线就会和映射上去的细微结构相交，否则，光线就会穿透细微结构而不相交。如果光线可能和物体相交很多次，那么我们就需要从前到后对每一对 $p_f$ 和 $p_b$ 进行计算来判定映射在表面上的细微结构的可见性，直到某一次可见为止。为了在图形硬件上实时绘制细微结构轮廓，我们可以使用深度剥离(depth peeling)技术[Mammen, 1989, Diefenbach, 1996]去为物体内部的每一段计算 $p_f$ 和 $p_b$ 。表4.1给出了基于深度剥离方法的绘制伪代码，其中 $x(p_*)$ 代表 $p_*$ 点的光栅化后的二维坐标， $z(p_*)$ 是光栅化后的深度值。在开始剥离绘制之前，我们首先初始化深度缓冲区和stencil缓冲区，我们还需要两个额外的缓冲区 $Z_{peel\_now}$ 和 $Z_{peel\_next}$ ，用来存储当前阶段和下一个剥离阶段的最小深度。我们的算法从正面到反面进行深度剥离。在每个剥离阶段，我们首先绘制反向表面。我们使用 $Z_{peel\_now}$ 和深度缓冲区 $Z$ 去计算当前剥离层反向表面的像素 $p_b$ ，这个像素的深度存储在 $Z_{peel\_next}$ 中。我们然后将MDF值添加到这些像素的深度上并将结

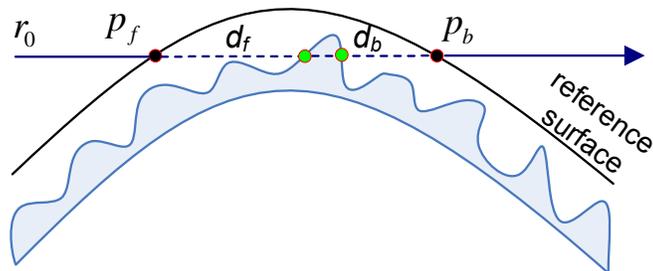


图 4.12: 细微轮廓的可见性判定

```

Set stencil buffer  $\mathbb{S}$  to unmasked;
Enable stencil test;
Enable depth test;
Set  $Z_{\text{peel\_next}}$  to 0.0;
For each peeling pass;
  Set depth buffer  $\mathbb{Z}$  to far plane;
   $Z_{\text{peel\_now}} = Z_{\text{peel\_next}}$ ;
  Enable writing of depth buffer  $\mathbb{Z}$ ;
  Render all back faces
  For all pixels  $p_b$  of back faces (pixel shader)
    If  $\mathbb{S}(x(p_b))$  is not masked
      If  $z(p_b) \geq Z_{\text{peel\_now}}(x(p_b))$  and  $z(p_b) < \mathbb{Z}(x(p_b))$ 
         $Z_{\text{peel\_next}}(x(p_b)) = z(p_b)$ ;
        Compute  $d(p_b)$  with MDF;
         $\mathbb{Z}(x(p_b)) = z(p_b) - d(p_b)$ ;
      Disable writing of depth buffer  $\mathbb{Z}$ ;
  Render all front faces;
  For all pixels  $p_f$  of front faces (pixel shader)
    If  $\mathbb{S}(x(p_f))$  is not masked
      Compute  $d(p_f)$  with MDF
      If  $z(p_f) > Z_{\text{peel\_now}}(x(p_f))$  and  $z(p_f) + d(p_f) < \mathbb{Z}(x(p_f))$ 
        Mask  $\mathbb{S}(x(p_f))$ 
        Compute light space coordinate  $l_{p_f}$  of point  $(x(p_f), z(p_f) + d(p_f))$ 
        Fetch irradiance  $L_{p_f}$  at  $l_{p_f}$  in shadow map
        Shade  $p_f$  with BTF value multiply with irradiance  $L_{p_f}$ 

```

表 4.1: 细微结构距离函数MDF的硬件加速绘制伪代码

果( $z_{p_b} - d_b$ )存储在深度缓冲区中。完成这些之后,我们将深度缓冲区置为不可写,然后绘制所有的正向表面。对于通过了剥离深度测试的像素 $p_f$ ,我们可以把它们的偏移深度和 $z_{p_f} + d_f$ 与存储在深度缓冲区中的 $z_{p_b} - d_b$ 进行比较(用深度测试来实现),如果 $z_{p_f} + d_f \leq z_{p_b} - d_b$ ,那么光线会和 $p_f$ 和 $p_b$ 之间的细微结构相交。否则,光线直接从这一层中通过。对于光线和细微结构相交的点,我们根据视点和光源的方向用BTF数据绘制 $p_f$ 。接着,我们使用stencil缓冲区过滤着色的像素,防止在后面的剥离中影响到这些值。然后我们交换深度缓冲区,做下一层的剥离。理论上讲,剥离的操作需要一直进行下去,直到没有像素可以被更新。目前我们的实现中,不同场景剥离的深度都是用户事先给定的。通常1到2次的剥离已经可以满足需要。细微结构轮廓阴影的绘制使用类似表4.1的方法,仅有的区别在于不是使用视点方向而是使用光源方向,绘制表面像素 $p_f$ 不是使用BTF数据而是将它们的深度值绘制到阴影贴图缓冲区中。

#### 4.4.3 基于硬件加速的实现细节

我们在一台P4 2.8GHz CPU的PC上,用GT6800显卡实现了上述基于硬件加速的

绘制算法。在我们的实现中，我们首先根据光源方向绘制阴影贴图(shadow map)，然后从视点方向使用压缩后的BTF和MDF数据绘制最终结果。为了在绘制中采样BTF和MDF数据，我们首先计算纹理缩放系数 $s$ ，视点方向 $\omega_o$ ，光源方向 $\omega_i$ ，纹理坐标 $x$ ，和逐一个顶点的纹理坐标的局部坐标系。光栅化之后，每个像素的各个属性值将通过所在三角形的顶点的对应属性值插值得到。

为了在图形硬件中加载BTF数据，我们用基于主成份分析(PCA)的数据压缩方法将6维的BTF数据分解为几个低维表[Kautz and McCool, 1999]。具体的，我们将6维的BTF重新组织成一个2维的矩阵 $A$ ，其中每行包含图像位置 $x$ 和入射角 $\omega_i$ 的变化，每一列包含视点方向 $\omega_o$ 的变化。对 $A$ 应用主成份分析生成一系列的4维特征向量表 $E_i(x, \omega_i)$ 和对应的2维的系数表 $W_i(\omega_o)$ 。通过保存前几个重要的特征向量(本文中所有的BTF数据都取了4个特征向量)，这样6维的BTF数据就可以被很好的压缩和重建，如下式所示：

$$\rho_{BTF}(x_o, \omega_o, \omega_i) = \sum_i W_i(\omega_o) \cdot E_i(x, \omega_i) \quad (4.47)$$

我们当前的实现中，我们把压缩后的4维的特征表重新组织，存储在3维的纹理中便于绘制，也就是说将光源的仰角方向也放到第三个维度中去。至于要绘制4维的MDF数据，不需要压缩，我们直接将其重组存成3维的纹理，即将视点的仰角方向放到第三个维度中去。我们使用三线性插值来进行纹理采样。

## 4.5 结果及讨论

表 4.2列出了本文中用到的所有的MDF和压缩过的BTF数据，其中花生盒子和编织物的数据是使用我们的BTF和MDF获取系统从真实材料中测量得到的。其它数据是通过计算机合成的方法得到的。对于BTF数据，我们存储的都是获得的24位的RGB图像，MDF深度数据都被量化成为每像素8位存在MDF中。注意到4维的MDF数据很小，可以完全加载到显卡中而不用压缩。图 4.15展示了一个使用从真实材质测量得到

样本	图片分辨率	光源&视点分辨率	BTF(MB)	MDF(MB)
花生盒子 (图4.15中的地面)	128 × 128	12 × 8 × 12 × 8	7.5	6.3
草编 (图4.15中的物体)	128 × 128	12 × 8 × 12 × 8	7.5	6.3
蓝色蛇管 (图4.1中的物体)	64 × 64	12 × 5 × 12 × 5	1.3	0.9
红地砖 (图4.1中的地面)	64 × 64	12 × 5 × 12 × 5	1.3	0.9
草皮 (图4.16中的物体)	64 × 64	12 × 8 × 12 × 8	5.3	3.9
白地砖 (图4.17(b))	64 × 64	12 × 5 × 12 × 5	1.3	0.9

表 4.2: BTF/MDF数据的采样分辨率和数据大小

场景	片面数	仅绘制BTF(FPS)	仅绘制轮廓(FPS)	完整效果(FPS)
图4.1	11,952	186	75	47
图4.15	3,200	110	42	27
图4.16	11,952	115	30	18
图4.17(a)	4,276	186	75	49
图4.17(b)	4,276	110	40	25
图4.17(c)	4,276	115	85	44

表 4.3: 不同场景BTF/MDF的绘制帧率。

的BTF和MDF数据绘制的场景。无论是圆环上的编织物BTF/MDF数据还是地面上的花生盒子BTF/MDF数据，都是从真实材质中得到的。细微结构轮廓和细微结构轮廓阴影是通过两次深度剥离过程来绘制的。注意MDF和BTF绘制出来的很多效果，比如圆环的轮廓，投射到地面的轮廓阴影。同样，投射到地面的轮廓阴影也考虑了地板的BTF中所隐含的隐式几何信息。图 4.16展示了一个合成的草和砖BTF绘制的场景，其中使用了3层深度的剥离过程。圆环的细微结构绘制得很真实。同样注意投射到地面的细微结构的影子。另一个使用BTF/MDF数据绘制的结果如图 4.17所示，这里使用了2层深度的剥离过程来绘制细微结构的轮廓。表 4.3列出了我们的算法在绘制文中提到的各个场景中的性能，输出图像的分辨率均为800\*600。

这里需要指出的是，其一，BTF的测量是在均匀光源的照射下进行的。大尺度的遮挡物的引入的了光源的空间变化(如阴影)，这对细微结构的互反射有一个细微的但很复杂的影响，本文没有涉及。从绘制效果上来说，我们的方法只能绘制比较硬的阴影了，如果模拟的互反射比较精确的话，能得到更加软的阴影。这是一个使用BTF的方法的一个通病。其二就是BTF和MDF的数据是从一个平板上面获得的，但是用在了绘制任意曲面上，我们的以剥离为基础，间隔深度测试绘制算法仅仅是对曲面上细微结构变形的一种近似。图 4.13给出了分别使用BTF数据，BTF/MDF数据，以及高密度几何网格(即将细微结构表达在几何网格上，其绘制结果可以认为是精确的参考)绘制圆柱的比较。其中高密度几何网格的圆柱是用光线跟踪算法绘制的。注意到我们的方法得到了比较真实的视觉效果，和使用高密度几何网格的绘制是一致

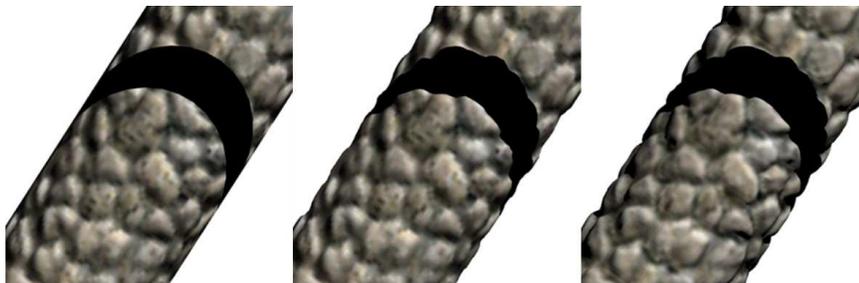


图 4.13: 单纯BTF绘制结果、BTF+MDF绘制结果和真实绘制结果的比较

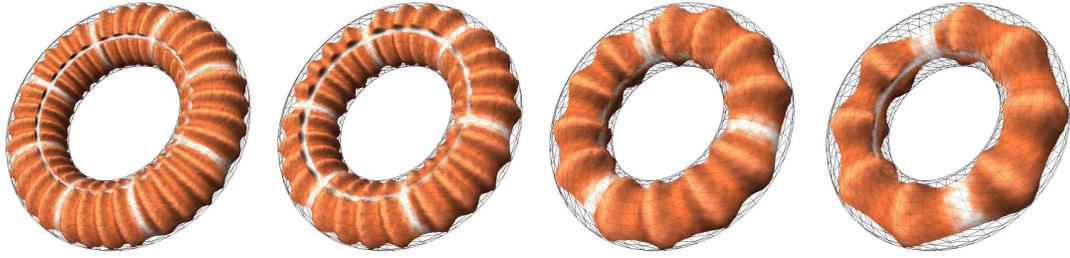


图 4.14: BTF/MDF数据在不同的纹理平铺倍数下的绘制结果。

的。特别的，我们的算法绘制的阴影区域和物体的边界轮廓都和高密度几何网格很相似，这些效果是单纯的BTF绘制方法所不能实现的。我们的轮廓近似方法也是相当鲁棒的，能够适应曲面不同的曲率，生成相当一致的绘制结果。图4.14给出了同一个物体，在不同纹理平铺倍数时(映射后纹理空间的曲率由小到大)的绘制结果，其中纹理平铺倍数依次为 $8 \times 3$ 、 $6 \times 2$ 、 $3 \times 1$ 、 $2 \times 1$ 。甚至对于极端情形，如图中的(d)列以纹理平铺倍数为2进行映射，细微结构和轮廓的变化与曲率的增大仍旧十分吻合。

## 4.6 本章小结

我们提出了一个BTF的扩展方法，使用细微结构距离函数(MDF)加入了以前被忽略的精细轮廓效果并使之可以处理不均匀光照的情形。MDF数据可以在不增加BTF获取工作量的基础上获得。我们展示了如何通过实测数据得到MDF表达，并同时得到BTF数据。同时也提出了基于BTF/MDF的硬件加速实时绘制算法。我们展示了逼真的阴影和轮廓效果，包括首创性的投射到细微结构表面的逼真阴影偏移效果。我们的结果证明，我们的方法是一种高效的能够捕获并绘制BTF映射表面的所有由几何细微结构产生的重要视觉效果的方法。

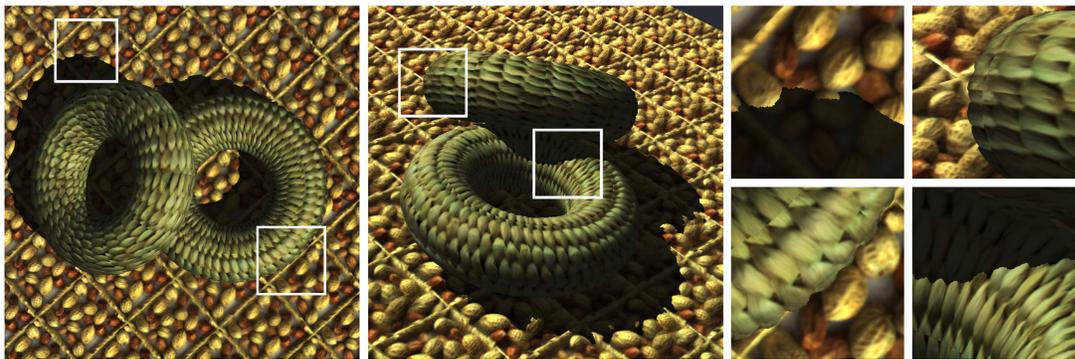


图 4.15: 真实采样的BTF/MDF材质贴图表面的绘制结果。

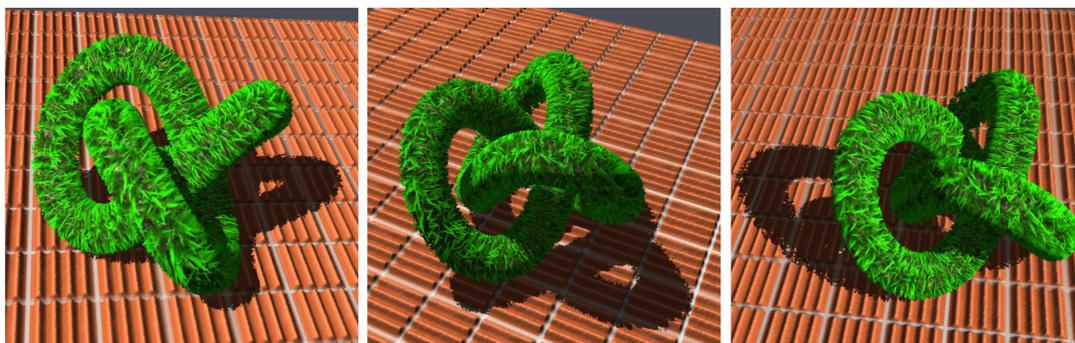


图 4.16: 合成BTF/MDF材质贴图表面的绘制结果。

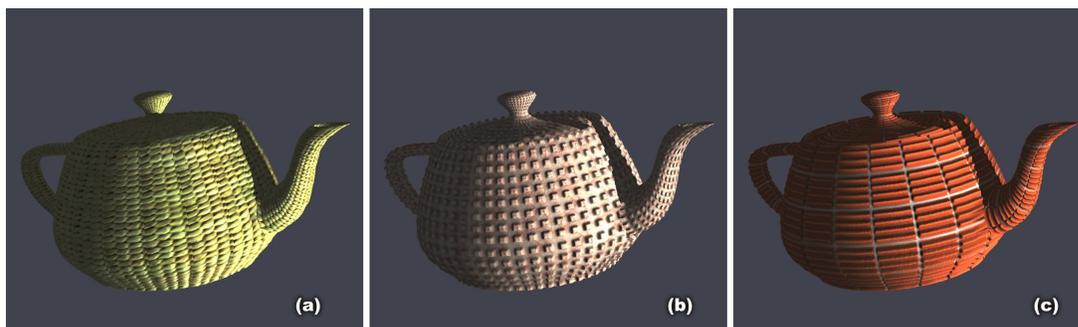


图 4.17: 带阴影和轮廓效果的BTF/MDF贴图表面的三个例子。

## 第五章 准同质半透明材质模型

在自然界中许多非同质半透明材料，是由均匀分布的异质颗粒构成的。对这些准同质半透明材料进行真实感绘制是极富挑战性的，因为这些材料具有复杂的表面变化的次表面散射特性[Hanrahan and Krueger, 1993]。同时，这些材料往往还具有复杂的表面细微结构[Koenderink et al., 1996]。这些细微结构不仅造成了不同的表面反射，同时也影响到光线的入射、出射方式，如图5.1。正如Alain Fournier[Fiume, 2001]提到的，对于面包这类材料结构和光学特性都很复杂的材质，现有的图形学方法还不能方便地绘制它们。

准同构半透明材料以及其他的异质材料都能用双向次表面反射分布函数(BSSRDF)[Nicodemus et al., 1977] 来描述。可惜的是，获取一个BSSRDF是非常困难的。现有的测量同质材料BSSRDF的方法[Jensen et al., 2001]目前还无法应用到异质材料上。另一个对准同质材料进行建模的方法，是人工建立描述次表面散射特性的体材质模型。然而，建立这样的模型是非常复杂的[Chen et al., 2004]。在绘制过程中，人工建立体材质模型需要对光线传播进行蒙特卡罗模拟，这样做的代价是也很大的[Dorsey et al., 1999][Pharr and Hanrahan, 2000]。这里，我们提出了一种对准同质材料进行建模和绘制的方法。这种方法中使用的材质模型数据可以便捷地从现实物体采

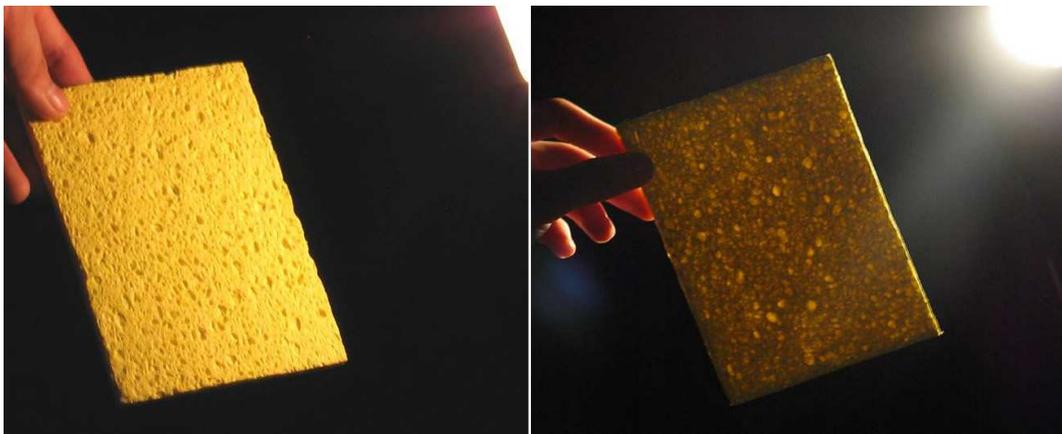


图 5.1: 准同质半透明材质模型的实物示例

集得到。这种材质模型可以被应用于具有任意几何外观的物体上，并且可以高效地绘制该物体而避免了对物体进行次表面光线传播过程的物理模拟。为了强调这种模型能够被广泛的应用于任意的几何模型上，以及区别与基于图像的建模和绘制中广泛应用的“物体模型”(例如[Goesle et al., 2004])，我们称这种模型为“材质模型”。材质模型描述的是光线在这种材质中传播的方式，而物体模型描述一个特定真实物体的外观。和材质模型不同，通过一个给定的半透明物体获取的物体模型无法被应用到不同几何形状的物体上。这是因为每个表面点的出射光场不是由局部属性，而是由光线在整个物体中的传播决定的。

我们的材质模型基于这样的观察：准同质材料的次表面散射特性可以从两个不同的尺度来测量和分析。在局部，物体表面的外观是是异质的并具有各向异性的次表面散射现象。从更大的尺度来看，由于其中的异质微粒是均匀分布的，材质中各点附近的组成和结构在统计意义上是相似的。故而光线在这类材料内部的传播在整体上和同质材料中的传播过程类似。因此这个尺度上的散射特性我们可以通过均质材料的次表面散射模型[Jensen et al., 2001] 来近似地刻画。

根据准同质半透明材质局部异质、全局同质的特点，我们得出了一个由四个分量构成的材质模型：一个用于描述全局光线传输的同质次表面散射分量；一个局部反射函数(local reflectance function)；一个细微结构入射函数(mesostructure entrance function)；一个细微结构出射函数(mesostructure exiting function)。后三个分量用于描述局部细微结构对散射光线的影响，包括各向异性的局部次表面散射，细微表面结构带来的表面反射，以及光线经过细微表面结构入射、出射的时候产生的视觉效果。实践中，通过采集真实物体在不同光照和观察方向下的激光线扫描图像、平行光照图像等数据，并对这些图像数据进行分析，我们就可以得到这四个分量。

我们对多个真实世界中的准同质半透明物体进行了实验，结果证实了我们的技术是行之有效的。尽管其中一些材料在 CURET 数据库 [Dana et al., 1999] 中已经以双向纹理函数(BTF)的形式给出了描述，但对于全局光线散射过程BTF只能描述物体在特定的几何形状和尺寸下的外观。当几何形状和尺寸发生变化时，BTF对全局光线散射成分的描述是不正确的，无法处理光线在任意几何形状内部的散射情况。此外，由于BTF并没有测量方向光的在物体内部的传输，因此用BTF模型得到的半透明物体绘制结果是错误的，尤其是有较多光线透过物体从细微结构表面出射的时候。在我们的模型中，细微结构入射、出射函数被用于解决这个问题。

## 5.1 半透明材质建模方式

在半透明物体的建模和渲染的研究工作中，按照建模的方式可以分成材质模型和物体模型两大类。材质模型通常基于对光线全局传输过程的模拟，可以应用于任意几何形状的物体的绘制。而物体模型通常基于图像建模，只能用来绘制采样外观时的特定形状的物体。

### 5.1.1 物体模型

基于图像建模的物体，采集数据比材质模型容易很多。而且，次表面散射、表面细微结构等视觉效果都能被自然地包含到模型中来。由于视点方向和光照条件的不同，物体外观的变化具有很高的自由度。物体模型方法只是记录物体部分可能的外观。Surface light fields[Wood et al., 2000] [Chen et al., 2002]，在给定的光照条件下，从不同的视角测量一个物体的外观。Reflectance fields [Debevec et al., 2000][Masselus et al., 2003]则固定视角，测量不同光照条件下的物体外观。Matusik等[Matusik et al., 2002b] 则提出在平行光条件下，在任意视角测量Reflectance fields的方法。对于测量透明的，或者高度散射的半透明的物体，可以用environment matting技术测量光线折射效果[Matusik et al., 2002c] [Zongker et al., 1999] [Chuang et al., 2000]。

对于异质半透明物体，DISCO采样系统[Goesele et al., 2004]重构一个对应于光线入射、出射点的四维次表面散射函数，而与光照方向和视角方向的相关性则被忽略。物体表面被认为是光滑的因而可以对全局光线传播进行精确的插值。由于要求表面光滑的限制，当光线通过细微表面结构入射、出射的时候，DISCO将无法正确采集数据。为了独立于具体物体形状，我们由图像恢复材质模型。这个材质模型可以被应用到任意几何形状的物体上。另外，我们测量了光线通过细微表面结构的传输情况。

### 5.1.2 材质模型

计算机图形学中最为常用的材质模型，是[Nicodemus et al., 1977]中提出的反射分布函数(BRDF)。BRDF可以看作对BSSRDF的一个简化。由于这种简化不考虑光线在物体内部的传播，因此BRDF主要用于描述均质不透明的材料。许多技术(如[Ward, 1992][Matusik et al., 2003])可以用于测量真实物体，并获取BRDF的模型数据。对于异质的不透明材料，通常用表面变化的BRDF(SVBRDF)来描述，如[Gardner et al., 2003]。[Dana et al., 1999]中提出的BTF则可以处理细微表面结构，并且可以通过这种方法获取模型数据(例如[Dana, 2001][Han and Perlin, 2003])。多项式纹理映射(PTM)[Malzbender et al., 2001]也可以处理表面变化的表面反射和表面细微结

构，但是视点必须固定。BRDF，BTF以及PTM都不适合描述半透明材料，因为这些模型都没有足够多的信息用于描述物体内部次表面散射过程。例如，光的背向传输并没有被记录。

[Hanrahan and Krueger, 1993]首次将次表面散射现象引入了计算机图形学。对于同质的半透明材料，[Jensen et al., 2001]提出了一个可行的光线传输模型。与此同时，[Koenderink and van Doorn, 2001]用均质扩散方程近似模型对半透明材料进行了研究。对于有均质半透明材质构成的物体，已经有了一些高效的绘制方法[Jensen and Buhler, 2002] [Mertens et al., 2003] [Hao et al., 2003] [Lensch et al., 2003]。

对于非均质半透明材料，早期的方法是人工建立描述次表面散射特性的体材质模型，并且采用代价很大的整体光线散射物理模拟用于绘制物体[Dorsey et al., 1999] [Pharr and Hanrahan, 2000]。近期提出的壳纹理函数(STF)[Chen et al., 2004]通过预先计算光线在物体浅层的传播情况，并且将物体内部深层近似地看作一个同质的核来计算全局光线传输的方法，获得了较高的效率。然而，从真实物体采集STF的模型数据依然相当困难。在[Chen et al., 2004]中，材质样本通过其CT数据被分割成多个部分，而每个部分被当作同质材料，可以通过[Jensen et al., 2001]的方法进行测量。然而分割CT数据在医学成像技术中是一件非常耗时的工作。另外，并不是所有材质的光学属性都能够在测量表中查到。

## 5.2 准同质半透明材质的数学模型

双向次表面反射分布函数(BSSRDF)为光线在次表面的散射提供了一个一般性的模型。基于这个模型，我们提出了准同质半透明材料的材质模型。如图5.2在表面点 $x_o$ 处，沿 $\omega_o$ 方向的出射光强 $L(x_o, \omega_o)$ 可以通过对整个表面 $A$ 以及所有相关方向 $\omega_i$ 对应的入射光强 $L(x_i, \omega_i)$ 进行积分得到。即：

$$L(x_o, \omega_o) = \int_A \int_{\Omega} S(x_i, \omega_i, x_o, \omega_o) L(x_i, \omega_i) d\omega_i dx_i. \quad (5.48)$$

在这里， $dx_i = (n \cdot \omega_i) dA(x_i)$ ，其中 $(n \cdot \omega_i)$ 是照度衰减项， $dA(x_i)$ 是 $x_i$ 的微分邻域。我们将局部和整体的贡献分开计算：

$$\begin{aligned} L(x_o, \omega_o) &= \int_{A_o} \int_{\Omega} S(x_i, \omega_i, x_o, \omega_o) L(x_i, \omega_i) d\omega_i dx_i \\ &+ \int_{B_o} \int_{\Omega} S(x_i, \omega_i, x_o, \omega_o) L(x_i, \omega_i) d\omega_i dx_i \end{aligned} \quad (5.49)$$

局部贡献分量由以 $x_o$ 为中心，半径 $r_s$ 的微圆面 $A_o$ 提供。而整体贡献则来自余下的表面 $B_o = A - A_o$ ，如图5.2所示。由于光强 $L(x_i, \omega_i)$ 对 $A_o$ 所有点的贡献可以认为是

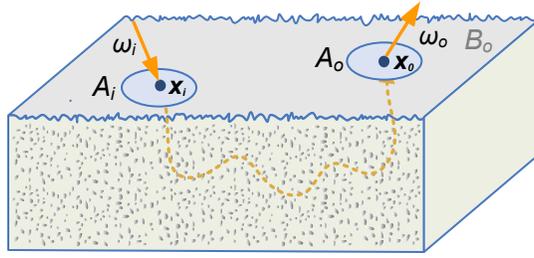


图 5.2: 在准同质半透明材料中的光线散射情况。

均匀的，所以局部贡献 $L_l(x_o, \omega_o)$ 可以写成：

$$\begin{aligned} L_l(x_o, \omega_o) &= \int_{A_o} \int_{\Omega} S(x_i, \omega_i, x_o, \omega_o) L(x_i, \omega_i) d\omega_i dx_i \\ &\approx \int_{\Omega} R(x_o, \omega_i, \omega_o) L(x_i, \omega_i) d\omega_i \end{aligned} \quad (5.50)$$

其中

$$R(x_o, \omega_i, \omega_o) = \int_{A_o} S(x_i, \omega_i, x_o, \omega_o) dx_i \quad (5.51)$$

是局部反射函数。对于整体贡献分量

$$L_g(x_o, \omega_o) = \int_{B_o} \int_{\Omega} S(x_i, \omega_i, x_o, \omega_o) L(x_i, \omega_i) d\omega_i dx_i, \quad (5.52)$$

入射光强 $L(x_i, \omega_i)$ 经过多次散射之后，我们用平均效果来近似它对 $x_o$ 产生的影响：

$$\int_{B_o} \int_{\Omega} \frac{1}{\pi r_s^2} \left[ \int_{A_i} S(x_i + r_i, \omega_i, x_o, \omega_o) dr_i \right] L(x_i, \omega_i) d\omega_i dx_i \quad (5.53)$$

其中 $A_i$ 是以 $x_i$ 为中心，半径 $r_s$ 的微圆面， $L(x_i, \omega_i)$ 在 $A_i$ 上是均匀的。由此我们可以进一步得到

$$\int_{B_o} \int_{\Omega} \frac{1}{\pi^2 r_s^4} \left[ \int_{A_i} \int_{A_o} S(x_i + r_i, \omega_i, x_o + r_o, \omega_o) dr_i dr_o \right] L(x_i, \omega_i) d\omega_i dx_i. \quad (5.54)$$

注意到

$$\int_{A_i} \int_{A_o} S(x_i + r_i, \omega_i, x_o + r_o, \omega_o) dr_i dr_o L(x_i, \omega_i) \quad (5.55)$$

是面片 $A_i$ 对 $A_o$ 的光强贡献。由于准同质半透明材料在整体上可以看作同质，并且是光学稠密的，我们可以用对偶极子扩散方程近似模型来处理这个面片到面片的贡献：

$$\begin{aligned} &\int_{A_i} \int_{A_o} S(x_i + r_i, \omega_i, x_o + r_o, \omega_o) dr_i dr_o L(x_i, \omega_i) \\ &\approx \pi^2 r_s^4 F_o(A_o, \omega_o) R_d(x_i, x_o) L(x_i, \omega_i) f(\omega_i) \end{aligned} \quad (5.56)$$

其中 $R_d(x_i, x_o)$ 就是由对偶极子模型(Dipole)[Jensen et al., 2001]得到的表面漫反射函数； $F_o(A_o, \omega_o)$ 是 $A_o$ 处在 $\omega_i$ 方向上的平均Fresnel出射量； $f(\omega_i)$ 是材质的表面细微结构入射函数，它本质上描述的是Fresnel入射量和照度衰减因子的乘积对整个表面平均的结果。表面细微结构入射函数和入射位置无关，这是因为入射位置的局部 $A_i$ 在整个准同质材质表面是均匀分布的。

基于以上的分析，我们知道对一个局部区域 $A_o$ ， $L_g(x_o, \omega_o)$ 正比于对偶极子扩散方程近似模型的结果，即：

$$L_g(x_o, \omega_o) \propto \int_{B_o} \int_{\Omega} R_d(x_i, x_o) L(x_i, \omega_i) f(\omega_i) d\omega_i dx_i. \quad (5.57)$$

这样，上面的关系可以重新写成：

$$L_g(x_o, \omega_o) = \int_{B_o} \int_{\Omega} f_v(x_o, \omega_o) R_d(x_i, x_o) L(x_i, \omega_i) f(\omega_i) d\omega_i dx_i \quad (5.58)$$

这里我们引入了表面细微结构出射函数 $f_v(x_o, \omega_o)$ 。这个函数将 $x_o$ 点的视差效果、Fresnel出射量以及 $A_o$ 中的细节调制在扩散方程结果的贡献中。由(5.52)和(5.58)，表面细微结构出射函数可以写成

$$f_v(x_o, \omega_o) = \frac{\int_{B_o} \int_{\Omega} S(x_i, \omega_i, x_o, \omega_o) L(x_i, \omega_i) d\omega_i dx_i}{\int_{B_o} \int_{\Omega} R_d(x_i, x_o) L(x_i, \omega_i) f(\omega_i) d\omega_i dx_i}. \quad (5.59)$$

综上所述，从准同质半透明材料出射的光强可以写成

$$\begin{aligned} L(x_o, \omega_o) &= \int_{\Omega} R(x_o, \omega_i, \omega_o) L(x_i, \omega_i) d\omega_i \\ &+ \int_{B_o} \int_{\Omega} f_v(x_o, \omega_o) R_d(x_i, x_o) L(x_i, \omega_i) f(\omega_i) d\omega_i dx_i. \end{aligned} \quad (5.60)$$

基于这个等式，我们提出了一个由四个分量构成的准同质半透明材料的材质模型。这四个分量分别是：局部反射函数 $R(x_o, \omega_i, \omega_o)$ 、表面细微结构出射函数 $f_v(x_o, \omega_o)$ 、表面细微结构入射函数 $f(\omega_i)$ 和全局偶极子扩散方程传输量 $R_d(x_i, x_o)$ 。正如我们将会看到的，所有这四个分量都可以从真实物体测量得到。

### 5.3 准同质半透明材质模型的获取

在测量材质模型数据的时候，可以用激光束照射材料样本。但是高度集中的光照使得镜面反射光强和整体散射光强相差很大。如此高的动态范围会对光强的精确测量带来不利的影响，类似[Goesele et al., 2004]，为了减小这个不利影响，我们分别采

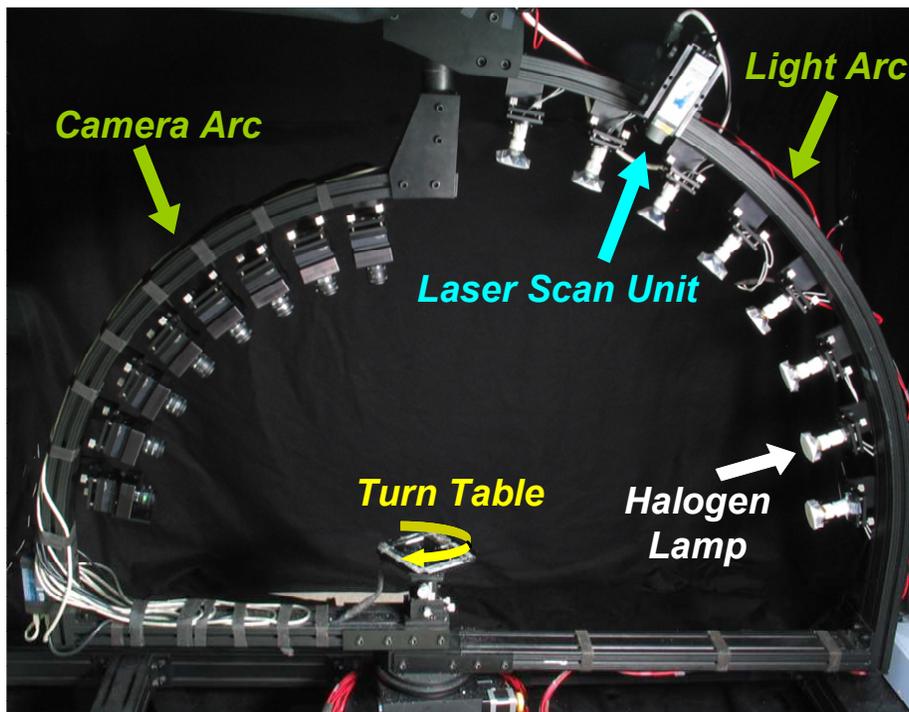


图 5.3: 准同质半透明材质模型数据捕获设备。

用不同的光照方式采集整体和局部的散射数据。由于整体散射不包含镜面反射，并且随着距离的增加呈指数衰减。因此我们用激光来增加整体散射的可视范围。特别的，我们用线状激光代替单一激光束以显著提高测量效率并减少用于计算模型数据的图像容量。尽管线状激光不能作为图5.2中 $A_i$ 那样的圆形区域的入射光，但它仍然可以被用在全局散射的测量中。在局部散射测量中，我们采取了BTF的测量手段，使用卤灯取代激光。这是因为均匀的光照提供了一个相对较小的动态范围，这样就更多的保留镜面反射时的纹理细节。

数据采样设备采用的是3.1章中设计，如图5.3。其中激光扫描单元装有一个10mw激光器，有三种颜色可选(红色:波长650nm, 绿色: 波长532nm,蓝色:波长473nm)。在我们的实现中，同时只能有一个激光器安装在激光扫描单元上。因此图像测量必须分别用红、绿、蓝三种颜色的激光各执行一次。激光扫描单元可以手动固定在光源阵列的弧形支架的任意位置上。通过一个调整激光方向的控制器，可以使激光扫过整个样本表面。我们用表5.4中所示的方法，通过线激光和卤灯光源来测量图像数据。对于线激光扫描图像，先检查图像的各个像素，超过一个指定阈值的像素被认为处于线状激光上，然后通过这些像素拟合一条直线，以确定线激光扫描位置。通过这些图像数据集，我们的材质模型中的四个分量可以从中分离出来，我们能获得偶极子扩散方程的参数，以及各个纹理函数。光强的整体散射情况可以在激光线

```

步骤一：
for 三种色彩的激光器
  for 激光器在光源臂上的各个位置
    for 光源臂的各个旋转位置
      在样本上发射激光投影带
      for 激光线扫描的各个位置
        从各个相机获取样本的外观图像

步骤二：
for 三种色彩的激光器
  for 载物台的各个旋转位置
    旋转光源臂保持和载物台相对静止
    在样本上垂直发射激光投影带
    for 激光线扫描的各个位置
      从各个相机获取样本的外观图像

步骤三：
for 光源臂的各个旋转位置
  for 光源臂上的各盏灯
    for 载物台的各个旋转位置
      从各个相机获取样本的外观图像
    
```

表 5.4: 准同质半透明材质模型数据采样步骤伪代码。

扫描图像中清晰地显现出来，但这个视觉效果同时也是受到表面细微结构入射、出射函数影响的。为了分离这两个不同的分量，我们利用了这些分量方向依赖性：细微结构入射函数依赖入射光的方向，而细微结构出射函数则依赖视角方向。偶极子扩散方程的解则与方向无关。在恢复了全局散射模型之后，局部反射函数可以通过从卤灯图像中减去整体散射分量而得到。局部反射函数包含各个局部各向异性的次表面散射和细微表面结构的表面反射。在图像采集过程中，所有的图像(包括激光线扫描图像和卤灯图像)都用3.1.2节中提到的方法几何矫正到样本的上表面(参考平面)上。这里我们假设样本物体整体上是平坦的，但是局部可以包含表面细微结构。我们假设被测量的材料样本是光学致密并且足够的厚，因而从样本底部透出的光可以被忽略。正如一般BTF测量系统的做法一样，为了避免诸如光线从侧面透出等边缘效应，材料样本只有正中间一部分被纳入测量范围。表5.5列举了各个数据获取步骤所获取到的数据及其对于纹理函数的记号。其中 $x$ 为空间位置参数， $\omega_{i/o}$ 为入射/出射角度， $l$ 为激光线扫描位置的索引， $c$ 为相机的索引。

步骤	名称	函数记号
一	激光线扫描图像a	$I'(x, \omega_i, c, l)$
二	激光线扫描图像序列	$I(x, \omega_o, l)$
三	卤灯图像	$L(x, \omega_i, \omega_o)$

表 5.5: 准同质半透明材质模型采样得到的原始数据。

### 5.3.1 表面细微结构入射函数

数据采集的第一步，是在不同的入射方向之下，用线状激光扫描材料样本。如同表5.4的第一步描述的一样，我们把激光器安装在光源弧形支架的几个不同的位置上。对于每一个位置，我们旋转光源弧形支架到几个不同角度，并从几个不同视角采集激光扫描图像。

对于表面细微结构入射函数，我们只考虑不同入射角度的相对影响。不失一般，我们认为垂直入射时的表面细微结构入射函数为1。对于从其他方向的入射，细微表面结构入射函数按以下方法测量：

$$f(\omega_i) = \frac{\sum_c \sum_x \sum_l I'(x, \omega_i, c, l)}{\sum_c \sum_x \sum_l I'(x, \omega_0, c, l)} \quad (5.61)$$

其中分子表示由 $\omega_i$ 方向入射的线状激光带来的出射光强之和，分母则表示由垂直方向 $\omega_0$ 入射带来的出射光强之和。尽管从单个视角采集到的图像已经可以恢复出这个函数，我们还是利用了多个分散的视角(平均多个相机获取的图像)以获取更鲁棒性的结果。

### 5.3.2 扩散近似模型的参数拟合

如同表5.4中的描述，从不同视角得到的垂直入射图像可以用来计算偶极子扩散方程参数。在载物台旋转到适当的测量角度之后，光源弧形支架同样进行旋转，以保证材料样本每次都以相同的方向被扫描。样本的外观图像由所有相机同时获取。在激光扫描图像中我们可以沿同扫描线垂直的方向抽取侧向衰减曲线的样本点集 $R_s$ ，如图5.5：

$$R_s : \{ \langle d(x), I(x, \omega_0, l) \rangle \} \quad (5.62)$$

为了用偶极子模型拟合这个数据集，我们使用了[Jensen et al., 2001]中的近似，即将折射率设置为1.3。尽管这个近似未必准确，但对于我们用来测量的材料，这种近似效果很好。对偶极子模型得到的漫反射参数可以从两种散射特性中得到：弱反照率 $\alpha'$ 和弱损耗系数 $\sigma'_t$ 。直接拟合这两个参数被证明是个病态问题([Jensen and Buhler, 2002])。因此，我们首先测量材料样本的整体漫反射 $R$ ，然后计算出弱反照率 $\alpha'$ 。然后通过测量得到的图像拟合弱损耗系数 $\sigma'_t$ 。

在我们的模型中，总的漫反射量，是从材料样本出射的总光强，与垂直入射样本的线状激光光强之比。对于特定的激光位置 $l$ 与垂直入射方向 $\omega_0$ ，为

$$\sum_x \sum_{\omega_o} I(x, \omega_o, l) = R \frac{k_1}{k_0} \phi \quad (5.63)$$

其中 $k_1$ 表示线状激光的长度， $\phi$ 是激光强度，这个强度通过长度为 $k_0$ 的线状激光照射在弱反射率已知的样本表面可以得到。同时，我们假设线状激光上各点光强相同。由表面细微结构入射函数带来的影响，可以通过将从不同视角获得图像中对应像素累加的方式来消除。为了进一步的鲁棒性，我们测量了从不同位置发射的线状激光，并且将漫反射量取平均。有了全局漫反射量，我们就可以通过[Jensen and Buhler, 2002]中的方法求得弱反照率 $\alpha'$ 。

求得弱反照率 $\alpha'$ 之后，材质的弱损耗系数 $\sigma'_t$ 可以通过[Jensen et al., 2001]提出的对偶极子模型拟合求出。在拟合样本点集过程中，我们先将同一个图像数据集在不同视角方向下的样本点按侧向距离 $r$ 分组平均起来。以消除表面细微结构带来的影响。另外，我们这里的光源形式和[Jensen et al., 2001]中的测量设定不同，我们这里是线状光源而不是一个点，故而测量到的光强是线状光源各处对出射点的贡献的积分：

$$I_d(x) = \frac{\phi}{k_0} \int_S R_d(d(x)) dx \quad (5.64)$$

虽然式5.64中的积分没有解析解，但是这里只有 $\sigma'_t$ 一个未知数。我们采用了类似[Gardner et al., 2003]中的办法，从粗到细的穷举搜索使 $I_d$ 拟合数据集 $R_s$ 最好的 $\sigma'_t$ 的取值。我们在0.01到10.0范围内搜索 $\sigma'_t$ ，这个范围包含了大部分自然界材料的光学属性。图5.4给出了一个从一块真实的海绵上测量的数据以及拟合的结果。其中蓝点代表测量得到的 $R_s$ 样本点，红色曲线代表通过对偶极子扩散方程，以及对应的 $\alpha'$ 和 $\sigma'_t$ 恢复出的函数 $I_d(r)$ 。

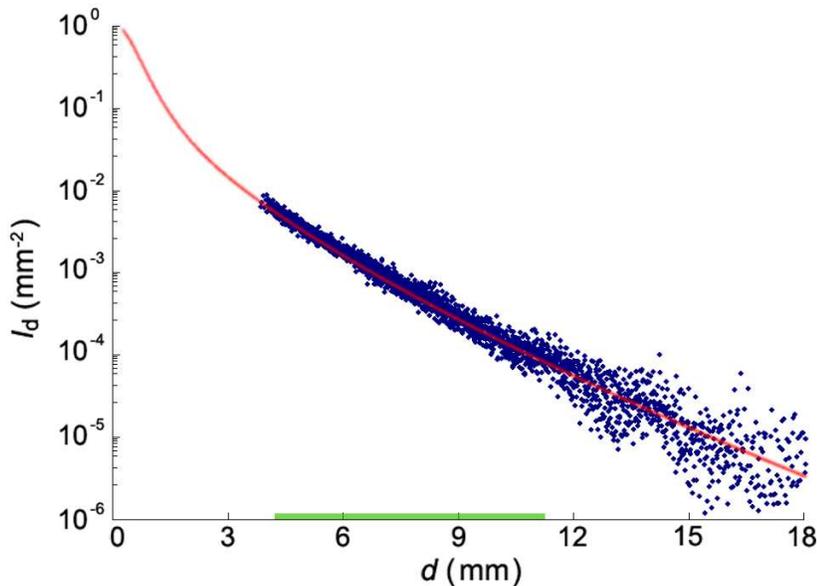


图 5.4: 扩散方程近似模型的拟合结果。

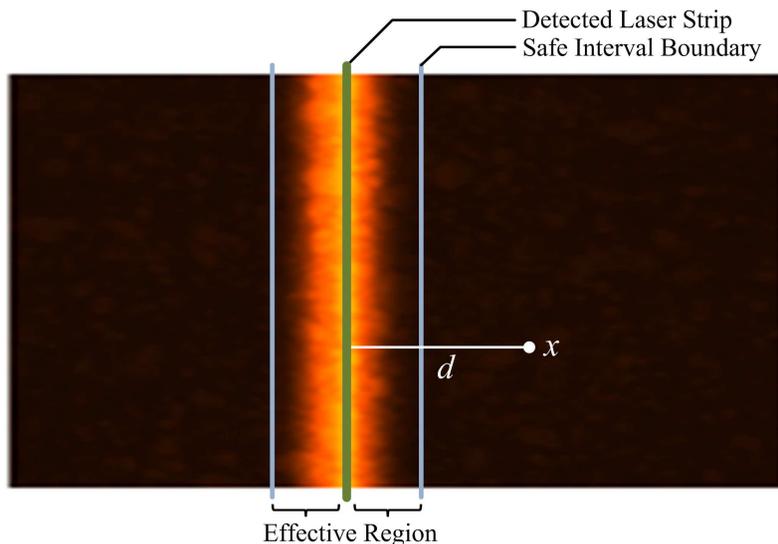


图 5.5: 侧向衰减距离定义以及恢复细微结构出射函数的有效区域。

### 5.3.3 表面细微结构出射函数

表面细微结构出射函数描述了图像在除去整体均质扩散分量之后的残差。在求得扩散方程近似模型 $R_d$ 函数后，根据检测到的激光扫描线的位置，我们可以求得均质意义下的次表面散射的光强分布函数。用这个分布，对从任意的激光扫描位置 $l$ 下采集图像中重构表面细微结构各个视点方向下的对出射光线的影响：

$$f_v(x, \omega_o)|_l = \frac{I(x, \omega_o, l)}{\frac{\phi}{k_0} \int_{L_{l, \omega_o}} R_d(d(x)) dx} \quad (5.65)$$

其中 $L_{l, \omega_o}$ 是视角 $\omega_o$ 下第 $l$ 帧图像中的激光扫描线段。

在理论上对于每个视角，一张激光扫描图像就可以重构表面细微结构出射函数。但是在实际上由于受到相机噪声的影响，图像较暗的部分可信度很低。如图5.5所示，我们根据各点同激光扫描线的距离 $d$ ，给定一个阈值来确定有效的图像区域。对于距离大于这个阈值的像素给予为0的权重，小于距离这个阈值的像素点权重随距离衰减的权重。然后对各个激光扫描位置下恢复的图像加权平均得到表面细微结构出射函数：

$$f_v(x, \omega_o) = \frac{1}{n} \sum_l w(x; \omega_o, l) \cdot f_v(x, \omega_o)|_l \quad (5.66)$$

其中， $w$ 是权重函数，我们采用了类似泊松分布密度函数的形式， $n$ 是各个视点角度上激光扫描线的个数。

### 5.3.4 局部反射函数

最后，我们从不同的光照和视角方向采集卤灯图像，如表5.4中的第三步所示。采集到的图像包含局部和整体光照效果。为了获得只包含局部散射的局部反射函数，我们首先从计算好的对偶极子模型参数和表面细微结构入射、出射函数中计算整体分量，然后从测定数据中减去这个整体分量以得到局部反射函数 $R$ ：

$$R(x, \omega_i, \omega_o) = L(x, \omega_i, \omega_o) - f_v(x, \omega_o) f(\omega_i) \phi_L(\omega_i) \int_{\Omega} R_d(\|x - x_i\|) dx_i \quad (5.67)$$

尽管对偶极子扩散模型无法推广到非均质材料，我们仍部分采用这个模型计算局部散射。这种做法避免了显式指定(5.60)中的区域 $B_o$ 。减去对偶极子扩散分量可能在局部带来负数结果，这是由测量误差和噪音带来的，我们均取为零。

## 5.4 准同质半透明材质的绘制

作为材质模型，从真实的材料样本得到的准同质半透明材质模型可以被简单的应用到任意几何外观的物体上。为了做到这一点，我们将测量数据重新组织成一个定义在样本表面的二维纹理 $T(x, y)$ 。每个纹理像素 $T(x_i, y_i)$ 包含 $(x_i, y_i)$ 点的反射函数值，以及细微表面结构出射函数。和[Liu et al., 2004]中描述的方法类似，我们将纹理 $T(x, y)$ 合成到目标物体表面，并且使得物体的表面外观在不同的视角和光照方向下和现有材料样本保持一致。散射属性可以直接指定到新的物体上，用来计算光在物体内部传输的情况。

通过我们的材质模型构造的准同质半透明物体可以容易地进行绘制。在给定的光照条件下，为了计算点 $x_o$ 的出射光强，我们首先通过细微表面结构入射函数计算进入物体的光强。光线在物体内部的扩散情况我们采用对偶极子模型进行近似，并且在计算出射之前用表面细微结构出射函数进行调制。对于局部散射效果，我们直接将局部反射函数在 $x_o$ 点对从 $x_o$ 入射的方向做积分。这样，我们的材质模型既处理了物体表面的外观细节，也处理了物体内部的散射效果。

为了绘制局部反射函数，可以使用现有的基于图形硬件加速的BTF绘制算法，如[Sloan et al., 2003a] [Suykens et al., 2003] [Mueller et al., 2003] [Liu et al., 2004]。也有基于对偶极子模型的高效绘制算法[Jensen and Buhler, 2002] [Lensch et al., 2003]可以用来计算整体光线传输情况。通过这些方法，光线的局部和整体贡献可以被快速地计算出来，进而得到最终的绘制结果。整个绘制过程不涉及到耗时的光子散射物理模拟过程。

	细微结构入射函数	细微结构出射函数	局部反射函数
视点方向分辨率	N/A	$12 \times 7$	$12 \times 7$
光源方向分辨率	$12 \times 7$	N/A	$12 \times 7$
图像分辨率	$256 \times 256$	$256 \times 256$	$256 \times 256$
数据量	1KB	63MB	5.2GB
数据获取时间	3.0h	1.2h	2.0h
数据处理时间	0.5h	0.5h	0.5h

表 5.6: 准同质半透明材质模型数据采集系统的规格

## 5.5 实验结果

我们按照第5.3章中描述的方法实现了一套测量系统，并对若干材料样本进行了测量。在测量纹理函数分量的时候用到的系统参数在表5.6中列出。我们用一台拥有3.2GHz Intel Xeon CPU和4GB内存的计算机进行数据处理。对偶极子模型相关计算大约耗时一分钟，而图像矫正和恢复高动态范围图像等则耗时约四小时。图5.6给出了三个实验实例，所采用的材料从左到右分别是面包片、海绵和米花糖。图中第一行展示了所有的样本在卤灯下的情况。图中第二行和第三行分别给出了在特定的视角和光照方向下的细微表面结构出射函数，和局部反射函数。可以看到细微表面结构出射函数有着和局部反射函数在空间上相对应的纹理特征。这三个被测量材质的散射属性列在表5.7中。为了验证我们模型的正确性，我们人工建立了一个包含两种材料的物体，如图5.7，左侧是准同质半透明材质模型的绘制结果，右侧是蒙特卡罗物理模拟的结果。这两种材料的散射属性在RGB通道分别为： $\alpha' = (0.4248, 0.4248, 0.99)$ ， $\sigma'_t = (1.0, 1.5, 2.13)mm^{-1}$ 以及 $\alpha' = (0.98, 0.98, 0.98)$ ， $\sigma'_t = (1.5, 1.5, 1.5)mm^{-1}$ 。通过光子散射物理模拟[Pharr and Hanrahan, 2000]来实现真实物体的测量过程，得到了对偶极子扩散方程参数 $\alpha' = (0.8224, 0.8125, 0.9853)$ 和 $\sigma'_t = (1.1701, 1.29605, 1.53456)mm^{-1}$ 。通过得到的材质模型，我们合成了物体在新的光照条件下的外观，如图5.7所示。尽管对表面细微结构出射函数进行插值导致我们的绘制结果有些模糊，但是我们的模型仍然提供了一个很好的近似。对于包含噪音和几何校准误差的真实材质，准同质半透明材质模型仍然可以得到相当精确的结果。图5.8给出了准同质半透明材质模型绘制记过和真实物体照片的比较，两者之间的视觉外观是十分相像的。

我们将准同质半透明材质模型集成在基于光线跟踪的绘制系统中，同时

	面包片	海绵	米花糖
弱反照率( $\alpha'$ )	(0.981, 0.957, 0.918)	(0.999, 0.997, 0.758)	(0.999, 0.977, 0.840)
弱损耗系数( $\sigma'_t$ )	(0.918, 0.936, 0.896)	(1.640, 1.593, 1.389)	(0.855, 0.839, 0.794)

表 5.7: 测量的实验材质光线散射属性

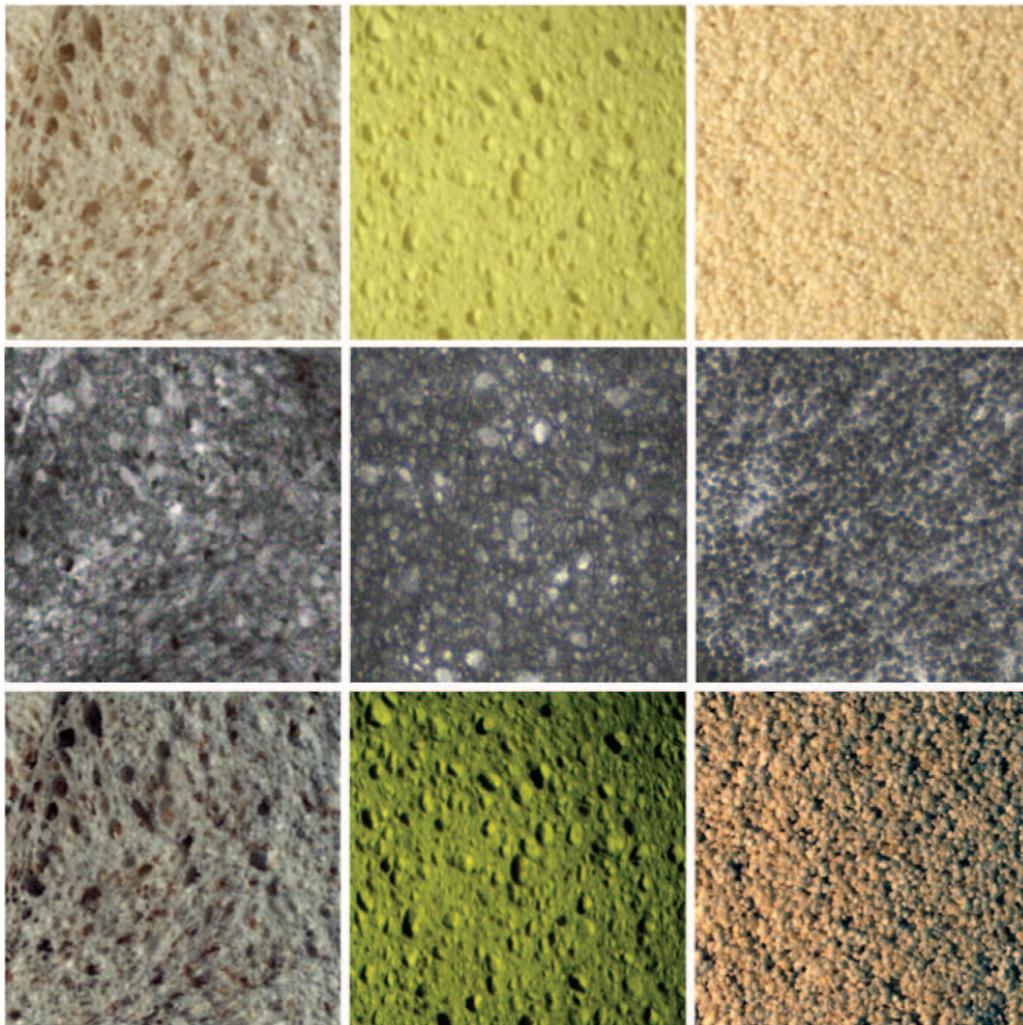


图 5.6: 准同质半透明材质模型采样时获取的原始数据

用[Jensen and Buhler, 2002]中提到的对偶极子模型近似计算整体光线传输情况。在局部和全局光照下的绘制结果如图5.9, 5.10, 5.11, 5.12所示。

图5.9中, 我们将我们的绘制结果(左)和通过BTF绘制的结果(中), 以及BTF和对偶极子扩散模型简单叠加绘制的结果(右)进行了比较。用高动态范围的环境映照作为光照环境。我们注意到背光效果在准同质半透明材质模型中被很好的处理了, 而BTF模型则无法做到这一点。如图5.10所示, 这个海绵材料也被应用到bunny模型上, 并在不同的视角和光照条件下进行了绘制。

图5.11展示的是一个由米花糖构成的茶壶在不同的光照和视角下的外观。从茶壶的边缘和处在阴影中的部分可以明显的观察到整体散射效果。同时局部的细节也被很好的测量并且绘制了出来。

图5.12展示了一些面包片在不同的光照和视角下的绘制结果。面包是通过我们

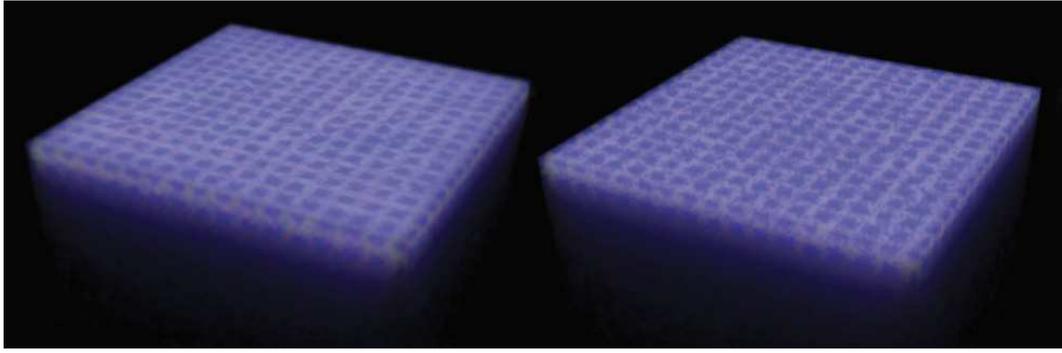


图 5.7: 准同质半透明材质模型和蒙特卡罗物理模拟的比较



图 5.8: 准同质半透明材质模型和真实物体照片的比较

的材质模型进行绘制的，而面包皮和盘子则是通过BRDF模型和彩色纹理映射完成绘制的。

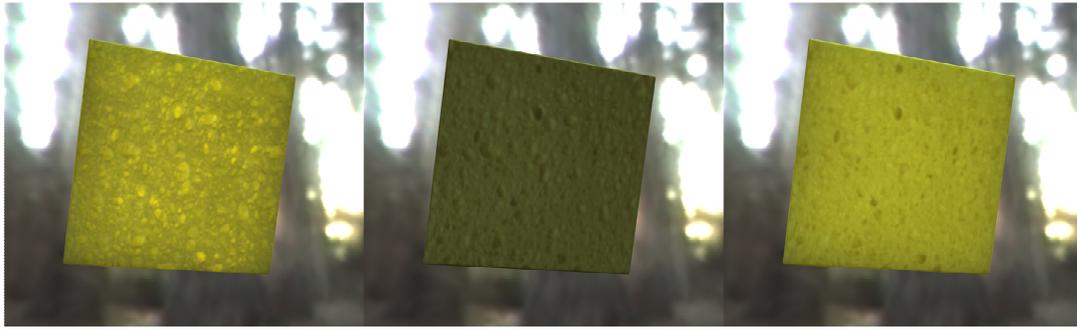


图 5.9: 海绵的背光绘制效果



图 5.10: 海绵应用在bunny模型上绘制效果



图 5.11: 米花糖应用在teapot模型上绘制效果



图 5.12: 面包片的全局光照绘制效果

## 5.6 本章小结及讨论

本章提出了准同质半透明材质的概念定义，描述了这些物体的光学特性和外观视觉特点，并在此基础上建立了针对这类物体的BSSRDF分解模型，将光线传输分成了局部贡献和全局贡献。首次成功地从真实世界的物体中测量得到了非均质半透明物体的模型数据，并应用在任意几何模型上用来绘制准同质半透明效果。

我们的准同质半透明材质模型的基础，是次表面散射在局部和整体这两个不同的尺度上表现出的不同性质。由于材质的局部异质带来的复杂局部散射效果在使用我们的模型进行绘制的时候，需要满足两个条件。一个条件是物体的几何尺度必须大于局部异质的尺度，从而可以用对偶光子扩散模型来近似光线的整体散射情况。另一个条件是光照局部均匀，这是因为我们使用了局部反射函数模型。为了使光照在局部均匀，光源和物体的距离必须远大于物体的局部尺度。同时，由于这个假设，光照条件的突变(如阴影的边界)将会给结果带来一些误差。在测量过程中我们假设材质是光学稠密的并有足够的厚度，因而从样本背面透出的光线可以被忽略。在我们的实现中，这些透出的光线被一块黑布吸收，并且在计算中被忽略。由于忽略了这些透出量，对模型数据采集可能会带来一些误差。



## 第六章 基于表观流形的时变表面质感建模

自然界中的很多物体其各处不同的外观变化通常是由于长时间的逐渐演变而形成的，例如物体老化、金属发锈等。这里我们将这种自然过程通称为风化(weathering)。各种各样的物理及化学因素造成了物体这样外观上的逐渐变化，并且在物体表面呈现不均匀的分布。这些外观变化在大尺度上的分布主要由一些外在的因素造成的，例如物体的几何形状或者风化过程的环境因素。这些外观在小尺度上所体现出来的细节则是由物体特定风化过程决定的，是物体的内在因素决定了这样的外观特征。在这一章里，我们将集中讨论如何在三维物体上合成高真实感的风化效果，以及随时间演化的时变表面质感序列。

一类合成时变表面质感序列的方法是在视觉上模拟物理过程的效果，这类工作主要是在三维物体上的模拟风化的效果的方法，如[Miller, 1994] [Hsu and Wong, 1995] [Wong et al., 1997] [Chen et al., 2005]。这些现有的视觉模拟技术可以在三维物体表面根据物体的形状、外界环境等因素，合成风化效果的大尺度分布。但是这些方法无法生成特定风化过程在小尺度上外观特征。例如在[Chen et al., 2005]中，风化效果在外观特征细节用两张纹理之间根据三维物体各处的风化程度的做线性插值来合成。用这样的方法主要有两方面的问题。首先，风化过程中物体的表面质感通常具有非线性的变化轨迹，背离这个轨迹所合成的表面质感往往会产生自然的视觉效果。其次，很多风化过程的外观变化还涉及到其纹理样式(texture pattern)的演化，例如扩散、生长等



图 6.1: 时变表面质感建模:样本以及合成结果

过程。用纹理间的线性插值无法产生这些纹理模式的演变过程。

另外一类方法是基于风化过程的物理机制模拟材质的与风化环境之间的交互过程，例如[Dorsey and Hanrahan, 1996][Dorsey et al., 1999]。这类方法可以在大尺度上合成风化效果的演化，也可以在小尺度上合成高真实感的表面质感变化过程。但是这类方法需要非常细致地了解特定风化过程的物理机制并为此建立精确的物理过程的模型，通过大量的模拟计算来实现。另一种获取具有物理真实性的时变表面质感的手段是拍摄特定材料在真实世界中演变过程的完整视频[Georghiades et al., 2005]。视频完整地记录了物体在风化过程中演变情况。这种数据密集型的方法通常在实际操作时不得不考虑其时间和劳力的开销。并且考虑到图像对准、数据存储方面的技术难度，如果想获得更为复杂的表面质感如SVBRDF而不是简单的彩色图像，则这样的方法更难以实施。

我们在这里将提出一种简单易行的方法，可以从样本的单一时间点上的外观所获取的表面质感信息，来构造风化过程的高真实感时变表面质感。我们的方法基于这样的观察，对于特定时刻的样本，其外观的表面变化是同其各处风化程度的分布相对应的。也就是说在时间上先后出现的表面质感样本同样也出现在空间的各个位置上。我们利用这些各处不同的表面质感样本来建立**表观流形**。表观流形很有效地近似了风化物体变化过程逐点表面质感的子空间。由于表观流形中最主要的变化是由于物体的风化过程所导致，我们的方法通过求解表观流形主要变化分量来估计风化过程逐点表面质感样本之间的相对先后关系，即风化程度。这样我们就可以得到逐点的表面质感在风化过程中的演变趋势。并且根据空间上各点的表面质感在表观流形中的相对位置，我们还可以确定风化程度在样本上的空间分布。利用这些时变信息和空间分布以及样本物体的表面质感，我们合成该材质在各个不同时刻的表面质感。

对于给定大尺度风化程度分布时间变化序列的三维物体(例如用现有的视觉模拟方法生成)，我们通过一种新的纹理合成方法将经过表观流形分析的二维表面质感样本合成对应的时变表面质感序列。如图6.1所示，从单一时间样本(a)出发，我们的方法没有基于物理的模拟过程，依然可以生成非线性变化的表面质感以及自然的空间变化序列。此外，表观流形方法还可以合成改变了风化程度的真实世界中的物体，对风化过程作正向和逆向的模拟。另一个应用是置换物体的风化效果，使其具有另一种材质的风化效果同时保持原有风化程度的大尺度分布。

## 6.1 现有的风化模拟技术及相关工作

高真实感的风化效果可以用基于风化物理机理的模拟过程来产生。这些方法一部分是针对特定材质的例如铜锈[Dorsey and Hanrahan, 1996]、岩石侵

蚀[Dorsey et al., 1999]以及油漆的开裂和剥离[Paquette et al., 2002]等；一部分是针对特定风化过程的，例如水渍[Dorsey et al., 1996]、金属氧化[Merillou et al., 2001]、划痕[Bosch et al., 2004]以及青苔生长[Desbenoit et al., 2004]等。另外也有一些特定材质的时变反射模型，例如灰尘积累[Blinn, 1982]以及潮湿的表面[Jensen et al., 1999][Nakamae et al., 1990]等。这些方法都是为了获得高度物理真实的模拟结果所特别设计的，并且通常需要大量的计算。而我们的方法则更关心时变表面质感的视觉效果，以及模型的通用性，而不是其过程的物理真实性。

另外一类方法是根据可见性来确定物体表面各处暴露给环境的程度，从而生成时变表面质感的变化过程[Miller, 1994, Hsu and Wong, 1995, Wong et al., 1997, Chen et al., 2005]。这类方法主要在于计算风化程度在物体表面上的分布以及分布的时变过程，而对于确定了风化程度之后的细节表面质感则很少关注。我们的工作弥补了这类方法的这一缺陷。对于在大尺度上确定了风化程度的物体，我们的工作将极大地改善这类方法的所产生的风化物体的绘制结果。

最近，出现了用基于获取物体外观图像完整时间序列的方法建模时变表面质感。例如[Lu et al., 2006]中用固定视点的图像序列来建模物体在干燥过程中的表面质感的变化。在[Georghiadis et al., 2005, Lu et al., 2007]中，更进一步分析了变化过程同物体特定几何因素之间的关系。为了在合成图像中有视点方向相关的效果，[Lu et al., 2006]更手动加入了随湿度变小而衰减高光项。[Gu et al., 2006]捕获了SVBRDF随时间变化的序列，并通过将时间变化和空间变化分离来实现时变SVBRDF的编辑。基于实拍物体外观变化过程的方法的建模方式得益于大量的实际物体外观。我们的方法也使用从实际物体上捕获得到的外观同时考虑极小化数据获取的难度。我们的方法避免了采样要求空间严格对齐时间序列，充分利用单时间点数据来产生表面质感的时变过程。

## 6.2 表观流形

图6.2描绘了基于表观流形的时变表面质感建模的基本流程。从单一时间点上获取的风化物体的空间分布的表面质感出发，通过对各点上表面质感的流形分析得到样本表面质感在空间及时间上的分布特性，再应用这些特性到已知大尺度风化程度分布序列的物体表面上，合成时变表面质感序列。在样本分析的步骤中，我们假设风化过程导致的物体表面质感的变化是单调的并且是连续的。这些逐点表面质感的变化分布在样本表面的各个地方，并且这些变化的集合来自于在高维的表面质感空间中的低维流形嵌入(embedding)的采样。特定的材料和风化过程具有特定的流形嵌入，我们将这个特定的流形嵌入成为“表观流形”，通常这个表观流形具有一定的非线性

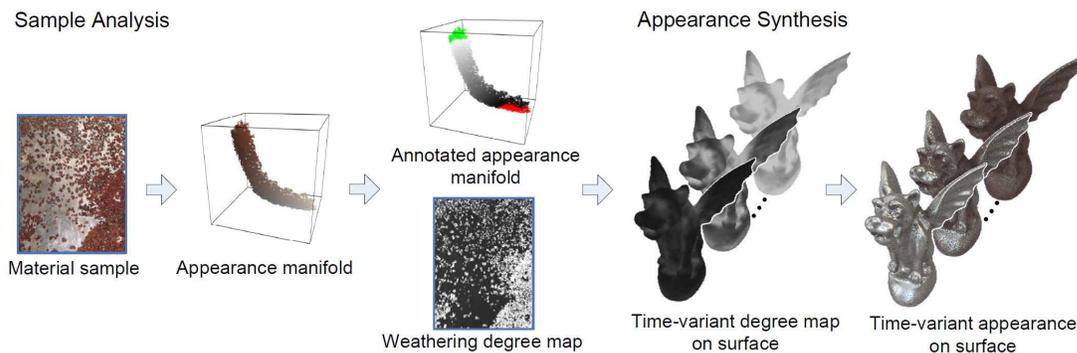


图 6.2: 时变表面质感建模的基本流程

性结构。为了从实际样本中得到表观流形，我们在表面质感空间中构建样本逐点表面质感的近邻图，用这个近邻图来近似地表达表观流形。我们下面的讨论以SVBRDF为例，通过各点上的反射特性(BRDF)样本在BRDF空间中的分布建立近邻图。在这个特例中表观流形是BRDF的流形空间。通过少量的用户交互标识，我们可以分析风化过程的变化趋势在表观流形子空间上的变化曲线，并依此推导出各BRDF样本的相对风化程度(weathering degree)。在[Matusik et al., 2003]中也给出了基于流形的BRDF模型，实际测量的BRDF数据集通过非线性降维方法构造了一个低维的BRDF特性空间。[Matusik et al., 2003]中的方法旨在刻画整个BRDF空间的本质属性。我们的目标是用表面质感去刻画特定材料在风化过程中BRDF的非线性变化，是BRDF空间的一个子空间。通过分析各BRDF样本的风化程度，我们可以得到样本物体时变表面质感的两个特性。第一是，对于正向的风化过程，我们认为各点的风化程度是随着时间单调递增的，那么对于物体表面任何一点我们可以确定一个合理的BRDF时间变化序列。第二是，我们可以通过将所有样本表面点投影到表观流形上，得到每一个表面点对应的风化程度。这样我们就得到了风化程度在原始样本上的分布，即风化程度分布图。这个分布图揭示了样本物体在特定风化过程中风化程度的局部分布演变。

根据样本物体的表观流形分析结果，我们可以将获取到的时变表面质感模型合成到三维物体表面。首先我们用现有的风化视觉模拟技术或用户的指定来得到在三维物体上的大尺度风化程度的分布以及分布的时间变化序列。而后根据这些随时间变化的空间约束，我们将利用表观流形以及原始样本的风化程度分布图把时变表面质感细节逐帧合成到三维物体表面，最终得到在给定三维物体表面上的时变表面质感序列。

### 6.3 时变表面质感样本的分析

用从风化物体样本上采集到的BRDF数据，我们通过建立近邻图的方法来重构表观流形的子空间嵌入。用户通过在样本、物体上标记典型的风化起始及终止的区

域，我们可以在表观流形上识别风化过程BRDF变化的轨迹，从而建立各BRDF样本之间相对的时间先后关系，我们用风化程度来量化描述这个关系。在这个基础上，时变表面质感样本分析阶段给出了BRDF在风化过程的合理变化轨迹和风化程度在样本物体上的分布情况。

### 6.3.1 基于近邻图的分析过程

为了建立表面质感样本 $I(x, y)$ 的近邻图，我们将样本每一点 $(x, y)$ 上 $n$ 维表面质感属性组织成一个 $n$ 维向量，这些点可以在 $n$ 维表面质感空间中形成一个点云。在我们的实验中，我们用[Gardner et al., 2003]中提到的平坦物体线性光源反照度测定仪来获取样本物体的SVBRDF，具体细节可以参考3.2节。并且每一点上的BRDF用各向同性的Ward参数化模型来表达[Ward, 1992][Gardner et al., 2003]。考虑到RGB三个色彩通道，Ward模型总共有7个参数(漫反射系数3个，镜面反射系数3个和一个光滑度系数)。下面的讨论我们主要以这个7维的BRDF参数空间为例。

一个具有渐变风化过程的物体表面通常能够提供丰富的BRDF样本点，在这样一个密集采样的样本集上应用[Tenenbaum et al., 2000]中提到的基于 $\epsilon$ 距离准则和 $k$ 近邻准则的方法可以很鲁棒地构建近邻图。在我们的实现中，先应用 $k$ 近邻准则建立初始的近邻图(在我们的实验中取 $k = 8$ )。接着应用 $\epsilon$ 距离准则除去距离过大的边，在保证涉及到的点不孤立的情况下，只保留距离小于阈值 $\epsilon$ 。默认情况下，我们取 $\epsilon = 1.5\bar{d}$ ，其中 $\bar{d}$ 为由 $k$ 近邻准则建立的初始的近邻图中所有边长度的平均值。我们直接用Ward模型的7维参数空间的欧几里德距离作为BRDF样本空间的距离度量。另一种距离度量可以采用类似[Matusik et al., 2003]中的方法，将BRDF在不同光照方向不同视点方向下的反射率的对数组织为高维向量(appearance vector)，并将距离定义为这个高维向量的欧几里德距离。由于我们的目标不是刻画这个BRDF空间，加之我们样本数据是一个相当密集的采样，我们用参数空间的欧几里德距离作为距离度量的方法同样可以很鲁棒地重构样本集合的流形子空间。

从近邻图所揭示的BRDF流形结构中，我们的方法可以推导出各BRDF样本的相对时间关系，即风化程度。一种可能的选择是利用非监督流形学习方法[Tenenbaum et al., 2000][Roweis and Saul, 2000]等作非线性降维，将数据映射到样本空间的1维子流形上(一条曲线段)。曲线段上的坐标值自动给出风化程度，除了额外手工指定一下方向。但是样本各点BRDF的变化除了受起主导作用的风化过程驱动外，还一些其他次要因素的影响。例如样本中的杂质、表面几何的细节、风化过程中的异常情况以及样本采集时的噪声等，这些因素在一定程度上扰动了样本在表面质感空间中的分布，并且这个扰动通常不是同主导演化轨迹正交。由于这些影响，用全自动的非监督流形学习方法建立的风化程度中会带有一些次要因素的成份。为了尽量减少其

他因素对建立风化程度的影响，表观流形方法通过引入人机交互在样本分析过程中加入高层语意知识。具体的，在建立表观流形的过程中，我们的方法让用户有机会手工设定未风化的表面质感样本集 $X'_0$ 和(或)完全风化的表面质感样本集 $X'_1$ 。这个手工标注的操作只需要用户在样本图上圈选特定的区域即可。在没有任何用户指导的情况下，我们的方法将自动识别近邻图上沿测地线距离最远的两个点分别构造 $X'_0$ 和 $X'_1$ (和基于非监督流形学习方法一样，这个步骤需要手工指定哪个是未风化样本)。假设用户仅指定了未风化样本集 $X'_0$ ，那么用最远平均距离的点作为完全风化样本集 $X'_1 = \{p_1\}$ :

$$p_1 = \arg \max_j \sum_{i \in X'_0} \phi(p_i, p_j) \quad (6.68)$$

其中 $\phi(\cdot)$ 表示两个样本点在近邻图上的测地距离。类似的，对于仅指定了完全风化样本集 $X'_1$ 的情形也是用同样方法构造 $X'_0$ 。然后我们在近邻图上拓展样本集合 $X'_0$ 和 $X'_1$ 形成风化表面质感起始集合 $X_0$ 和起始集合 $X_1$ :

$$\begin{aligned} X_1 &= \{x_i | \Phi(\{x_i\}, X_0) > \lambda d_{\min}\} \\ X_0 &= \{x_i | \Phi(\{x_i\}, X_1) > \lambda d_{\min}\} \end{aligned} \quad (6.69)$$

其中样本集合拓展的距离限制 $d_{\min} = \Phi(X_0, X_1)$ ， $\Phi(\cdot)$ 表示两个样本集合的距离:

$$\Phi(X, Y) = \min_{i,j} \phi(x_i, y_j) \quad (6.70)$$

式6.69中的拓展系数 $\lambda$ 控制了拓展的范围，在我们的实验中取了 $\lambda = 0.9$ 。拓展样本集合的步骤是为了形成起始集合 $X_0$ 和起始集合 $X_1$ ，并使他们在近邻图所刻画的流形空间中相对于对方成为一个凸面。

在起始集合 $X_0$ 和起始集合 $X_1$ 之间，沿着近邻图形成了一个表面质感的渐变过程。对于任意一个样本 $x$ ，我们根据它到起始集合 $X_0$ 和起始集合 $X_1$ 的相对距离定义一个表面质感样本的标量函数，风化程度 $\varphi(x)$ :

$$\varphi(x) = \frac{\Phi(\{x\}, X_0)}{\Phi(\{x\}, X_0) + \Phi(\{x\}, X_1)} \quad (6.71)$$

对于我们实验中的获取的样本材料，这样的方法能产生更好的风化程度。图6.3给出了表观流形方法和Isomap方法建立风化程度的比较。其中(a)是初始近邻图，(b)和(c)是用分别用表观流形方法和Isomap方法建立的风化程度分布。近邻图中红色点集是未风化区域，绿色点集是完全风化的区域。注意比较图中用黄色箭头指出的点，他们都是未风化区域，但是由于表面几何细节因素的影响Isomap方法没有解出都为0的风化程度；而表观流形方法可以很简单地通过适当人机交互来校正这个情况。参考图6.3中

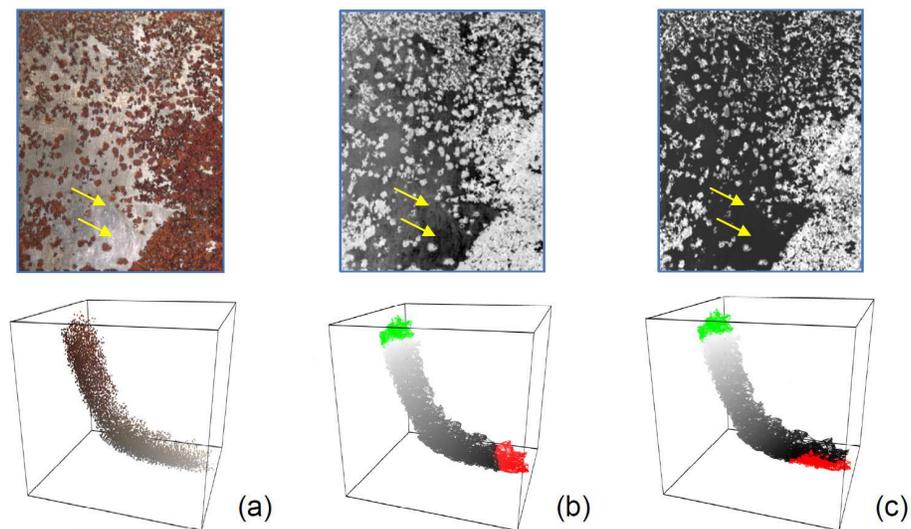


图 6.3: 表观流形分析和非监督流形学习方法的比较

的(c)，我们的方法可以在两个箭头的位置求得相同的风化程度值。

通过近邻图上跟踪风化程度值递增的轨迹，我们可以为物体表面点确定出一个合理的BRDF变化序列。对于正向的风化过程，表面质感的变化系列 $x_0$ 到 $x_n$ 上，任意一组相邻的表面质感必须满足 $\varphi(x_i) \leq \varphi(x_{i+1})$ 才是合法的序列。在后面的合成时变表面质感的技术中，我们利用了这一点来约束合成的表面质感序列。为了给定起始和终止的表面质感样本，最简单的可以直接在表观流形上沿测地线插值就可以得到合法的时变表面质感序列。

### 6.3.2 风化程度的空间分布

通过将样本表面点的值替换为风化程度值，我们可以得到风化程度在空间分布，如图6.3(c)中的上面部分显示了风化程度在样本表面上的空间变化。虽然风化程度在大尺度上的分布由物体的形状等全局因素决定，但是风化程度在小尺度上的局部空间变化特征是材料的本征特性。同时物体外观的纹理样式通常也会随着时间而变化，例如颗粒缩小和膨胀等。可以比较图6.3的(a)和(c)，大体风化程度差得比较远的区域可以看到纹理样式的变化，而大体风化程度一致的地方，纹理样式也是类似的。在后面合成时变表面质感序列的工作中，我们既考虑逐点BRDF的合理变化趋势也考虑纹理样式随时间演变的过程。

基于对表面质感样本的流形分析，我们的方法用表观流形和风化程度的分布来描述物体上的时变表面质感。这个方法将时变表面质感的表达同物体的风化程度分离了，使得一些诸如风化过程的正向和逆向模拟、风化效果的置换等应用成为可能。6.5节将深入讨论这部分内容。

## 6.4 时变表面质感序列的合成

原始样本在经过分析步骤后，我们得到了对应的表面质感以及风化程度的空间分布，我们的方法将根据这些在三维物体表面合成符合指定的大尺度风化程度演变的时变表面质感序列。这里大尺度的风化程度演变过程可以用现有的视觉模拟技术生成，或者通过手工修改现有的风化程度分布得到。

依据三维物体上的大尺度风化程度分布生成细致的局部风化效果的这个过程本质上是一个受约束的基于样本纹理合成(example-based texture synthesis)问题。基于样本的纹理合成是根据输入的纹理图像样本，合成在视觉上被认为相像的新的纹理图像的技术。大体上可以分成区域生长和全局优化两大类。区域生长是逐步从纹理图像样本中选取适当的区域复制到目标合成图像中去的过程，如逐像素(pixel-based)生长方法[S., 1997] [Efros and Leung, 1999] [Wei and Levoy, 2000]以及基于连续成块区域(patch-based)生长方法[Efros and Freeman, 2001] [Liang et al., 2001] [Cohen and Deussen, 2003] [Kwatra et al., 2003] [Wu and Yu, 2004]。全局优化通常是基于建立纹理图像的统计模型的基础上通过统计模型在逐个分辨率尺度上生成新的纹理[Heeger and Bergen, 1995] [Portilla and Simoncelli, 2000] [Freeman and Pasztor, 2002] [Jojic and Kannan, 2003] [Wei and Levoy, 2002] [Kwatra et al., 2005]。区域生长方法以基于graph-cut方法的[Kwatra et al., 2003]为代表能够以很高的质量合成各种类型的纹理图像，并且合成速度较快，缺点是很难在其合成过程中引入其他的约束。全局优化方法通常将纹理合成形式化成一个优化问题，所以可以较灵活地引入各种额外的约束条件。

和前面提到的各种基于样本的纹理合成方法不同，如图6.4所示我们这里的纹理合成是基于二维的样本纹理图像 $I$ 合成三维的纹理图像时间序列 $I'$ ，并考虑目标风化级别序列 $L'$ 和样本风化级别 $L$ 之间的约束。这里风化级别(weathering level)是指大尺度的风化程度，可以通过对风化程度分布低通滤波得到。除[Kwatra et al., 2005]外，已有的方法都是基于二维的样本合成二维的纹理图像。我们的问题主要的难点是样本只提供了空间变化上的样例信息，没有提供在时间变化上的样例信息。在[Kwatra et al., 2005]中，利用一个二维的纹理样本以及已知的速度场合成流动的纹理图像时间序列。也就是说在他的工作中，时间上的变化是用已知的速度场驱动的。在[Kwatra et al., 2005]中始终以一张一致的纹理作为样本，来合成纹理的运动，而在我们的问题中，在不同的风化阶段将使用不同区域的纹理作为样本，甚至涉及不同纹理样式之间的匹配。如果我们简单地使用现有的二维纹理合成方法互相独立地根据目标风化级别分布合成目标纹理序列的各帧。这样的合成结果由于忽略了时间上的相关性，会有严重的闪烁。如果我们不考虑样本纹理模式的相似性，可以用6.3.1节末尾提

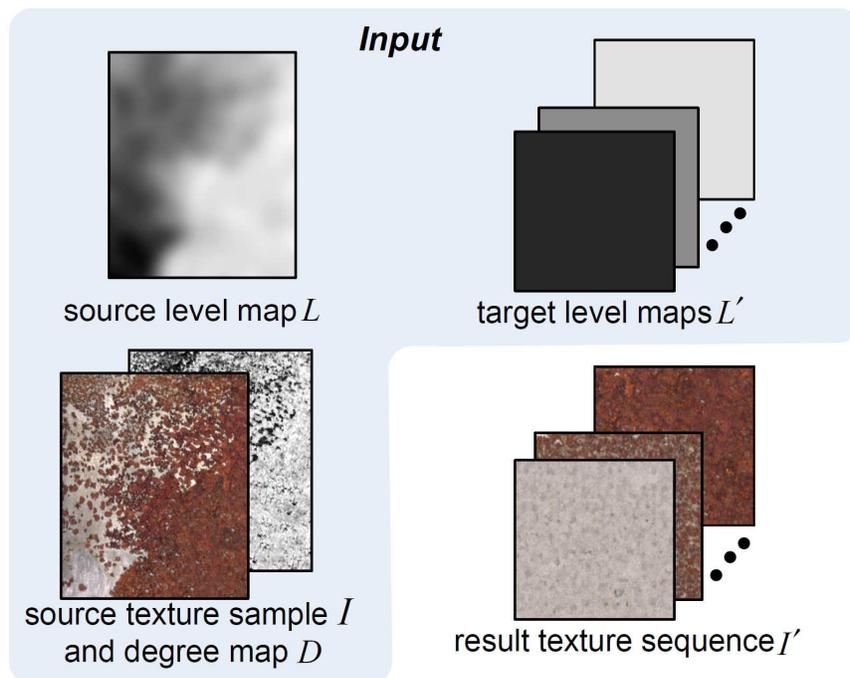


图 6.4: 时变表面质感序列的合成

到的方法将样本上各点BRDF沿表观流形向风化初始集合 $X_0$ 和风化终止集合 $X_1$ 插值来构造时变表面质感序列。这样的合成结果虽然在时间上的变化非常一致，但是逐点插值的结果无法考虑到纹理样式的演变，而使得插值出来的帧不像样本纹理中对应的区域。从这两个方面的试探我们可以看出时变表面质感序列的合成需要满足两方面的要求：各帧纹理同对应样本区域的相似性和逐点变化表面质感变化的合理性。

#### 6.4.1 帧间一致性纹理合成算法

这里我们提出一个多尺度的逐帧纹理合成方法，根据输入样本来生成时变表面质感序列。我们称这个方法为帧间一致性纹理合成(frame-coherent texture synthesis)。方便起见，我们只讨论在图像平面上的纹理合成过程，我们的方法可以很容易地扩展到在三维物体表面上进行纹理合成。图6.4给出了算法的输入输出，根据给定的样本纹理 $I(p)$ 以及其伴随的风化程度分布 $D(p)$ 和风化级别分布 $L(p)$ (通过对 $D(p)$ 的低通滤波得到)，本算法将合成时变表面质感序列 $I'(p, t)(t = 0, 1, 2 \dots, n)$ 并使得序列各处同目标风化级别分布序列 $L'(p, t)$ 一致。帧间一致性纹理合成算法是一个逐帧合成的过程，在初始帧之后，不断地重复根据前一帧合成当前帧的过程直到完成这个序列的合成，如图6.5所示。初始帧可以的现有的纹理合成技术来产生，接下来每次合成当前帧的时候有两个重要的步骤：逐像素外插(pixel-wise extrapolation)和多尺度纹理优化(multi-scale refinement)。逐点外插步骤是根据前一帧 $I'_{t-1}$ 的内容为下一步的多尺度

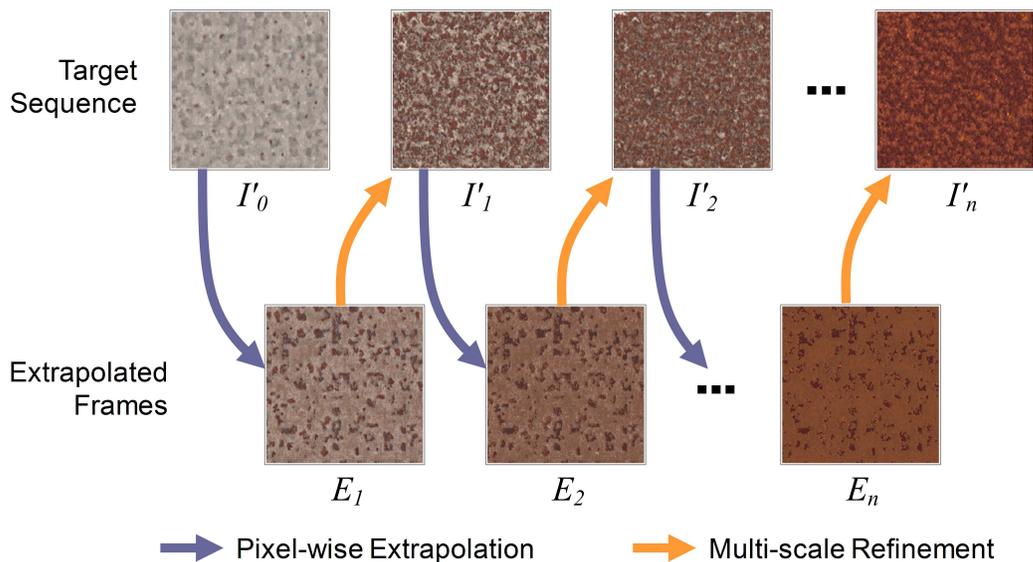


图 6.5: 帧间一致性纹理合成

纹理优化步骤生成初始解 $E_t$ 。具体过程是根据当前帧 $I'_t$ 的目标风化级别分布图上的风化程度 $L'(p, t)$ 值将前一帧的逐个像素内容在表观流形上移动，并用新的具有目标风化程度的表面质感样本 $x_t$ 代替原来的内容 $x_{t-1}$ ：

$$x_t = \arg \min_{x_i \in \Omega} \phi(x_i, x_{t-1}) \quad (6.72)$$

其中集合 $\Omega$ 表示表观流形上所有风化程度为目标风化程度 $L'(p_x, t)$ 的样本点：

$$\Omega = \{x | \varphi(x) = L'(p_x, t)\} \quad (6.73)$$

这个步骤所产生的 $I'_t$ 初始解 $E_t$ 能够保证每个像素上的表面质感变化都是在表观流形上的合理时变轨迹，但是这里没有办法处理逐帧变化的纹理模式。忽略纹理模式的在局部细节上改变将产生同样本不匹配的序列。其后的多尺度纹理优化步骤可以将纹理模式的演变合成到最终的序列上。多尺度纹理优化步骤在初始解的基础上，通过从大到小的多尺度纹理优化来合成既同前一帧内容一致又符合当前帧风化级别分布的纹理图像。表6.8是多尺度优化步骤的伪代码。我们采用了同[Kwatra et al., 2005]类似的方法，在多个尺度上多次优化目标纹理图像，但是引入了两个额外的约束：符合目标风化级别和保证帧间各点变化的合法性。在给定每一个块尺度 $m$ 后，我们用类似[Efros and Freeman, 2001]的方法将目标纹理划分成在边界上有一定重叠的子块，然后遍历所有的子块。根据每个子块 $\psi_p$ 在风化级别分布图对应位置 $p$ 上的风化程度确定

```

抖动(Jitter)初始解 $E_t$ 得到初始的 $I'_t$ 
For 各个纹理优化的块大小 $m = N \cdots 1$ 
  For 目标纹理 $I'_t$ 中的各个子块 $\psi_p$ 
    根据目标风化级别分布上对应的区域确定可选纹理样本区域 $Z_p$ 
    记录在 $Z_p$ 中搜索同 $\psi_p$ 最匹配的区域 $\psi'_p$ 
    用各个子块上搜索到最匹配的区域 $\{\psi'_p\}$ 更新 $I'_t$ 
    检查更新后的 $I'_t$ 变化轨迹的合法性
   $t = t + 1$ 

```

表 6.8: 多尺度纹理优化步骤的伪代码。

可选纹理样本区域 $Z_p$ :

$$Z_p = \{q \mid \varepsilon > |L(q) - L'(p, t)|\} \quad (6.74)$$

然后记录每个子块在其各自对应的可选纹理样本区域匹配到的最好的块 $\psi'_p$ :

$$\psi'_p = \arg \min_{\psi'_x \in Z_p} \|\psi'_x - \psi_p\| \quad (6.75)$$

然后通过[Kwatra et al., 2005]中最大化似然估计的方法合并各个子块, 更新正在合成的纹理图像 $I'_{t+1}$ 。这个步骤保证了合成序列满足目标风化级别的约束。在每一个尺度下做纹理优化之后, 我们检查都要当前帧逐像素表面质感变化的合理性。在每次 $I'_t$ 更新之后, 我们将所有风化程度发生反转的点集 $\mathcal{F}$ 强行置成更新之前的值。风化程度发生反转的点被定义为:

$$\mathcal{F} = \{p \mid \varphi(I'(p, t)) < \varphi(I'(p, t-1))\} \quad (6.76)$$

对于符合目标风化级别和保证帧间各点变化合法性这两个约束, 在我们的方法里是分开优化的, 在一定程度上会互相破坏。但是由大到小的纹理优化块尺度保证了这两个步骤对目标纹理图像 $I'_t$ 的改动都是逐渐变小的, 直到最后做 $1 \times 1$ 的逐像素优化时将几乎没有改动, 使结果收敛到一个较好的满足两方面约束的平衡点。图6.6中的(e)是用这个方法合成的例子。值得注意的是表6.8中的第一步是抖动(jitter)初始解的步骤。抖动初始解是指随机选择可选纹理样本区域 $Z_p$ 中的块内容同初始解做融合来初始化 $I'_t$ :

$$\psi'_p = (1 - \lambda) \psi_p^E + \lambda Z_p^* \quad (6.77)$$

其中 $\psi_p^E$ 表示 $E_t$ 中对应位置的块内容,  $Z_p^*$ 为可选纹理样本区域中一个随机位置的块内容。在这个步骤中, 我们用纹理优化过程中最大的块大小 $N$ 的 $\frac{1}{4}$ 作为抖动步骤的块大小, 并且用没有重叠也没有缝隙的方式将目标纹理图像划分成若干个 $\frac{1}{4}N \times \frac{1}{4}N$ 大小

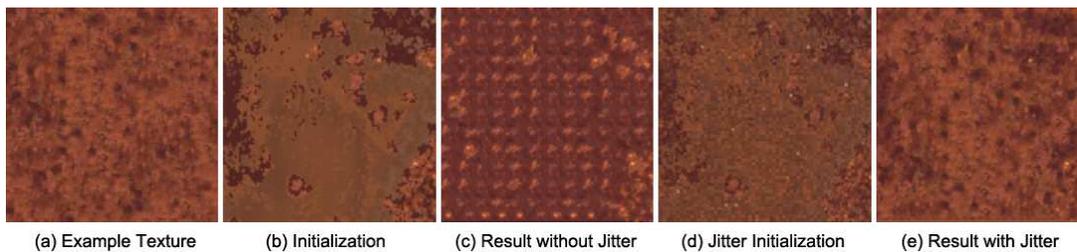


图 6.6: 抖动初始解对合成结果的影响

的块。引入这个步骤是为了帮助后续的多尺度纹理优化过程得到更好的结果。因为逐像素外插步骤无法产生新的纹理样式，对于纹理样式变化比较剧烈的阶段(如某些纹理样式的突然出现)，逐像素外插得到的初始解缺乏细节，容易使后继的纹理优化步骤重复使用同一块局部的纹理样本。比如图6.6所示，在纹理样式从没有细节到逐渐出现颗粒细节的过程中，如果没有抖动初始值就可能大量出现重复样式(repetition pattern)，如图6.6(c)。

## 6.5 表观流形的应用及实验结果

通过6.3节讨论的方法，我们可以得到风化程度的空间分布，这本质是一个逆向的问题，从物体外观得到物体风化程度的分布。我们的方法解决了将风化物体上的风化程度和风化外观分离，这样使得我们可以替换或编辑风化程度的分布序列同时保留其原有的风化外观，这样我们就可以做到三维物体表面的风化效果映射和风化过程的正向和逆向模拟两个应用。当然我们也可以替换风化外观而保留风化程度的分布，这样我们就可以做到风化效果的置换。我们也尝试将表观流形的分析方法应用在分析单张照片中物体的色彩空间，可以在一定程度上编辑照片中物体的风化程度。

我们在一台配置有P4 2.8GHz CPU和2GB内存的PC上实现了表面质感分析及合成系统。表6.9中给出了我们实验中所采集的样本的分辨率以及纹理合成时采用的最大块尺寸 $N$ 。图6.7列举了所有的样本的外观，从(a)到(g)的各个样本按表6.9中的

样本	样本分辨率	纹理合成块尺寸
铁锈(图6.1)	269 × 361	32
香蕉皮(图6.1)	540 × 499	22
树叶(图6.1)	970 × 712	5
铜锈(图6.1)	1010 × 750	26
木纹(图6.1)	640 × 480	22
石头(图6.1)	800 × 498	32

表 6.9: 时变表面质感实验中采集的样本的规格

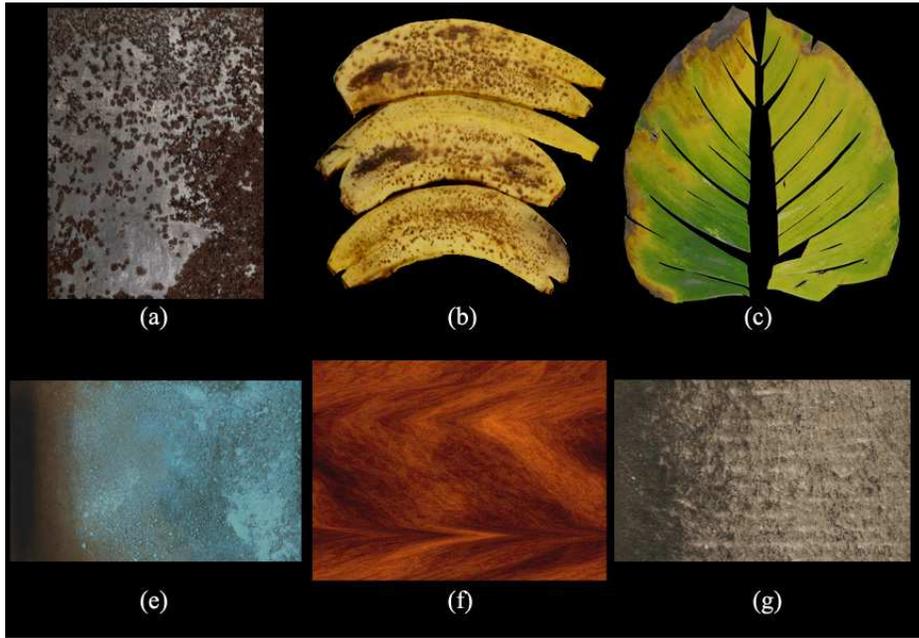


图 6.7: 时变表面质感实验中采集的样本

顺序排列。为了计算效率，我们在样本的表面质感模型空间中均匀采样了10000个样本点来建立表观流形，其余点样本点的风化程度值通过对表观流形的最近邻采样得到。对于我们实验所采用的样本，表观流形分析阶段大约需要5分钟，时变表面质感合成步骤取决于样本及目标序列的分辨率需要1至5小时不等。我们用类似[Kautz et al., 2000][Kautz and McCool, 2000]的方法实现了在全局光照下实时绘制具有时变表面质感物体的绘制系统。在配置有Nvidia Geforce7800 256M显存的图形加速卡的PC上，我们的绘制系统大致可以达到20Hz的帧率。

### 6.5.1 三维物体表面的风化效果映射

表观流形最直接的应用就是将获取到的风化效果映射到新的三维物体表面，如图6.2中合成(synthesis)部分所示。这个应用主要是将6.4中平面合成的方法扩展到任意三维物体表面上，也就是说其中的目标风化级别序列 $L'(p, t)$ 和目标纹理序列 $I'(p, t)$ 都是定义在三维物体表面上的。我们采用类似[Zhou et al., 2005a]中的方法，先用[Zhou et al., 2004]将三维物体分成若干片(charting)，然后将各片参数化到平面上，形成纹理地图集(texture atlas)。然后在纹理地图集上做平面的纹理合成即可。需要注意的是，在纹理优化步骤中需要考虑纹理地图集中各个分片公有边界(shared boundary)的一致性。

图6.1和6.10上排是将铁锈的风化过程映射到一个雕塑模型上的绘制结果，真实采集的样本如图6.1(a)。大尺度的发锈程度分布以及时间变化演化序列由 $\gamma - Ton$ 跟踪

模拟[Chen et al., 2005]得到。绘制结果很真实地重现了铁锈随时间变化的反射特性的改变以及局部纹理细节的演化，并且同大尺度的风化级别分布符合得很好。图6.10给出了我们的方法同纹理线性插值的结果的比较，纹理线性插值的序列(下排)不仅没有纹理模式演变过程，并且中间还产生了一些样本中不存在的BRDF，如锈色的高亮部分。

图6.11是香蕉皮的失水过程的合成序列，图中的(a)给出了采集的样本以及样本上的风化程度分布图。香蕉表皮上的大尺度风化程度的演化过程由艺术家指定若干关键帧插值而成。我们将样本的空间纹理特征及其演化过程成功地合成在新的几何模型上，并可以得到高真实感的绘制结果。

## 6.5.2 风化过程的正向和逆向模拟

风化过程的正向和逆向模拟是指从真实物体当然的风化程度及其分布为起点，使得风化程度变大或变小。如图6.8所示，首先我们对要作模拟的外观(a)进行6.3节中所述的分析过程，得到对应的表观流形和风化程度的分布(b)。然后我们可以根据用户的意愿修改风化程度分布图，得到使总体风化程度上升(weathering)或下降(deweathering)的新的风化程度分布图(c)。然后再将该物体的风化效果根据新的风化程度的分布合成到物体上(d)。为了使用户可以直观地调整风化程度分布图，我们在时变表面质感实时绘制系统的基础上，实现了一个能够实时预览的交互系统。图6.9是这个系统的用户界面。在这个系统中我们通过一个映射函数 $f(\cdot)$ 来实现对风化程度分布图的修改，用户通过这个函数将原始的风化程度 $d_0$ 变换成新的值 $d$ ：

$$d = f_t(d_0) \quad (6.78)$$

其中时间 $t$ 是指映射函数 $f(\cdot)$ 的时间序列。我们在交互界面中用样条曲线来表示映射函数 $f(\cdot)$ (图6.9中的左下角)，用户可以通过调整相应的控制点来编辑这个映射函数。该系统基于关键帧来实现映射函数时间序列的编辑。用户可以在几个关键帧上对 $f(\cdot)$ 做

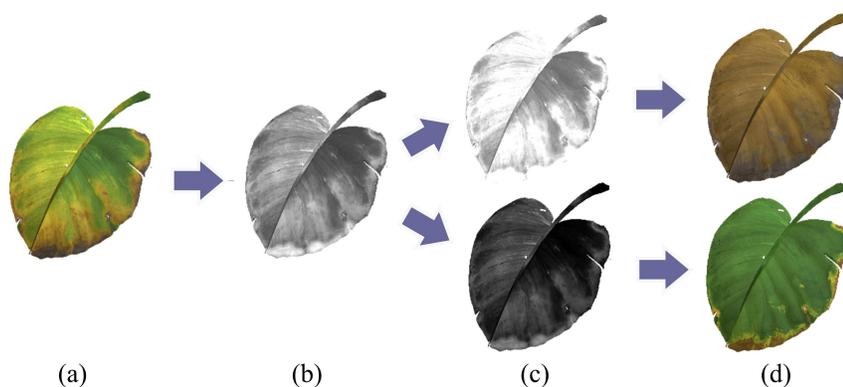


图 6.8: 风化过程的正向和逆向模拟

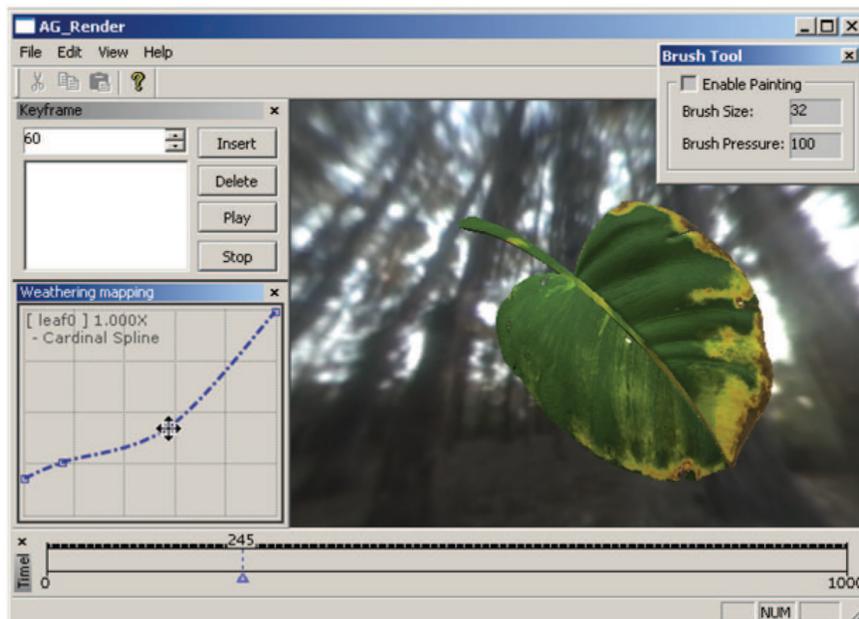


图 6.9: 风化过程的正/逆向模拟的交互系统

手工修改，系统可以插值得到映射函数的整个序列。为了支持实时的预览，我们预先根据空间均匀的目标风化级别序列 $L'(p, t) = t (t \in [0, 1])$ 在物体表面合成“标准”时变表面质感序列 $I'_s(p, t)$ 。对于任意调整得到的风化程度分布图 $D(p)$ ，我们用类似三维纹理映射的方式对标准序列进行重采样就可以快速得到对应的物体表面质感的分布 $I'(p)$ ：

$$I'(p) = I'_s(p, D(p)) \quad (6.79)$$

在用户经过多次调整后，我们根据最终确定下来的风化程度分布图序列用6.4节的方法合成最终的时变表面质感序列。在图6.12中最前面的一片叶子是用上面提到的方法合成的，其他叶子用传统的纹理映射方法绘制。在这个例子中处理表面的BRDF，我们也捕获了逐点的半透明程度[Gardner et al., 2003]一起参与表观流形的建模。图中的三个不同时刻的叶子是通过我们的风化过程正/逆向模拟的方法产生。可以看到叶子枯萎过程中表面质感的变化，包括反射属性的变化和透明度的变化。

### 6.5.3 风化效果的置换

在时变表面质感模型同风化程度的分布的表达之后，就使得我们可以将真实物体上的时变表面质感模型替换掉而保留原有的风化程度分布，这就是风化效果的置换的含义。具体的，对于两个风化物体 $O_1$ 和 $O_2$ 可以表示为：

$$\begin{aligned} O_1(p) &= I'_{s1}(p, D_1(p)) \\ O_2(p) &= I'_{s2}(p, D_2(p)) \end{aligned} \quad (6.80)$$



图 6.10: 基于表观流形流形的合成结果和纹理线性插值的比较

我们可以将  $I'_{s_1}$  用  $I'_{s_2}$  替换，则在物体  $O_1$  上就有：

$$O_1(p) = I'_{s_2}(p, D_1(p)) \quad (6.81)$$

这样就实现了风化效果的置换。当然  $I'_{s_2}$  不是简单的代入，而是以  $O_2$  的表面质感为样本， $D_1(p)$  为目标风化程度约束进行表面质感的纹理合成。

在图6.13中，我们用深度扫描仪(range scanner)获取了一个实际铜佛雕像的几何模型，并用[Zhou et al., 2005b]的方法获得铜佛雕像表面的彩色纹理(a)。通过对铜佛雕像表面彩色纹理的表观流形分析，我们得到铜佛雕像风化程度分布(b)，以一个分布为约束，我们合成了铜锈(c)，石头(d)和木纹(e)。置换后的铜佛不仅有新的时变表面质感的绘制效果，并且保留了其风化程度的原有分布。



图 6.11: 香蕉皮的失水过程模拟



图 6.12: 一片树叶的正/逆向风化模拟



图 6.13: 风化效果的置换

## 6.6 本章小结及讨论

在这一章里，我们提出了表观流形方法用于时变表面质感建模。我们的方法可以根据真实物体的单一时刻外观来生成该物体所涉及的风化过程的时变效果。我们的方法对现有的大尺度风化模拟技术也是一个重要的补充，在风化过程中合成小尺度上的表面质感细节以及纹理样式的演化。基于我们的方法，输入数据可以很容易地采集到，自然界中表面质感随时间的非线性变化过程也可以比较容易地重现。

为了可以用我们的方法有效地分析时变材质样本，其内在的风化过程必须只能引起外观上的逐渐变化。对于一些在风化过程中物体外观发生突变的情况，例如开裂和剥落。这样的时变过程会在表观流形上呈现不连续的情形，从而得到不正确的风化程度。另外，我们这里假设表观流形中主导的变化是由某种风化过程引起的，因此如果样本本身有较明显的非风化因素的外观变化，我们的方法将无法处理。同样样本中含有多个显著的互相交错的风化过程的情况也不在我们处理的范围之内。

虽然在上面的讨论中，我们只需要样本在单一时刻的外观数据，但是我们也可以处理同样的风化过程在多个不同时刻获取的外观数据。在这种情况下，时变表面质感合成阶段会有更为丰富的可选样本，提高合成的时变表面质感序列的质量。在处理多个样本数据时，我们的方法不需要各时刻的样本是逐点对齐的，从而避免了图像对准的过程，极大地方便了多个样本数据的参与。这个方法使我们可以处理更大范围的

时变材质的建模，例如处理极其缓慢的风化过程，我们可以联合使用不同年代的不同物体的样本，只要它们是同一种材质的。图6.11中香蕉的例子，就是将两个香蕉的样本拼合在一起分析得到不同阶段的失水效果。

## 第七章 总结与展望

本文研究了计算机图形学领域中表面质感建模的课题，基于数据驱动的建模思想提出了新颖的表面质感模型，拓展了高真实感绘制效果和能够处理的材质范围。本文对于提出的表面质感模型，同时也详细讨论了相关的从真实物体采样的问题和高效绘制的问题。同时文中也介绍了相应的采集表面质感模型的设备，包括一个是主要用于BTF数据采集的多功能光学平台和主要用于SVBRDF数据采集的平面线性光源反照度测定仪，并深入讨论了真实物体的表面质感模型测量实验的实施细节。

本文主要讨论了几何细微结构、半透明以及时变表面质感三种类型物体的表面质感建模问题。第一，提出了基于细微结构距离函数(MDF)的细微结构模型，给出了融合在BTF数据采集的过程中的模型数据获取方法和实时硬件加速绘制的算法。文中首次提出了可以从真实世界的样本中采样的细微结构模型，文中也讨论了将该模型应用到任意形状物体上的技术细节，讨论了几何网格的曲率变化对细微结构绘制结果的影响。提出了准同质半透明材质的概念定义，并在此基础上建立了针对这类物体的BSSRDF分解模型，将光线传输分成了局部贡献和全局贡献。讨论了基于稀疏激光线扫描的全局贡献模型数据的获取方法以及在任意形状物体上的绘制方法。该方法第一次使计算机图形学中能够从真实世界获取并绘制非均质的半透明物体。提出了“表观流形”的建模思想，并此基础上的建立的时变表面质感模型。首次提出了从单一时间样本分析随时间演变的表面质感变化趋势的方法，极大提高了时变表面质感模型的获取效率。并解决了从物体外观样本中分离风化程度分布和时变表面质感的耦合关系的问题，解决了从物体外观推测风化程度分布的逆向问题。这几个方面的研究工作，推动了表面质感建模的进展，在计算机图形学高真实感绘制领域有重要的理论贡献和实际意义。

表面质感建模进一步的工作，主要前景在于突破现有的黑盒压缩方式以及静态模型的局限，通过分析自然界物体表面质感的一般规律以及内在机制，建立构造性模型。通过稀疏或局部的样本外观采样来建立模型，并通过模型的泛化能力来构造各种条件下的物体外观。表面质感建模将更多着眼于BSSRDF所表述的复杂物体外观，尤其是带有异质物质分布的半透明物体，也包括一类无法用扩散方程描述的

多次光线散射过程，例如泡沫以及水花等。表面质感建模的动态模型不仅可以是描述物体风化的单调过程，也可以是由运动等因素引起的往复过程。另一方面，表面质感在任意几何模型上的绘制依旧是一个充满挑战的课题，尤其是涉及到全局光线传播的过程(如次表面散射)，除了基于黑盒方式的预计算辐射传输方法(PRT) [Sloan et al., 2002][Wang et al., 2005b]至今尚且没有高效的实时绘制算法。这几个方面都是表面质感建模进一步的研究方向。

# 参考文献

- [Ashikmin et al., 2000] Ashikmin, M., Premože, S., and Shirley, P. (2000). A microfacet-based brdf generator. In *SIGGRAPH '00: Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 65–74, New York, NY, USA. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [Ballester, 2001] Ballester, C. Bertalmio, M. C. V. S. G. V. J. (2001). Filling-in by joint interpolation of vector fields and gray levels. In *IEEE Transactions on Image Processing*, pages 1200–1211, New York, NY, USA.
- [Bertalmio et al., 2000] Bertalmio, M., Sapiro, G., Caselles, V., and Ballester, C. (2000). Image inpainting. In *SIGGRAPH '00: Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 417–424, New York, NY, USA. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [Blinn, 1977] Blinn, J. F. (1977). Models of light reflection for computer synthesized pictures. In *SIGGRAPH '77: Proceedings of the 4th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 192–198, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Blinn, 1978] Blinn, J. F. (1978). Simulation of wrinkled surfaces. *Computer Graphics (SIGGRAPH '78 Proceedings)*, 12(3):286–292.
- [Blinn, 1982] Blinn, J. F. (1982). Light reflection functions for simulation of clouds and dusty surfaces. In *SIGGRAPH '82: Proceedings of the 9th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 21–29, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Blinn and Newell, 1976] Blinn, J. F. and Newell, M. E. (1976). Texture and reflection in computer generated images. *Commun. ACM*, 19(10):542–547.
- [Bosch et al., 2004] Bosch, C., Pueyo, X., Merillou, S., and Ghazanfarpour, D. (2004). A physically-based model for rendering realistic scratches. *Computer Graphics Forum*, 23(3):361–370.

- [Bouguet and Perona, 1998] Bouguet, J.-Y. and Perona, P. (1998). 3d photography on your desk. In *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV98)*, pages 43–50.
- [Brand., 2002] Brand., M. (2002). *Charting a manifold*. Neural Information Processing Systems 15 (NIPS'2002).
- [Chen et al., 2002] Chen, W.-C., Bouguet, J.-Y., Chu, M. H., and Grzeszczuk, R. (2002). Light field mapping: Efficient representation and hardware rendering of surface light fields. *ACM Trans. on Graphics*, 21(3):447–456.
- [Chen et al., 2004] Chen, Y., Tong, X., Wang, J., Lin, S., Guo, B., and Shum, H.-Y. (2004). Shell texture functions. *ACM Trans. Graph.*, 23(3):343–353.
- [Chen et al., 2005] Chen, Y., Xia, L., Wong, T.-T., Tong, X., Bao, H., Guo, B., and Shum, H.-Y. (2005). Visual simulation of weathering by  $\gamma$ -ton tracing. *ACM Trans. Graph.*, 24(3):1127–1133.
- [Chuang et al., 2000] Chuang, Y.-Y., Zongker, D. E., Hindorff, J., Curless, B., Salesin, D. H., and Szeliski, R. (2000). Environment matting extensions: towards higher accuracy and real-time capture. In *Proc. SIGGRAPH 2000*, pages 121–130.
- [Cohen and Deussen, 2003] Cohen, M. F., S. J. H. S. and Deussen, O. (2003). Wang tiles for image and texture generation. *ACM Transactions on Graphics, SIGGRAPH 2003*, page 287 – 294.
- [Cook, 1984] Cook, R. L. (1984). Shade trees. In *SIGGRAPH '84: Proceedings of the 11th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 223–231, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Cook and Torrance, 1982] Cook, R. L. and Torrance, K. E. (1982). A reflectance model for computer graphics. *ACM Trans. Graph.*, 1(1):7–24.
- [Curless and Levoy, 1995] Curless, B. and Levoy, M. (1995). Better optical triangulation through spacetime analysis. In *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV95)*, pages 987–994.
- [Dana, 2001] Dana, K. J. (2001). Brdf/btf measurement device. In *Proceedings of eighth IEEE international conference on computer vision (ICCV)*, volume 2, pages 460–466.

- [Dana et al., 1999] Dana, K. J., van Ginneken, B., Nayar, S. K., and Koenderink, J. J. (1999). Reflectance and texture of real-world surfaces. *ACM Transactions on Graphics*, 18(1):1–34.
- [Debevec et al., 2000] Debevec, P., Hawkins, T., Tchou, C., Duiker, H.-P., Sarokin, W., and Sagar, M. (2000). Acquiring the reflectance field of a human face. In *Proc. SIGGRAPH 2000*, pages 145–156.
- [Debevec and Malik, 1997] Debevec, P. E. and Malik, J. (1997). Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. pages 369–378.
- [Desbenoit et al., 2004] Desbenoit, B., Galin, E., and Akkouche, S. (2004). Simulating and modeling lichen growth. *Computer Graphics Forum* 23, 3:341 – 350.
- [Diefenbach, 1996] Diefenbach, P. J. (1996). *Pipeline Rendering: Interaction and Realism through Hardware-Based Multi-Pass Rendering*. Ph.D. thesis.
- [Dorsey et al., 1999] Dorsey, J., Edelman, A., Legakis, J., Jensen, H. W., and Pedersen, H. K. (1999). Modeling and rendering of weathered stone. In *Proc. SIGGRAPH 1999*, pages 225–234.
- [Dorsey and Hanrahan, 1996] Dorsey, J. and Hanrahan, P. (1996). Modeling and rendering of metallic patinas. In *SIGGRAPH '96*, pages 387–396.
- [Dorsey et al., 1996] Dorsey, J., Pedersen, H. K., and Hanrahan, P. (1996). Flow and changes in appearance. In *SIGGRAPH '96*, pages 411–420.
- [Efros and Freeman, 2001] Efros, A. A. and Freeman, W. T. (2001). Image quilting for texture synthesis and transfer. *Proceedings of SIGGRAPH 2001*, page 341 – 346.
- [Efros and Leung, 1999] Efros, A. A. and Leung, T. (1999). Texture synthesis by non-parametric sampling. *International Conference on Computer Vision*, page 1033 – 1038.
- [Egan and Hilgeman, 1979] Egan, W. G. and Hilgeman, T. W. (1979). *Optical Properties of Inhomogeneous Materials*. Academic Press, New York.
- [Fiume, 2001] Fiume, E. (2001). Dedication to Alain Fournier. In *Proc. SIGGRAPH '01*, page 10.
- [Freeman and Pasztor, 2002] Freeman, W. T., J. T. R. and Pasztor, E. C. (2002). Example-based super-resolution. In *IEEE Comput. Graph. Appl.*, page 56 – 65.

- [Furukawa et al., 2002] Furukawa, R., Kawasaki, H., Ikeuchi, K., and Sakauchi, M. (2002). Appearance based object modeling using texture database: acquisition, compression and rendering. In *EGRW '02: Proceedings of the 13th Eurographics workshop on Rendering*, pages 257–266, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland. Eurographics Association.
- [G. Eason and Turnbull., 1978] G. Eason, A. Veitch, R. N. and Turnbull., F. (1978). *The theory of the backscattering of light by blood*. *Journal of Physics*, 11:1463 – 1479.
- [Gardner et al., 2003] Gardner, A., Tchou, C., Hawkins, T., and Debevec, P. (2003). Linear light source reflectometry. *ACM Trans. Graph.*, 22(3):749–758.
- [Georghiades et al., 2005] Georghiades, A. S., Lu, J., Xu, C., Dorsey, J., and Rushmeier, H. (2005). Observing and transferring material histories. Technical Report 1329, Yale University.
- [Goesele et al., 2004] Goesele, M., Lensch, H. P. A., Lang, J., Fuchs, C., and Seidel, H.-P. (2004). Disco: acquisition of translucent objects. *ACM Trans. Graph.*, 23(3):835–844.
- [Gu et al., 2006] Gu, J., Tu, C.-I., Ramamoorthi, R., Belhumeur, P., Matusik, W., and Nayar, S. (2006). Time-varying surface appearance: acquisition, modeling and rendering. *ACM Trans. Graph.*, 25(3):762–771.
- [Haber et al., 2005] Haber, T., Mertens, T., Bekaert, P., and Reeth, F. V. (2005). A computational approach to simulate subsurface light diffusion in arbitrarily shaped objects. In *GI '05: Proceedings of the 2005 conference on Graphics interface*, pages 79–86, School of Computer Science, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada. Canadian Human-Computer Communications Society.
- [Han and Perlin, 2003] Han, J. Y. and Perlin, K. (2003). Measuring bidirectional texture reflectance with a kaleidoscope. *ACM Trans. Graph.*, 22(3):741–748.
- [Hanrahan and Krueger, 1993] Hanrahan, P. and Krueger, W. (1993). Reflection from layered surfaces due to subsurface scattering. In *Proc. SIGGRAPH 1993*, pages 165–174.
- [Hao et al., 2003] Hao, X., Baby, T., and Varshney, A. (2003). Interactive subsurface scattering for translucent meshes. In *ACM Symposium on Interactive 3D Graphics*, pages 75–82, Monterey, CA.
- [Heeger and Bergen, 1995] Heeger, D. J. and Bergen, J. R. (1995). Pyramid-based texture analysis synthesis. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 95*, page 229 – 238.

- [Heidrich et al., 2000] Heidrich, W., Daubert, K., Kautz, J., and Seidel, H.-P. (2000). Illuminating micro geometry based on precomputed visibility. *Computer Graphics (SIGGRAPH '00 Proceedings)*, pages 455–464.
- [Henyey and Greenstein, 1993] Henyey, L. G. and Greenstein, J. L. (1993). Diffuse radiation in the galaxy. *Astrophysics Journal*, pages 70–83.
- [Hirche et al., 2004] Hirche, J., Ehlert, A., Guthe, S., and Doggett, M. (2004). Hardware accelerated per-pixel displacement mapping. In *GI '04: Proceedings of the 2004 conference on Graphics interface*, pages 153–158, School of Computer Science, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada. Canadian Human-Computer Communications Society.
- [Hsu and Wong, 1995] Hsu, S.-C. and Wong, T.-T. (1995). Simulating dust accumulation. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 15(1):18–22.
- [Ishimaru, 1978a] Ishimaru, A. (1978a). *Volume 1. Wave Propagation and Scattering in Random Media: Single Scattering and Transport Theory*. Academic Press, New York.
- [Ishimaru, 1978b] Ishimaru, A. (1978b). *Volume 2. Wave Propagation and Scattering in Random Media: Multiple Scattering, Turbulence, Rough Surface and Remote Sensing*. Academic Press, New York.
- [Jenkins and White, 1976] Jenkins, F. A. and White, H. E. (1976). *Fundamentals of Optics*. McGraw-Hill College; 4th edition.
- [Jensen and Buhler, 2002] Jensen, H. W. and Buhler, J. (2002). A rapid hierarchical rendering technique for translucent materials. In *SIGGRAPH '02: Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 576–581, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Jensen et al., 1999] Jensen, H. W., Legakis, J., and Dorsey, J. (1999). Rendering of wet materials. pages 273–282.
- [Jensen et al., 2001] Jensen, H. W., Marschner, S. R., Levoy, M., and Hanrahan, P. (2001). A practical model for subsurface light transport. In *SIGGRAPH '01: Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 511–518, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Jojic and Kannan, 2003] Jojic, N., F. B. and Kannan, A. (2003). Epitomic analysis of appearance and shape. In *International Conference on Computer Vision*.

- [Kaneko et al., 2001] Kaneko, T., Takahei, T., Inami, M., Kawakami, N., Yanagida, Y., Maeda, T., and Tachi, S. (2001). Detailed shape representation with parallax mapping. In *ICAT2001(11th International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence)*, pages 205–208.
- [Kautz and McCool, 1999] Kautz, J. and McCool, M. D. (1999). Interactive rendering with arbitrary brdfs using separable approximations. In *Eurographics Workshop on Rendering*, pages 281–292.
- [Kautz and McCool, 2000] Kautz, J. and McCool, M. D. (2000). Approximation of glossy reflection with prefiltered environment maps. In *Proceedings of the Graphics Interface 2000*, pages 119–126, Toronto, Ontario. Canadian Information Processing Society.
- [Kautz et al., 2000] Kautz, J., Vázquez, P.-P., Heidrich, W., and Seidel, H.-P. (2000). Unified approach to prefiltered environment maps. In *Rendering Techniques*, pages 185–196.
- [Koenderink and van Doorn, 2001] Koenderink, J. and van Doorn, A. (2001). Shading in the case of translucent objects. *Proc. SPIE*, 4299:312–320.
- [Koenderink et al., 1996] Koenderink, J. J., van Doorn, A. J., and Stavridi, M. (1996). Bidirectional reflection distribution function expressed in terms of surface scattering modes. In *ECCV '96: Proceedings of the 4th European Conference on Computer Vision-Volume II*, pages 28–39, London, UK. Springer-Verlag.
- [Kwatra et al., 2005] Kwatra, V., Essa, I., Bobick, A., and Kwatra, N. (2005). Texture optimization for example-based synthesis. In *SIGGRAPH '05: ACM SIGGRAPH 2005 Papers*, pages 795–802, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Kwatra et al., 2003] Kwatra, V., Schödl, A., Essa, I., Turk, G., and Bobick, A. (2003). Graphcut textures: image and video synthesis using graph cuts. In *SIGGRAPH '03: ACM SIGGRAPH 2003 Papers*, pages 277–286, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Lafortune et al., 1997] Lafortune, E. P. F., Foo, S.-C., Torrance, K. E., and Greenberg, D. P. (1997). Non-linear approximation of reflectance functions. In *SIGGRAPH '97: Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 117–126, New York, NY, USA. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [Landy and Movshon, 1991] Landy, M. and Movshon, J. A. (1991). A microfacet-based brdf generator. In *Computational Models of Visual Processing*, pages 3–20. Cambridge, MA: MIT Press.

- [Lensch et al., 2003] Lensch, H. P. A., Goesele, M., Bekaert, P., Kautz, J., Magnor, M. A., Lang, J., and Seidel, H.-P. (2003). Interactive rendering of translucent objects. *Computer Graphics Forum*, 22(2):195–206.
- [Liang et al., 2001] Liang, L., Liu, C., Xu, Y., Guo, B., and Shum, H.-Y. (2001). Real-time texture synthesis using patch-based sampling. *ACM Transactions on Graphics*, 20(3).
- [Liu et al., 2004] Liu, X., Hu, Y., Zhang, J., Tong, X., Guo, B., and Shum, H.-Y. (2004). Synthesis and rendering of bidirectional texture functions on arbitrary surfaces. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 10(3):278–289.
- [Liu et al., 2001] Liu, X., Yu, Y., and Shum, H.-Y. (2001). Synthesizing bidirectional texture functions for real-world surfaces. *Computer Graphics (SIGGRAPH '01 Proceedings)*, pages 97–106.
- [Lu et al., 2007] Lu, J., Georgiades, A. S., Glaser, A., Wu, H., Wei, L.-Y., Guo, B., Dorsey, J., and Rushmeier, H. (2007). Context-aware textures. *ACM Trans. Graph.*, 26(1):3.
- [Lu et al., 2006] Lu, J., Georgiades, A. S., Rushmeier, H., Dorsey, J., and Xu, C. (2006). Synthesis of material drying history: phenomenon modeling, transferring and rendering. In *SIGGRAPH '06: ACM SIGGRAPH 2006 Courses*, page 6, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Malzbender et al., 2001] Malzbender, T., Gelb, D., and Wolters, H. (2001). Polynomial texture maps. In *SIGGRAPH '01: Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 519–528, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Mammen, 1989] Mammen, A. (1989). Transparency and antialiasing algorithms implemented with the virtual pixel maps technique. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 9(4):43–55.
- [Masselus et al., 2003] Masselus, V., Peers, P., Dutrè, P., and Willems, Y. D. (2003). Relighting with 4d incident light fields. *ACM Trans. on Graphics*, 22(3):613–620.
- [Matusik et al., 2003] Matusik, W., Pfister, H., Brand, M., and McMillan, L. (2003). A data-driven reflectance model. *ACM Trans. Graph.*, 22(3):759–769.
- [Matusik et al., 2002a] Matusik, W., Pfister, H., Ngan, A., Beardsley, P., Ziegler, R., and McMillan, L. (2002a). Image-based 3d photography using opacity hulls. *ACM Trans. Graph.*, 21(3):427–437.

- [Matusik et al., 2002b] Matusik, W., Pfister, H., Ngan, A., Beardsley, P., Ziegler, R., and McMillan, L. (2002b). Image-based 3d photography using opacity hulls. In *Proc. SIGGRAPH '02*, pages 427–437.
- [Matusik et al., 2002c] Matusik, W., Pfister, H., Ziegler, R., Ngan, A., and McMillan, L. (2002c). Acquisition and rendering of transparent and refractive objects. In *Proc. Eurographics Workshop on Rendering*, pages 267–278.
- [Max, 1988] Max, N. (July 1988). Horizon mapping: shadows for bump-mapped surfaces. *The Visual Computer*, 4(2):109–117.
- [McCool et al., 2001] McCool, M. D., Ang, J., and Ahmad, A. (2001). Homomorphic factorization of brdfs for high-performance rendering. In *Proceedings of Computer graphics and interactive techniques*, pages 171–178.
- [Merillou et al., 2001] Merillou, S., Dischler, J., and Ghazanfarpour, D. (2001). Surface scratches, measuring, modeling and rendering. *The Visual Computer*, 17:30–45.
- [Mertens et al., 2003] Mertens, T., Kautz, J., Bekaert, P., Seidel, H.-P., and Reeth, F. V. (2003). Interactive rendering of translucent deformable objects. In *Proc. Eurographics Workshop on Rendering*, pages 130–140.
- [Miller, 1994] Miller, G. (1994). Efficient algorithms for local and global accessibility shading. In *SIGGRAPH '94*, pages 319–326.
- [Mueller et al., 2003] Mueller, G., Meseth, J., and Klein, R. (2003). Compression and real-time rendering of measured BTFs using local PCA. In *Proceedings of Vision, Modeling and Visualisation*.
- [Nakamae et al., 1990] Nakamae, E., Kaneda, K., Okamoto, T., and Nishita, T. (1990). A lighting model aiming at drive simulators. In *SIGGRAPH '90: Proceedings of the 17th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 395–404, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Ngan et al., 2005] Ngan, A., Durand, F., and Matusik, W. (2005). Experimental analysis of brdf models. *Eurographics Symposium on Rendering*, pages 613–620.
- [Nicodemus et al., 1977] Nicodemus, F. E., Richmond, J. C., Hsia, J. J., Ginsberg, I. W., and Limperis, T. (October 1977). Geometric considerations and nomenclature for reflectance. *Monograph 161, National Bureau of Standards (US)*.

- [Paquette et al., 2002] Paquette, E., Poulin, P., and Drettakis, G. (2002). The simulation of paint cracking and peeling. In *Graphics Interface 2002*, pages 59–68.
- [Peers et al., 2006] Peers, P., vom Berge, K., Matusik, W., Ramamoorthi, R., Lawrence, J., Rusinkiewicz, S., and Dutré, P. (2006). A compact factored representation of heterogeneous subsurface scattering. *ACM Transactions on Graphics*, 25(3):746–753.
- [Pharr and Hanrahan, 2000] Pharr, M. and Hanrahan, P. (July 2000). Monte carlo evaluation of non-linear scattering equations for subsurface reflection. In *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*.
- [Phong, 1975] Phong, B. T. (1975). Illumination for computer generated pictures. *Commun. ACM*, 18(6):311–317.
- [Policarpo et al., 2005] Policarpo, F., Oliveira, M. M., and Comba, J. L. D. (2005). Real-time relief mapping on arbitrary polygonal surfaces. In *ACM SIGGRAPH 2005 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games (I3D 2005)*.
- [Portilla and Simoncelli, 2000] Portilla, J. and Simoncelli, E. P. (2000). A parametric texture model based on joint statistics of complex wavelet coefficients. In *International Journal of Computer Vision*, page 49 – 70.
- [Roweis and Saul, 2000] Roweis, S. and Saul, L. (2000). Nonlinear dimensionality reduction by locally linear embedding. *Science*, 290(5500):2323–2326.
- [Rushmeier et al., 2001] Rushmeier, H., Balmelli, L., and Bernardini, F. (2001). Horizon map capture. In *Proceedings of Eurographics 01*.
- [S., 1997] S., D. J. (1997). Multiresolution sampling procedure for analysis and synthesis of texture images. *Proceedings of ACM SIGGRAPH 97*, page 361 – 368.
- [Sattler et al., 2003] Sattler, M., Sarlette, R., and Klein, R. (2003). Efficient and realistic visualization of cloth. In *EGRW '03: Proceedings of the 14th Eurographics workshop on Rendering*, pages 167–177, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland. Eurographics Association.
- [Sloan and Cohen, 2000] Sloan, P.-P. and Cohen, M. F. (2000). Interactive horizon mapping. *Eurographics Workshop on Rendering*, pages 281–286.

- [Sloan et al., 2002] Sloan, P.-P., Hall, J., Hart, J., and Snyder, J. (2002). Precomputed radiance transfer for real-time rendering in dynamic, low-frequency lighting environments. *Proceedings of SIGGRAPH 2002*, pages 527–536.
- [Sloan et al., 2003a] Sloan, P.-P., Liu, X., Shum, H.-Y., and Snyder, J. (2003a). Bi-scale radiance transfer. *ACM Trans. on Graphics*, 22(3):370–375.
- [Sloan et al., 2003b] Sloan, P.-P., Liu, X., Shum, H.-Y., and Snyder, J. (2003b). Bi-scale radiance transfer. *Proceedings of SIGGRAPH 2003*, pages 370–381.
- [Stam, 1995] Stam, J. (1995). Multiple scattering as a diffusion process. In *Euro. Rendering Workshop*, pages 41–50.
- [Suykens et al., 2003] Suykens, F., vom Berge, K., Lagae, A., and Dutré, P. (2003). Interactive rendering with bidirectional texture functions. In *Proc. Eurographics 03*.
- [T. J. Farrell and B.Wilson., 1992] T. J. Farrell, M. S. P. and B.Wilson. (1992). *A diffusion theory model of spatially resolved, steady-state diffuse reflectance for the noninvasive determination of tissue optical properties in vivo*. *Medical Physics.*, 19:879 – 888.
- [Tenenbaum et al., 2000] Tenenbaum, J. B., de Silva, V., and Langford, J. C. (2000). A global geometric framework for nonlinear dimensionality reduction. *Science*, 290(5500):2319–2322.
- [Tong et al., 2002] Tong, X., Zhang, J., Liu, L., Wang, X., Guo, B., and Shum, H.-Y. (2002). Synthesis of bidirectional texture functions on arbitrary surfaces. *ACM Transactions on Graphics*, 21(3):665–672.
- [Vasilescu and Terzopoulos, 2004a] Vasilescu, M. A. O. and Terzopoulos, D. (2004a). Tensor textures: multilinear image-based rendering. *ACM Trans. Graph.*, 23(3):336–342.
- [Vasilescu and Terzopoulos, 2004b] Vasilescu, M. A. O. and Terzopoulos, D. (2004b). TensorTextures: multilinear image-based rendering. *ACM Transactions on Graphics*, 23(3):336–342.
- [Wang et al., 2005a] Wang, H., Wu, Q., Shi, L., Yu, Y., and Ahuja, N. (2005a). Out-of-core tensor approximation of multi-dimensional matrices of visual data. *ACM Trans. Graph.*, 24(3):527–535.
- [Wang et al., 2003] Wang, L., Wang, X., Tong, X., Hu, S., Guo, B., and Shum, H.-Y. (2003). View-dependent displacement mapping. *ACM Transcation of Grahics (SIGGRAPH)*.

- [Wang et al., 2005b] Wang, R., Tran, J., and Luebke, D. (2005b). All-frequency interactive relighting of translucent objects with single and multiple scattering. *ACM Trans. Graph.*, 24(3):1202–1207.
- [Wang et al., 2004] Wang, X., Tong, X., Lin, S., Hu, S., Guo, B., and Shum, H.-Y. (2004). Generalized displacement maps. In *Eurographics Symposium on Rendering 2004*.
- [Ward, 1992] Ward, G. J. (1992). Measuring and modeling anisotropic reflection. In *SIGGRAPH '92: Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 265–272, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Wei and Levoy, 2000] Wei, L.-Y. and Levoy, M. (2000). Fast texture synthesis using tree-structured vector quantization. *International Conference on Computer Vision*, page 479 – 488.
- [Wei and Levoy, 2002] Wei, L.-Y. and Levoy, M. (2002). Order-independent texture synthesis. *Tech. Rep. TR-2002-01, Stanford University CS Department*.
- [Williams, 1978] Williams, L. (1978). Casting curved shadows on curved surfaces. In *SIGGRAPH '78: Proceedings of the 5th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 270–274, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Wong et al., 1997] Wong, T.-T., Ng, W.-Y., and Heng, P.-A. (1997). A geometry dependent texture generation framework for simulating surface imperfections. *Euro. Workshop Rendering*, pages 139–150.
- [Wood et al., 2000] Wood, D., Azuma, D., Aldinger, W., Curless, B., Duchamp, T., Salesin, D., and Stuetzle, W. (2000). Surface light fields for 3D photography. *Proc. SIGGRAPH 2000*, pages 287–296.
- [Wu and Yu, 2004] Wu, Q. and Yu, Y. (2004). Feature matching and deformation for texture synthesis. In *SIGGRAPH '04: ACM SIGGRAPH 2004 Papers*, pages 364–367, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Yamauchi et al., 2003] Yamauchi, Y., Sekine, M., and Yanagawa, S. (2003). Bidirectional texture mapping for realistic cloth rendering. *SIGGRAPH 2003 Sketches and Applications*.
- [Zhang, 2000] Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. In *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, volume 22, pages 1330–1334.

- [Zhou et al., 2005a] Zhou, K., Du, P., Wang, L., Matsushita, Y., Shi, J., Guo, B., and Shum, H.-Y. (2005a). Decorating surfaces with bidirectional texture functions. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 11(5):519–528.
- [Zhou et al., 2004] Zhou, K., Snyder, J., Guo, B., and Shum, H.-Y. (2004). Iso-charts: stretch-driven mesh parameterization using spectral analysis. In *SGP '04: Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing*, pages 45–54, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Zhou et al., 2005b] Zhou, K., Wang, X., Tong, Y., Desbrun, M., Guo, B., and Shum, H.-Y. (2005b). Texturemontage. In *SIGGRAPH '05: ACM SIGGRAPH 2005 Papers*, pages 1148–1155, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Zongker et al., 1999] Zongker, D. E., Werner, D. M., Curless, B., and Salesin, D. H. (1999). Environment matting and compositing. In *Proc. SIGGRAPH 1999*, pages 205–214.

# 致 谢

在我攻读博士学位期间，得到了导师沈向洋博士的悉心指导，他渊博的学识、严谨的治学态度、忘我的工作精神、非凡的人格魅力深深地影响了我，使我终生受益。在此致以深深的谢意。

感谢郭百宁研究员和童欣研究员对我的各项研究工作的建议和帮助。

感谢同我一起开展研究工作的Stephen Lin研究员, 周昆研究员, John Snyder研究员, 陈彦云研究员, 鲍虎军教授, 胡事民教授等感谢他们对我的帮助和支持。

感谢微软亚洲研究院网络图形组(IG)和视觉计算组(VC)的各位同事和朋友对我的帮助和支持，我的研究工作离不开这个高效的团队，离不开他们的支持和帮助。尤其感谢一起合作项目的徐昆，潘明皓，王超等同学。

感谢百忙之中抽出时间评审学位论文的各位老师，同时感谢本文引用文献的各位作者。

感谢中国科学院计算技术研究所研究生部的各位老师长期以来对我学习和生活上的关心。

感谢我的家人，是他们的无私的爱和无尽的支持激励着我不断前进。

最后，感谢其他所有曾经给予我帮助的师长和朋友们。

# 作者简介

姓名：王嘉平                      性别：男                      出生年月：1980.3                      籍贯：浙江宁波

2002年9月– 2007年9月 中国科学院计算技术研究所 计算机应用技术 硕博连读生

1998年9月– 2002年7月 宁波大学计算机科学与工程学院 计算机应用 本科生

## 攻读博士学位期间发表的论文

1. Appearance Manifolds for Modeling Time-Variant Appearance of Materials  
**Jiaping Wang**, Xin Tong, Stephen Lin, Minghao Pan, Chao Wang, Hujun Bao, Baining Guo  
Heung-Yeung Shum Proceedings of ACM SIGGRAPH, Aug 2006. ACM Transactions on Graphics, Volume25, Issue 3, p754-761, July 2006.
2. Spherical Harmonics Scaling  
**Jiaping Wang**, Kun Xu, Kun Zhou, Stephen Lin, Shimin Hu, Baining Guo Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, Oct 2006. The Visual Computer, Volume 22, p713-720, Sept 2006.
3. Modeling and Rendering of Quasi-homogeneous Materials  
Xin Tong, **Jiaping Wang**, Stephen Lin, Baining Guo, Heung-Yeung Shum Proceedings of ACM SIGGRAPH, Aug 2005. ACM Transactions on Graphics, Volume24, Issue 3, p1054-1061, July 2005.
4. Capturing and Rendering Geometry Details for BTF-Mapped Surfaces  
**Jiaping Wang**, Xin Tong, John Snyder, Yanyun Chen, Baining Guo, Heung-Yeung Shum Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, Oct 2005. The Visual Computer, Volume 21, p559-568, Sept 2005.
5. Shell Texture Functions  
Yanyun Chen, Tong Xin, **Jiaping Wang**, Stephen Lin, Baining Guo, Heung-Yeung Shum Proceedings of ACM SIGGRAPH, Aug 2004. ACM Transactions on Graphics Volume23, Issue 3, p343-353, Aug 2004.

## 攻读博士学位期间的获奖情况

2007年05月: 刘永龄特等奖学金, 中国科学院

2006年03月: 三好学生, 中国科学院研究生院

2005年12月: 所长优秀奖学金, 中国科学院计算技术研究所

2005年12月: 被评为微软亚洲研究院2005年度十佳访问学生, 获邀访问微软总部并参加比尔.盖茨的湖边别墅烧烤晚宴

2004年11月: 微软学者奖学金 ‘2004