

基于数据相关性的高维纹理建模

(申请清华大学工学博士学位论文)

培养单位：高等研究院
学 科：计算机科学与技术
研 究 生：董 悅
指 导 教 师：沈 向 洋 教 授

二〇一一年四月

Modeling High Dimensional Textures with Data Coherency

Dissertation Submitted to
Tsinghua University
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Engineering

by
Yue Dong
(Computer Science and Technology)

Dissertation Supervisor : Professor Heung-Yeung Shum

April, 2011

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：

清华大学拥有在著作权法规定范围内学位论文的使用权，其中包括：（1）已获学位的研究生必须按学校规定提交学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文；（2）为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所供校内师生阅读，或在校园网上供校内师生浏览部分内容；（3）根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》，向国家图书馆报送可以公开的学位论文。

本人保证遵守上述规定。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

作者签名：_____

导师签名：_____

日 期：_____

日 期：_____

摘要

在计算机图形学中，纹理用来描述物体表面的材质变化并为几何模型添加大量的真实细节。虽然传统二维纹理可以很好地表达物体漫反射颜色，却无法反映真实世界中光线与材质的复杂交互。因此，人们提出了高维纹理函数以完整地刻画自然界中材质的空间变化和光学特性，以达到更高的真实感。然而高维纹理数据量大，造成其采集时间长，难以直观交互等一系列问题，限制了其广泛应用。有效地高维纹理的建模与采集也因而成为图形学研究中的一个热点和难点问题。

针对这一问题，本论文通过分析利用高维纹理数据相关性这一共有特点，研究并提出了一系列基于稀疏材质采样数据的高维纹理建模算法。论文重点对常用的三维实体纹理数据和表面反射纹理数据建模进行研究，提出并实现了一系列合成、采集与交互建模算法和系统。论文的主要研究工作和创新点如下：

提出基于相关性的快速实体纹理合成算法。根据二维纹理样本，算法利用实体纹理的相关性有效减少了纹理合成所需候选三元组数目，从而减少了计算量，提高了纹理合成速度。论文同时提出了这一算法的GPU实现。与传统算法相比，算法的存储与计算复杂度仅与空间表面的体素数目有关，从而极大地减少了实体纹理的数据量。利用这一算法，论文首次实现实体纹理实时切割和交互合成。

首次提出了基于流形的空间双向反射分布函数(SVBRDF)快速建模算法。实现了从低维稀疏数据重构出高分辨率的SVBRDF数据。论文进一步提出了有效采集稀疏数据的实用方案及相应的数据分析与处理算法。与传统方法相比，该方法以更少的数据量重构出更高分辨率结果；并且采集设备更简单、采集过程更加便捷，极大地提高了表面反射纹理采集效率与实用性。

提出了基于单一图像输入的交互式纹理材质建模系统。设计了基于交互的反射光影分离算法和多尺度法向重建算法，通过少量用户交互，实现快速地从单一图像生成高质量的漫反射、高光和法向纹理。系统适用于各类材质，用户交互简单直观，具有广泛的通用性和很高的易用性，极大地降低了纹理建模的难度。

基于数据相关性这一重要性质，论文实现了从稀疏低维数据重构高质量高维纹理，极大地提高了高维纹理建模效率。利用论文所提出的算法，用户可以快速高效地构建真实的高维纹理数据。

关键词：高维纹理函数；纹理合成；表观数据采集；交互式建模

Abstract

Textures can greatly improve the visual appearance of object surfaces. However traditional color textures lack the ability to reproduce the complex lighting effects in the real world. To achieve realistic rendering results, high dimensional textures are introduced to represent the complex appearance of real world materials. The high dimensional structure of these textures results in large data storage and complex computation. Hence, efficient modeling high dimensional textures became a challenging and trending topic in computer graphics research.

Based on data coherency, this dissertation efficiently models high dimensional textures from sparse data, and greatly improves the performance of texture synthesis, data capturing and interactive modeling algorithms. The major contributions are:

A coherency based solid texture synthesis algorithm is proposed. By enforcing coherency, our pre-computed 3D candidates greatly improve synthesis efficiency. The computation and memory complexity of our algorithm only dependents on the number of voxels required. Our GPU implementation is fast enough to enable interactive texture design and real-time synthesis when cutting or breaking objects.

SVBRDF manifold for high quality reflectance capture is presented to reconstruct high resolution SVBRDF from two lower-dimensional measurement phases. With the novel practical capturing scheme, and data processing algorithms, our methods can generate higher resolution results from much fewer measurements, and significantly improve the SVBRDF capturing efficiency.

An interactive method is proposed for modeling spatially variant reflectance from a single image. With specially designed interactive shading separation and multi-scale normal reconstruction algorithm, our method can model the spatially-varying reflectance properties and normal variations from the single image input, and greatly accelerate the manual reflectance modeling pipeline.

Based on data coherency, our methods model high dimensional textures from sparse data, and significantly improve the modeling performance.

Key words: High dimensional texture ; Texture synthesis; Appearance capturing; Interactive modeling

目 录

第1章 引言	1
1.1 高维纹理材质	1
1.1.1 实体纹理 (Solid Texture)	3
1.1.2 空间双向反射分布函数 (Spatially Variant Bidirectional Reflectance Distribution Functions)	5
1.2 高维纹理建模的主要难点与挑战	5
1.3 本文主要研究内容	7
1.3.1 高维纹理中的相关性	7
1.3.2 本文概览	8
第2章 相关工作	10
2.1 空间分布纹理建模	10
2.1.1 过程纹理 (Procedural Texture)	11
2.1.2 MRF (Markov Random Field)纹理模型与纹理合成	11
2.2 反射纹理建模	14
2.2.1 BRDF模型	14
2.2.2 完整采集的反射纹理	16
2.2.3 基于数据相关性的反射纹理采集	16
2.2.4 基于用户交互的建模	18
第3章 基于相关性的快速实体纹理合成	20
3.1 系统概述	21
3.1.1 纹理合成中常用的名词与符号	22
3.2 候选三元组	23
3.2.1 颜色一致性原则	24
3.2.2 三维空间的相关性原则	25
3.2.3 由候选三元组生成初始化纹理板	26
3.3 实体纹理合成算法	27
3.3.1 并行化实体纹理合成算法	27
3.3.2 任意表面上的纹理合成	31
3.4 实现细节与结果	32
3.4.1 候选三元组的预算算	33
3.4.2 GPU实现及数据结构设计	33
3.4.3 完整体数据纹理合成	35

3.4.4 复杂表面的快速实体纹理合成	35
3.4.5 实时纹理合成	36
3.5 小结与讨论	39
第 4 章 基于流形的表面反射纹理材质快速建模	40
4.1 SVBRDF流形模型及其重建方法	41
4.1.1 具有代表性的BRDF及角度域Key采样	41
4.1.2 局部线性空间BRDF重建	44
4.1.3 估测BRDF邻域的空间维度	45
4.1.4 正文化采样缩放	46
4.1.5 局部邻域选择	47
4.1.6 局部邻域上的线性重建	47
4.1.7 代表性BRDF的人工合成与扩展	47
4.1.8 Key采样的完备性验证	48
4.2 数据采集	49
4.2.1 采集代表性BRDF	50
4.2.2 Key采样	53
4.3 实验结果	55
4.3.1 重构方法的实验验证	56
4.3.2 实际采集SVBRDF	58
4.4 小结与讨论	62
第 5 章 基于用户交互的表面反射纹理材质建模	63
5.1 系统概述	65
5.2 交互式分离漫反射纹理与光影	66
5.2.1 初始化分离	67
5.2.2 交互式修正	68
5.3 交互式高光反射建模	70
5.3.1 材质类型分类	71
5.4 多尺度法向重建	72
5.4.1 高度场作为软约束的法向重建	73
5.4.2 多分辨率重建	74
5.5 实验结果	75
5.6 小结与讨论	79
第 6 章 总结与展望	80
参考文献	83
致 谢	87

目 录

声 明	88
个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果	89

主要符号对照表

η	相对折射率
E_x, E_y, E_z	三维方向上的纹理样本
\mathbf{i}	入射光方向
\mathbf{o}	出射光方向
\mathbf{n}	法向方向
\mathbf{h}	半角向量(half-vector)
ρ_d	漫反射系数 (Diffuse coefficient)
ρ_s	高光反射系数 (Specular coefficient)
F_r	菲涅尔反射项(Fresnel Reflection Factor)
F_t	菲涅尔传输项(Fresnel Transmission Factor)
NDF	微面元法向分布函数(Normal Distribution Function)
BRDF	双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Functions)
SVBRDF	空间双向反射分布函数 (Spatially Varying Bidirectional Reflectance Distribution) Function
BTF	双向纹理函数(Bidirectional Texture Function)
MRF	马尔可夫随机场(Markov Random Field)

第1章 引言

真实感图形学在电子娱乐、电影特效以及计算机辅助设计等领域都有广泛的应用。其主要研究目标在于，利用计算机算法模拟真实世界的光影效果，并产生具有照片级真实感的图像序列。

纹理相关的研究始终是计算机图形学中一个重要的研究方向。计算机图形学利用几何来描述物体在大尺度上的形状与结构，而物体本身在空间分布上的细节变化则需要用纹理材质来描述；由此可见，纹理材质是计算机图形学中用于描述真实世界中空间分布细节的一个重要工具。图1.2给出纹理建模在计算机图形学中的位置。在计算机图形学中，材质纹理是定义在空间上的形如 $f(x)$ 的函数。对于空间中的一个位置 x ，纹理材质 $f(x)$ 表达了对应于这个空间位置，物体的纹理细节，以及材质与光线的交互方式。最简单的纹理材质就是二维颜色纹理，二维颜色纹理仅仅与物体表面的二维空间分布有关，对应于物体表面的任何一个位置 x ，颜色纹理 $f_{color}(x)$ 表达了材质在该位置的颜色信息。从图1.2我们可以看出，颜色纹理为几何模型增添了大量的细节，增强了渲染结果的真实感。

1.1 高维纹理材质

虽然简单的颜色纹理能够为几何模型增添大量细节，但是仍有很多真实世界中的材质属性并没有很好的为颜色纹理所描述。例如，对于不同的光照环境，物体表面所体现出的颜色会随之产生变化，而这种变化不仅仅与物体表面空间位置有关，同时还与光照和视线的角度有关；甚至对于一些纹理细节，其本身的空间分布就是与三维空间分布有关，而非与二维表面有关。对于这类真实世界中的材

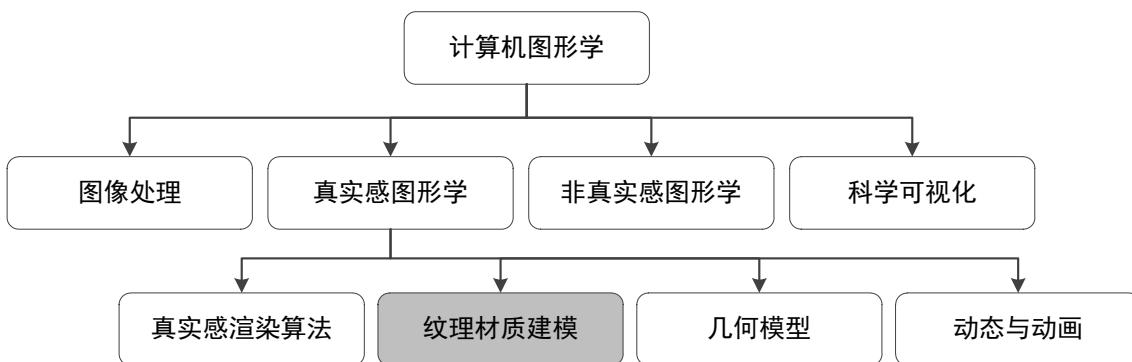


图 1.1 纹理建模研究在计算机图形学中的位置



图 1.2 纹理在真实感渲染中的作用。

质属性，其最终渲染结果往往取决于多个维度而非二维表面的维度，因此，计算机图形学提出了高维纹理材质来表达物体的这些属性，如图1.2(c)所示，与颜色纹理相比(b)，应用了高维纹理（这里以反射纹理材质为例）的渲染结果具有的更加真实的丝绸刺绣质感。

计算机图形学中的主要高维纹理

为了完整的表达自然界中任意的光线传递，图形学中采用八维的双向表面扩散反射分布函数(Bidirectional Surface Scattering Reflectance Distribution Function, BSSRDF)^[1]来描述从空间中特定位置 x_i 沿特定方向 \mathbf{i} 入射的光线在特定位置 x_o 沿着特定方向 \mathbf{o} 的出射比例。BSSRDF从理论上完整地涵盖了静态材质与光线交互的属性，然而由于其维度过高，带来了极大的数据量，使得直接利用BSSRDF来描述物体的材质属性变得效率低下且不切实际。因此，人们提出了对BSSRDF的合理简化模型，来实现有效的纹理建模。

对于不透明材质，只有当入射位置 x_i 与出射位置 x_o 相同时，从入射方向的光线才能传递到出射方向。因此，对于光线与不透明材质表面的反射过程，可以通过空间双向反射分布函数（Spatially Varying Bidirectional Reflectance Distribution Function）^[1]来完整的描述。

$$f_{SVBRDF}(\mathbf{i}, \mathbf{o}, x) = f_{BSSRDF}(\mathbf{i}, \mathbf{o}, x_i, x_o)|_{x=x_i=x_o} \quad (1-1)$$

如果忽略SVBRDF的纹理空间分布，我们就获得了双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Functions)^[1]。BRDF是一个四维函数，描述了空间中特定点上不同入射出射方向的光线反射率。

$$f_{BRDF}(\mathbf{i}, \mathbf{o}) = f_{SVBRDF}(\mathbf{i}, \mathbf{o}, x)|_{x=x_c} \quad (1-2)$$

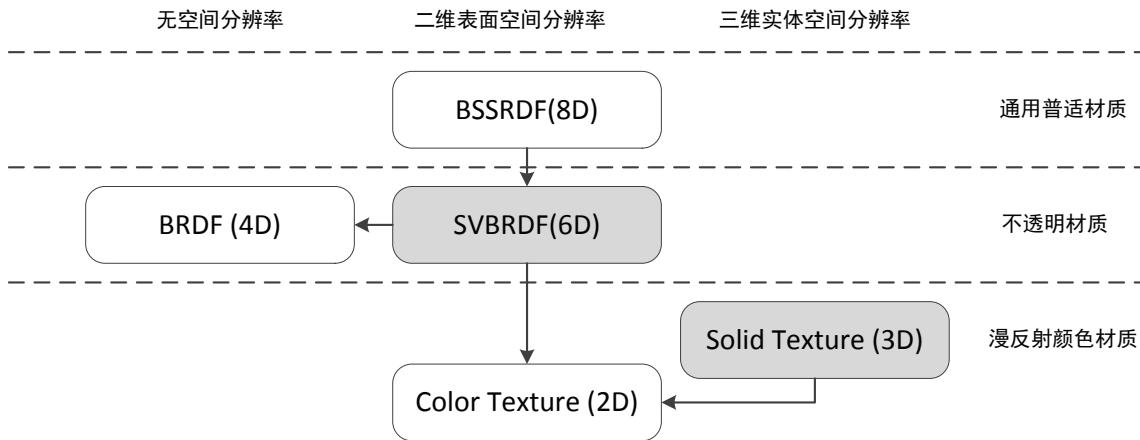


图 1.3 计算机图形学中的主要高维纹理材质。

另一方面，纹理的空间分布可以进一步从二维表面空间扩展到三维实体空间，定义实体纹理(Solid Texture)^[2,3]。

$$f_{solid}(x) \quad x \in \mathbb{R}^3 \quad (1-3)$$

在三维空间分布的实体纹理能够更好地描述真实世界中，不同材料在物体内部的复杂空间分布。并给以物体一种从完整的实体材料中切割出来的感觉。

最后，从空间分布的角度考虑，最传统的二维颜色纹理可以认为是实体纹理在物体表面的一个二维切面。同时，从材质属性的角度也可以将其理解为，在假定物体表面为完全漫反射的条件下SVBRDF的进一步简化。

图1.2中给出了图形学中常用的主要高维纹理函数及其相互关系。图中，从上至下纹理表达的材质属性逐步简化，而从右向左纹理的空间分布逐步简化。针对图形学中主要的高维纹理，本文选择具有最高空间分布维度的实体纹理和完整表达不透明材质表面反射属性的SVBRDF作为主要研究对象，并具体对其进行性质进行详细分析。

1.1.1 实体纹理 (Solid Texture)

在计算机图形学领域中，经典的纹理映射技术是将纹理从二维的平面纹理空间映射到三维物体表面的一个过程。由于三维物体表面往往是一个空间曲面，其拓扑结构与纹理平面并不相同。因此，这种直接的纹理映射会产生诸如空间变形，纹理不连续等问题。从另一个角度来看，（如图1.4所示）真实世界中的一些纹理的空间分布并不是一个简单的二维平面结构：天然的石材上的花纹是由于石材上不同的颜色的成分在石材的整个内部空间分布所产生，当我们将其切割成所需要的外形时，这些在三维空间上分布的石材花纹始终保持着在三维空间上的

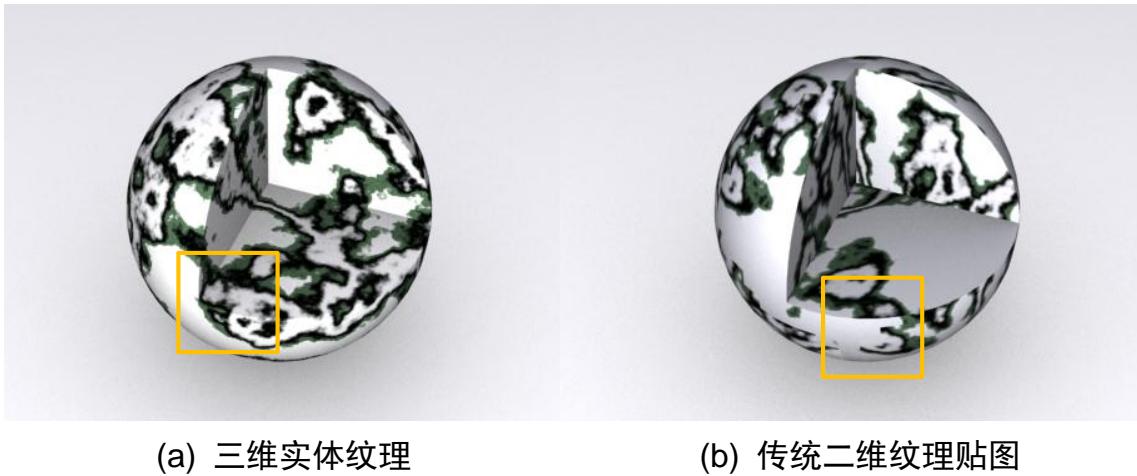


图 1.4 实体纹理与传统二维纹理的比较。

连续性；木纹也是一种经典的具有三维空间分布的纹理，不同的木质纤维具有不同的颜色，这些纤维在木材的内部独特的空间分布构成了木材上特殊的纹理，这些纹理的分布也是定义在三维空间上，而不是木材的二维表面。由于这些特殊纹理具有在三维体空间上的分布，而不是传统意义上的二维平面空间分布，计算机图形学中将这样的纹理定义为实体纹理。

具体而言，实体纹理是定义在三维体空间上的纹理。用函数形式表示，实体纹理形如 $f(x), x \in \mathbb{R}^3$ 。当我们把实体纹理应用到三维物体表面时，由于其定义域与物体表面完全一致，这个映射变得非常简单。实体纹理的三维空间可以和物体几何的三维空间位置构成一一映射，对应于物体几何表面的任何一点，仅需要根据其三维空间的位置 x ，就可以直接地确定该位置的纹理 $f(x)$ 。实体纹理在三维空间上具有连续性，这种连续性使得它能够更好地体现材质独特的三维空间分布特性，进而实现高度的真实感。例如，一个利用体材质渲染出的三维模型，可以被任意地切割或雕刻，在每一次切割或雕刻的过程中，物体表面的纹理都能保持一致的连续性。从图1.4中，我们可以清晰的看到，利用体纹理材质的模型，被切割后，其表面纹理依然保持了良好的连续性，而没有出现在切面处纹理不连续的错误现象，保证了渲染结果的真实感。由此可见，实体纹理的研究在计算机图形学领域有着重要的实用价值。

虽然实体纹理的三维空间定义域具有独特的真实感，其定义域的维度与实际应用到物体二维表面的维度不统一却会导致三维纹理本身的数据量与应用到表面的纹理数据量不一致。因而，如何在保持有二维表面规模的数据量的条件下，保持实体纹理数据在三维空间连续定义的特性，就成为实体纹理研究的一个重要方向。

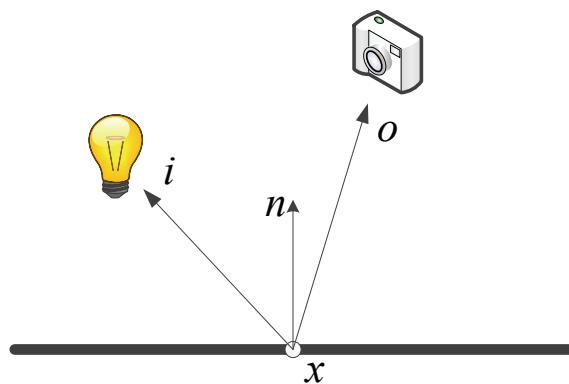


图 1.5 空间双向反射分布函数具有6个维度，其中 x 具有两个空间维度， i 和 o 各自有两个角度维度。

1.1.2 空间双向反射分布函数 (Spatially Variant Bidirectional Reflectance Distribution Functions)

除颜色外，物体表面还有很多其他材质属性，反映为物体材质对光照的独特响应特性。例如，光亮的镜面能够反射出清晰的倒影；抛光的金属展现出闪亮的高光反射；绸缎织锦会产生带状的连续高光。这些反射的特性是我们判断物质材料性质的重要依据，也是真实地描述材料，并进行真实感渲染所不可缺少的重要信息。

由于传统的颜色纹理并不能描述这些信息，因此，计算机图形学中引入了具有空间变化的双向反射分布函数(Spatially Variant Bidirectional Reflectance Distribution Functions: SVBRDF) 来描述物体的反射特征。SVBRDF，是一个六维的函数 $f(i, o, x)$ ，它描述了对于空间上的位置 x ，在光线从 i 方向入射时，沿 o 方向的反射光与入射光的比例。如图1.5所示，其中， i ， o 代表入射光和出射光方向，每个方向由两个维度构成，而 x 代表空间位置，往往定义在二维纹理平面上上。

从图1.2中的渲染结果的比较可以看出，比起简单颜色纹理，反射纹理材质能够更好地表现物体表面的材质属性。同时，空间双向反射分布函数的6个维度缺一不可，简化掉其中的任何一个维度，都会降低最终渲染图像的真实感。如此高的维度对获得和编辑反射纹理材质都造成很多困难，如何减少高维空间所带来的巨大数据量、简化产生高质量反射纹理的过程成为反射纹理研究的一个重要课题。

1.2 高维纹理建模的主要难点与挑战

定义在高维空间的纹理函数虽然能够实现高度真实感，然而其高维空间的定

义域所带来的巨大数据量也为高维纹理建模带来的许多难点与挑战。

纹理完整高维空间数据量与实际所需数据量不一致 虽然高维纹理的定义域是一个完整的高维空间，每个维度相互独立且不可忽略，但在实际应用高维纹理时，也会出现仅需要高维纹理中一个低维切片的情况。例如，实体纹理虽然定义于完整的三维体空间，但当将其实际应用到二维物体表面时，所真正需要的数据却仅仅是二维物体表面所在的部分位置。传统实体纹理合成的方法，由于其本身算法原因，不得不计算产生完整的实体纹理数据，这也就导致其计算和存储代价远远高于实际所需用于表面纹理渲染的规模。

高维纹理中的非线性属性难以直接获取 虽然高维纹理在全局上体现为一个高维度的线性空间，然而由于真实世界中种种非线性的现象，这种全局高维空间的往往是由于低维非线性结构所造成。因此，高维纹理往往体现出局部具有低维度而全局具有高维度的空间结构。例如，由于法向和各向异性主方向等引起的BRDF变化就体现为非线性变化，因而SVBRDF在局部具有低维线性的性质而在全局尺度上则体现为复杂的高维结构。传统的基于线性结构假设的数据采集方法效率低下，而现有采集手段又无法直接获取和采集这种非线性的数据，因此如何有效地利用纹理空间的非线性性质也成为高维纹理采集的一大难点。

纹理复杂的空间分布难以实现直观的交互 传统交互式算法通常依赖于图像中连续平缓变化的区域或少量明显的边界，这些普通图像的特性在纹理图像中并不成立。纹理复杂的空间分布含有大量细节，这些零散分布的细节，难以通过简单直观的用户交互来处理。在传统图形学工业界，为了从一张输入纹理图像建模产生高维纹理材质，往往需要艺术家大量的手工工作和长时间的细节调整。如何设计合理直观的用户交互手段就成为提高交互式纹理建模的关键。

针对高维纹理建模的主要问题与挑战，本文提出了三种建模方法，实现了空间与时间复杂度仅仅和所需体素规模相关的快速实体纹理合成算法；充分利用纹理的非线性性质，提出了基于流形的SVBRDF快速建模算法；设计了直观简单的交互式的反射纹理快速建模系统。而支持这三项研究的统一思想即通过建模充分利用高维纹理的相关性（Coherency）特性。

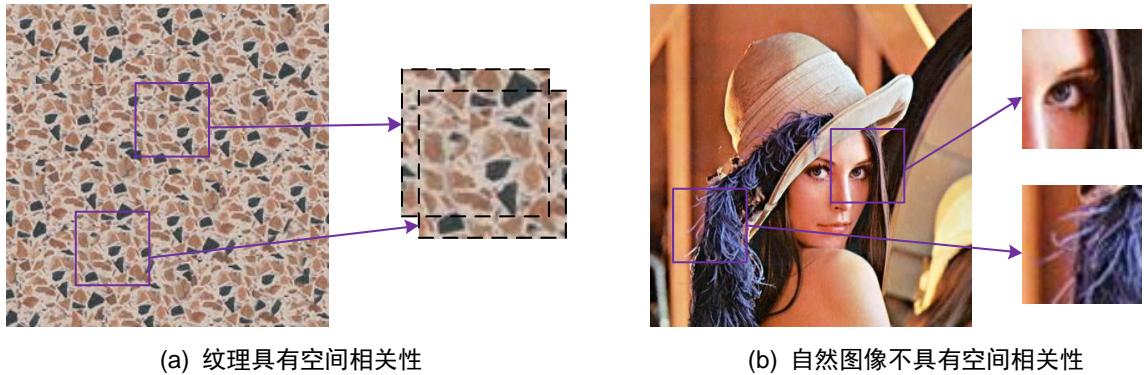


图 1.6 纹理的空间相关性:

1.3 本文主要研究内容

1.3.1 高维纹理中的相关性

高维纹理是一个定义在高维空间的函数，然而，高维纹理与一般的高维函数又有着很大的区别，真实世界的高维纹理往往具有一些特有的性质，是一般高维纹理函数的一个特殊子集。因此高维纹理进行建模的一个重要思路就在于，根据高维纹理数据本身的特性，通过数学模型来描述和利用这些特性，进而提高算法的效率并提高结果的质量。本文集中于研究高维纹理的相关性这一重要性质，通过分析和利用高维纹理所特有的相关性特性，建立对应的数学模型和算法，实现实体纹理的实时合成，反射材质的简便快速采集以及交互式建模。

相关性是高维纹理的重要性质，而一般函数并不具有这样的性质。为了能够更加具体地理解纹理的相关性，这里用几个实际的例子来说明纹理的相关性。图1.6直观地显示出纹理具有一般图像所不具有的相关性。对于纹理的空间分布，在空间上并不连续的两个位置取到的纹理区域，仍然可以构成连续的纹理图像（如图1.6（a）所示）。而对于自然图像图1.6（b），在空间上一般找不到符合这样性质的区域。

因此，保证纹理的相关性就成为产生合理纹理的一个重要条件。那些不能保证纹理相关性的数据对于实际的纹理合成并不具有任何帮助。通过强化纹理相关性可以有效地提高纹理合成的效率，在第3章中，将具体分析如何在实体纹理合成的过程中有效地利用纹理的相关性，并实现复杂度仅与二维表面相关的三维实体纹理的高效合成算法。

对于具有空间分布的反射分布函数（SVBRDF）而言，在空间中不同位置的反射分布函数（BRDF）同样会体现出一定程度的相关性。如图1.7所示，虽然在空间位置上不相邻，但标识出的两个像素上，其BRDF在角度域上的函数却体现



图 1.7 纹理的空间相关性:

出非常相似的特征。这种性质，是一般高维函数所不具有的。从直观上也可以很容易理解，对于真实世界的材料，其BRDF受到材料本身材质属性所决定，而一般常见的真实世界材料，总是由非常有限的几种材料所构成，因此也就造成了这种相关性，然而BRDF与材质属性的相关性并不是简单的对应或线性关系。因此如何有效地利用这种相关性，将成为有效地减少采集数据过程中的冗余采样，提高采样效率的关键。在第4章中，将具体分析SVBRDF相关性的特性，利用这一特性实现快速采集高质量的SVBRDF。

将SVBRDF的相关性用于数据采集，可以有效地提高采集效率。另一方面，由于SVBRDF的相关性是由构成材料本身的材料类型所决定，因此通过人机交互来快速地建立起这种材料类型与SVBRDF之间的相关性，实现交互式建模就成为一个获得高维纹理的有效途径。在第5章中，将讨论如何有效地利用交互式的方法，建立起SVBRDF与材料类型的相关性，并由此实现对纹理材质的交互式建模。

1.3.2 本文概览

围绕高维纹理的相关性这一特殊性质，本文针对纹理建模中纹理合成、纹理数据采集以及交互式建模这三个主流研究方向分别进行研究。具体的研究成果按照如下方式进行组织：第二章介绍高维纹理建模的相关工作与研究现状，包括纹理合成、纹理数据采集以及交互式算法等方面，通过分析研究现状找出当前纹理建模研究中存在的主要问题。第三章提出了候选三元组模型，用于在实体纹理合成过程中强化纹理的相关性。根据这一模型设计了对应的实体纹理合成算法，实现了基于相关性的快速实体纹理合成。第四章分析了SVBRDF所构成高维空间相关性性质，提出SVBRDF流形模型来充分利用SVBRDF所具有的非线性相关性，实现了高质量SVBRDF的简便快速采集。第五章论述了构成SVBRDF的不同成分（漫反射、高光反射与法向纹理等）之间的相关性，根据对应的相关性设计交

互式算法，实现了在用户的简单交互协助下，从单张照片重构具有高度真实感的SVBRDF。第六章总结全文工作，并对本方向的未来工作进行展望。

第2章 相关工作

由于高维纹理材质本身是一个高维函数，对于这样的高维函数直接进行离散化表达存在数据存储量大、处理复杂、数据表达不直观等缺陷。同时，真实世界中的纹理材质又具有很多独特的性质，这些性质使得大量的来自真实世界的高维纹理材质构成了所有高维函数中一个非常局限的子集。因此，计算机图形学所关心的并不是任意的高维函数，而是这些真实世界中存在的高维纹理材质所构成的子集。为了能将这个子集与一般高维函数区分开，有效地研究并利用真实世界中高维纹理材质所特有的性质，学界提出了大量的纹理材质模型。

建立纹理材质模型主要有以下几个目的。第一，是通过建立模型，探索真实世界中纹理材质所满足的一些特殊性质，据此来指导合成具有相似性质的纹理材质。第二，是通过建立模型，研究高维纹理材质中存在的数据冗余性，据此来减少纹理材质的存储消耗及采集代价。第三，是通过建立模型，提炼出具有直观意义的参数属性，根据这些参数对真实世界中的纹理材质进行分析及编辑等。

本节将具体介绍在计算机图形学领域中常用的一些纹理模型，并分析这些模型的特点、优势及局限性。由于本文集中研究纹理的空间分布以及表面反射纹理材质相关的课题，因此，这里将集中阐述这两类纹理材质模型。

2.1 空间分布纹理建模

与一般的自然图像(Nature Images)不同，纹理图像具有特殊的空间分布特性。从图1.6的比较中，我们可以明显地看出纹理图像具有大量的随机分布或周期性分布的重复模式。因而，根据纹理分布的这种特性，学界提出了大量的纹理空间分布模型，以及基于这些模型的纹理分析、识别与合成算法。

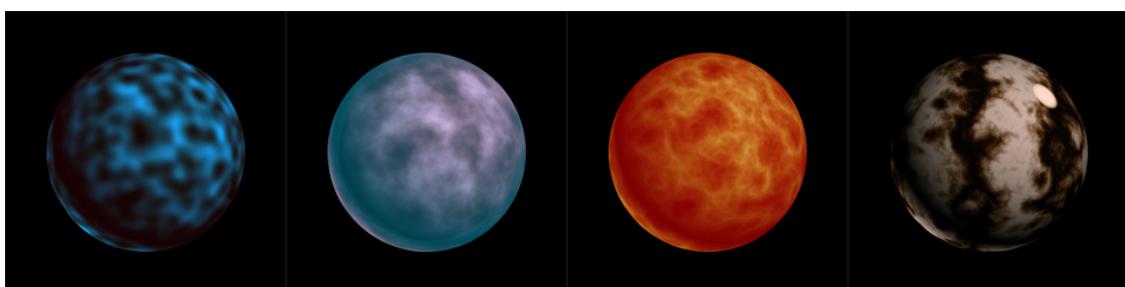


图 2.1 普林噪声纹理。图片来自<http://www.noisemachine.com>

2.1.1 过程纹理 (Procedural Texture)

过程纹理 (Procedural Texture) 是一种直接利用简单计算机函数计算产生的，用来模拟真实世界中自然纹理的一种方法。通常，这类方法利用随机噪声和分形函数进行组合，来模拟真实世界中常见的随机现象。在过程纹理中，具有代表性的就是普林噪声 (Perlin Noise)^[4]。普林噪声基于已存在的空间随机噪声 $noise(x)$ （其中 x 代表一个空间位置），计算其加权和 $sum(noise(x))$ ，最终利用分形函数 $f(x)$ 表达式来获得最终的纹理。例如，常见的一些普林噪声使用的分形函数

$$f(x) = noise1/f(|noise(x)|)$$

$$f(x) = \sin(x + noise(x))$$

$$f(x) = sum(1/f(noise(x)))$$

$$f(x) = sum1/f(|noise(x)|)$$

这里所列举的普林噪声函数所产生的纹理参见图2.1。普林噪声可以有效地产生如岩石、大理石、木纹等纹理以及烟云、火焰等自然现象。同时，对于空间中的某一位置 x ，计算普林纹理仅仅需要分形函数 f ，以及空间位置所对应的随机噪声 $noise(x)$ 即可。因此，普林噪声是一种可以进行局部计算的纹理——即计算位置 x 处的纹理，仅仅需要 x 本身或 x 局部邻域的信息即可。由于普林纹理具有这样的局部计算特性，因此，它具有存储量及计算量小的优势。然而，我们从图2.1 中也可以看出，普林纹理所产生的纹理分布具有一定的局限性，仅能产生有限类型的自然纹理。更重要的是，由于普林纹理依靠晦涩的分形数学函数，这些函数本身，以及函数的系数并不具有实际的物理意义，对于用户而言也不够直观。因此，普林噪声缺乏一个简单直观的控制方法。通常，用户只能盲目地去调整分形函数及其系数，并选择尽量符合需要的随机纹理。

虽然这里仅以普林噪声作为一个代表性的例子，但是，分形数学函数或函数算法是所有过程纹理的基础。因此，所有过程纹理都具有局部计算所带来的存储量计算量小的优势，同时存在样式局限、无法进行有效控制的缺点。

2.1.2 MRF (Markov Random Field) 纹理模型与纹理合成

在参数化表达的过程纹理中，对于位置 x ，其纹理的随机性完全来自于随机噪声，由并且仅由位置 x 及其一阶邻域的随机噪声所决定。因此，其纹理的主要视觉特性完全取决于其分形函数的性质。这也是过程纹理难以控制的核心原因。

针对这一问题，马尔可夫随机场(Markov Random Field)模型与基于样本的纹理合成方法因此被提出。

马尔可夫随机场将纹理描述成一个同时具有局部性(local)及静态性(stationary)的随机过程^[5]。这样，在每一个空间位置 x 上的纹理像素，都可以被 x 空间上临近的一部分局部像素的特性所表达，即局部性。而同时，这些局部像素特性表达关系对于不同空间位置的像素又完全一致，也就是所谓的静态性。为了能够更直观的理解这样两个特性，在图1.6中，我们将不具有马尔可夫随机场特性的自然图像与马尔可夫随机场模型描述的纹理来进行比较。当我们从图像中取出一个局部窗口时，无论局部窗口取自空间中任何位置，窗口中的图像都看起来很相似，那么我们就说，整个图像具有静态性。从图1.6可以看出，自然图像不具有静态性，而纹理图像具有静态性。同时，为了决定窗口中的一个像素，仅仅取决于窗口范围内的像素信息，而不是整个图像的信息，我们就说这种图像具有局部性。

基于马尔可夫随机场模型，Efros等^[6]以及Wei等^[7]首先提出了基于样本的纹理合成方法。这些方法根据一张作为输入的纹理图像，合成(synthesis)一张输出纹理图像。并且，对于输出图像的每一个像素，其空间局部邻域会至少和输入纹理图像的一个邻域相似。根据马尔可夫随机场的假设，保持了局部邻域的相似性，会保证产生的输出图像从视觉上与输入纹理一致的效果。

基于样本的纹理合成，对于输出纹理的某一个像素，首先取得其周围邻域一个窗口。并在原输入纹理中，寻找对应的窗口邻域，使得原输入纹理中的窗口邻域与当前输出纹理的窗口邻域最相似。而后，将当前像素更新为原输入纹理的对应窗口中对应像素。由此不断迭代，直到最终收敛到输出纹理相对稳定位置。

基于这样的一个思路，人们研究出大量的方法用于加速计算^[7-11]，并将纹理合成从简单的颜色纹理推广到其他纹理材质，如BTF等^[9]。对于基于样本的实体纹理合成，则首次在Wei的博士论文^[12]中提出。

纹理合成中的相关性

Ashikhmin最先通过直接相关性候选(coherent candidate)算法^[8]，在纹理合成中引入相关性的概念。在该论文中，提出了具有相关性的纹理邻域比起其他随机的纹理邻域更易于产生合理的纹理，减少了二维纹理搜索中的盲目搜索，因而提高纹理合成过程的效率。然而，Ashikhmin论文^[8]中的直接相关性候选并没有完整的考虑到全部合理的具有相关性的候选邻域，因此，Tong在其论文^[9]中完善了二维纹理中相关性的概念，提出了k-相关性候选(k-coherent candidate)的概念。

k-coherent更全面地考虑了二维纹理合成中满足纹理相关性的候选，因而有效地提高了二维纹理合成的效率，并在二维纹理合成中得到广泛的应用。对于三维的实体纹理合成，却没有类似的工作来研究对应于三维空间的相关性定义。

全局优化的纹理合成

Kwatra等^[11]将传统的以像素为基础的纹理合成(Pixel based texture synthesis)^[7]与以面片为基础的纹理合成(Patch based texture synthesis)^[13]相结合，提出了纹理优化的纹理合成方法(Texture Optimization)，进一步提高了纹理合成的结果质量。该方法将纹理合成描述成一个优化的过程，并利用一个类似Expectation-maximization的框架去解决这一优化问题。

Kopf等^[14]将纹理优化的方法应用到实体纹理合成上。在引入了k-均值(k-means)约束以及全局的直方图匹配(histogram matching)等技术后，该方法^[14]极大地提高了实体纹理合成的质量。

与传统以像素为基础的纹理合成相比，这种全局优化的纹理合成往往能获得更好的合成质量，然而，由于其全局优化的计算模型，导致这些方法仅能用于计算完整的纹理图像，而不能仅计算纹理图像的一个局部。这一缺陷在实体纹理合成中尤其突出，因为计算和存储完整实体纹理会导致冗长的计算时间和巨大的数据存储量。

并行可控的纹理合成

随着纹理合成算法的不断发展，尤其是结合了像素和面片基础的纹理优化方法的提出，纹理合成的质量不断提高；同时也造成了为了确定于结果纹理中一个像素，所需要的空间邻域逐渐变大的问题。由于确定一个像素所需要的邻域变大，也就意味着，每计算一个像素，参与计算的区域就会变大，由此会造成计算每一个像素所花费的代价变大。这也造成了，算法对纹理的空间控制能力变弱的缺陷。

针对这一问题，Sylvain等^[15]提出了并行化可控纹理合成的概念。该方法基于传统像素为基础的纹理合成方法，与传统方法不同的是，该方法并不存储输出纹理的颜色，相对的，而是存储输出纹理中每一个像素对应于输入纹理的某个像素的坐标。基于这样的一个坐标系统，该算法设计了坐标抖动(Jitter)，坐标向上采样(Upsampling)以及修正(Correction)的算法。有了这些技术，并行化可控纹理合成算法极大地提高了纹理合成计算过程中的收敛速度，因而减少了为了确定输

出纹理中某一个像素所需要计算的邻域大小。由于具有这些优点，该方法极大地提高了纹理合成的效率，并最终实现在GPU上的实时纹理合成。

2.2 反射纹理建模

2.2.1 BRDF模型

在介绍SVBRDF之前，在这里首先介绍用于描述空间中某一点反射属性的BRDF模型作为背景。每一个BRDF表达了对于SVBRDF中某一个像素 x 上，不同入射与出射光角度光线反射的比率。除完整的对入射出射方向进行完整采样存储外，常用于表达BRDF的模型还有参数化BRDF模型，与微面元BRDF模型两种。

参数化BRDF模型

与纹理的空间分布一样，材质的反射属性同样可以利用参数化的函数模型来近似。通常，参数化的反射模型基于对材质反射过程的一些物理过程分析，并进行简化，提出对应的近似模型。

对于反射模型，往往会首先将材质表面的反射分解为漫反射部分 $\rho_d(\mathbf{i}, \mathbf{o})$ 和高光反射 $\rho_s(\mathbf{i}, \mathbf{o})$ 部分：

$$\rho(\mathbf{i}, \mathbf{o}) = \rho_d(\mathbf{i}, \mathbf{o}) + k_s \rho_s(\mathbf{i}, \mathbf{o}) \quad (2-1)$$

其中 k_s 是高光反射系数，控制了高光反射和漫反射强度的比例。而漫反射部分 $\rho_d(\mathbf{i}, \mathbf{o})$ 一般由入射光方向 \mathbf{i} 、法向方向 \mathbf{n} 以及漫反射系数 ρ_d 所决定：

$$\rho_d(\mathbf{i}, \mathbf{o}) = \rho_d \mathbf{i} \cdot \mathbf{n} \quad (2-2)$$

对于材质的高光反射部分 $\rho_s(\mathbf{i}, \mathbf{o})$ ，具有代表性的是Ward模型^[16]。Ward模型利用一个粗糙度的参数 α 来描述材质表面在微观细节的粗糙程度，并由此根据入射方向 \mathbf{i} 出射方向 \mathbf{o} 对应的角度衰减，最终通过以下公式近似材料表面的光线反射：

$$\rho_s(\mathbf{i}, \mathbf{o}) = k_s \frac{1}{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{i})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{o})} \frac{\exp(-\tan^2 \delta / \alpha^2)}{4\pi\alpha^2} \quad (2-3)$$

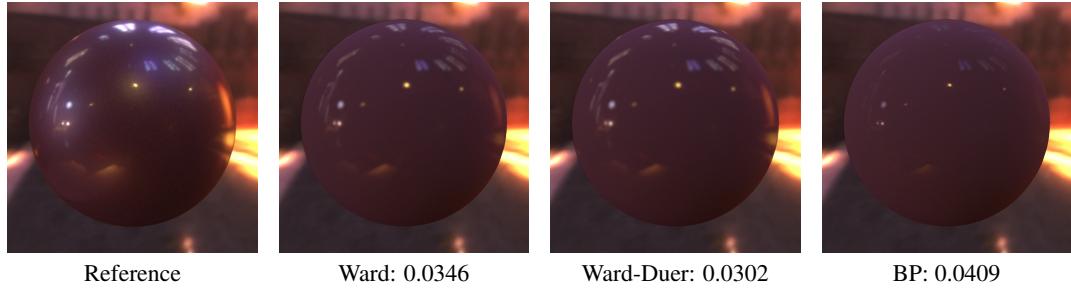


图 2.2 参数化BRDF与完整采样的BRDF比较。

其中 δ 是 \mathbf{n} 与 \mathbf{h} 之间的夹角， k_s 是控制反射强度的高光反射系数。

虽然参数化模型计算简单，不需要复杂的数据即可计算材质的反射属性。然而大部分的研究成果^[17,18]已经表明，仅仅通过参数化的模型无法有效地表达材质反射时在角度域的丰富细节，因而无法达到高质量的真实感。如图2.2中所示的例子可以明显的看出，比起基于完整采样的BRDF，参数化反射模型并不能完整地重现材质的反射细节。

微面元BRDF模型

微面元理论将表面的微观结构描述成大量微小的具有相同折射率完全镜面反射的微面元（facets）^[19]，这些微观微面元的反射在宏观上构成了材质表面的不同类型的反射。根据微面元反射模型，单个像素上的BRDF $\rho(\mathbf{i}, \mathbf{o})$ 可以被分解为漫反射部分 ρ_d 和高光反射部分 ρ_s ：

$$\rho(\mathbf{i}, \mathbf{o}) = \rho_d(\mathbf{i}, \mathbf{o}) + k_s \rho_s(\mathbf{i}, \mathbf{o}) \quad (2-4)$$

其中 k_s 是高光反射系数，控制了高光反射和漫反射强度的比例。

通过假设这些微面元构成一个高度场，其高光反射部分可以进一步分解为法向分布函数 D （Normal Distribution Function - NDF）、阴影遮挡项 G （shadowing-masking term）以及菲涅尔反射项 F_r （Fresnel term）：

$$\rho_s(\mathbf{i}, \mathbf{o}) = \frac{D(\mathbf{h})G(\mathbf{i}, \mathbf{o})F_r(\mathbf{i}, \mathbf{o})}{4(\mathbf{i} \cdot \mathbf{n})(\mathbf{o} \cdot \mathbf{n})} \quad (2-5)$$

NDF $D(\mathbf{h})$ 描述了微面元法向方向的统计分布，并表征了材质高光反射部分的主要高频特征。对于阴影遮挡项，Ashikmin 等在论文^[20]中给出了一个近似的计算方法，根据NDF，对应的阴影遮挡项可以根据如下公式计算得到：

$$S(\mathbf{o}) = \frac{\mathbf{o} \cdot \mathbf{n}}{\int (\mathbf{h} \cdot \mathbf{n}) D(\mathbf{h}) d\omega_h} \quad (2-6)$$

最后，菲涅尔反射项可以通过如下公式近似计算

$$F_r(\mathbf{i}, \mathbf{o}) = \frac{(g - c)^2}{2(g + c)^2} \left(1 + \frac{(c(g + c) - 1)^2}{(c(g - c) + 1)^2}\right) \quad (2-7)$$

其中， $g^2 = \eta^2 + c^2 - 1$, $c = |\mathbf{i} \cdot \mathbf{h}|$ ， η 代表材料的折射率。

在构成微面元BRDF的几个分解项中，NDF包含了主要的高频特征，是描述材质反射属性的主要成分。因此，相比参数化模型，根据离散化采样存储完整NDF的微面元BRDF模型具有更高的真实感。

2.2.2 完整采集的反射纹理

对于材质的反射属性，最直接的方法就是对整个函数空间进行直接的采样并存储。人们设计了大量复杂的设备来采集SVBRDF^[21-23], BTF^[24], 及反射光流场^[25]。这些方法虽然可以有效地采集到完整反射纹理数据，但是，他们都需要具有悬臂的复杂采集设备，而且整个采集时间将持续数小时，中间所产生的巨大数据量，也使得数据处理相当耗时。

基于图像的采集方法^[26,27]从一个具有同质材质的凸几何物体上采集4维的BRDF，这种方法并不采集纹理的空间分布，而是将几何体表面的空间分布转化为角度分布来提高采样效率。

为了提高采集效率，很多工作设计专门用来采集BRDF或SVBRDF的设备。Han等^[28]设计了一个类似万花筒的设备，用于采集BTF，然而，这个设备的角度分辨率非常受限，因此无法用于SVBRDF的采集。Mukaigawa^[29]和Moshe^[30]，设计了用于完整采集BRDF的设备，可以在几分钟到几十分钟的时间中采集到一个完整的BRDF。

这些直接采集数据的方法，比起参数化表达的反射模型，其模型的表达能力更强，可以精确地刻画物质表面复杂的光影效果。然而，直接采样高维纹理材质所带来的巨大数据量，冗长的采集时间和复杂的采集设备这些缺陷极大地限制了完整采集和存储反射纹理这一方法的实用性。因此，基于数据相关性的反射纹理采集反射纹理的方法应运而生。

2.2.3 基于数据相关性的反射纹理采集

重构参数化SVBRDF

通过参数化模型来简化BRDF，同时通过空间和角度上的数据冗余，使得基于稀疏数据重构SVBRDF成为可能。Lensch等^[31]将已知几何的物体上的BRDF归

结为几个Lafortune基函数的线性组合，通过聚类的方法，可以从稀疏采样中重构出基函数和对应的线性组合系数。Goldman等^[32]采用了同样的全局基函数线性组合的方法，但采用Ward模型作为基函数的类型，同时重构出物体的几何外形与SVBRDF。这些方法虽然可以获得反射纹理的空间变化，但由于这些方法对角度域进行大量的复用和聚类，它们无法重建BRDF在角度域的变化（如各向异性反射、尖锐的镜面反射，或更复杂的反射属性）。同时，他们所采用的参数化模型也无法完整地保持真实世界样本复杂的反射特性。

利用反射纹理在空间冗余

Zickler等^[33]用六维方向基函数(radial basis functions)来描述SVBRDF。通过假设反射模型符合各向同性，并利用SVBRDF在空间上的连续性，该方法可以从空间相邻的像素之间共享采样，并从离散采样中重构SVBRDF。然而，空间上缓慢连续变化的假设，使得该方法难以实际应用于具有复杂空间分布的纹理材质。

Wang等^[18]从单个视角和密集采样的光照条件实现了各向异性SVBRDF的重构。通过将空间中不同位置，具有相似反射属性的像素聚类在一起，该方法实现了仅利用单个视角的重构。然而，该方法依然需要在光照角度上进行密集采样，才能保证获得足够用于成功重构各向异性BRDF的角度分辨率。

基于欧氏空间的反射纹理建模

Alldrin等^[34]将参数化模型作为基函数进行全局线性重构的方法推广到利用各项同性的bivariate函数作为BRDF基函数。由于各向异性BRDF具有明显的非线性特征，而其全局所处的欧式空间维度过高，使得该方法难以应用到各向异性的反射材质中。

Debevec等^[35]提出先测量一组代表性BRDF，随后以漫反射颜色作为依据，寻找具有相似颜色的代表性BRDF，依据漫反射颜色进行线性重构构建对应的高光反射部分。该方法仅对某一类特殊的材料有效，而对于一般类型的材质，其漫反射颜色与高光反射并不构成直接关系，因此该方法并不适用于一般情况下的表面反射纹理采集。

Matusik等^[36]将各项同性BRDF表达为100个密集采样过的BRDF的线性组合。依据这一方法，最优的重构一个各向同性的BRDF需要大约800个采样才能实现。类似的方法被应用在人的皮肤质感采集这一特殊领域，Weyrich等^[37]手工挑选了一组BRDF作为基函数，同时利用矩阵非负分解的方法重构对于每一个像素位置的线性组合系数。利用该方法，重构SVBRDF依然需要15个不同视角和300个

光照条件的数据才能完成。这类方法仅对各向同性BRDF有效。同时由于无法有效地确定针对当前所采集样本的BRDF基函数，重构算法需要更多的采样信息才能计算出合理的线性插值系数。

2.2.4 基于用户交互的建模

大量的计算机视觉相关的问题极大地依赖于先验知识，在缺乏先验知识的情况下，有些问题本质上就是病态的（ill-posed），从单一输入图像来重构纹理材质的问题就属于此类。为了有效地解决这些问题，一类常用的方法即引入用户的交互，根据用户通过简单交互提供的约束，为问题提供更多信息，并最终产生用户满意的结果。

交互式本质图像分解

本质图像分解（Intrinsic Images）的目标是将图像分解为构成图像本身的本质部分，往往将图像分解为对应的反射部分和光照部分。由于其作为输出的未知数个数要远多于输入的图像约束，因此在缺少先验知识的条件下无法获得完美的分解。Bousseau等在论文^[38]中提出，利用用户交互的方法，用户通过画刷标示出图像中没有反射变化或没有光照变化的部分，随后算法会根据用户的输入计算出一个合理的光照与反射的分解。然而，Bousseau的方法集中于研究一般自然图像的分解，对于纹理图像而言，由于具有大量的纹理细节，并且纹理图片中的光照与反射变化往往混合在一起，使得用户无法找到合适的位置标示没有光照或反射变化的区域，并导致交互无法顺利进行。

交互式几何重建

从单一光影（shading）图片重建几何模型同样是一个病态的重构问题。虽然一些根据先验知识设定的约束模型可以有效地保证几何重建得到唯一解，大量的歧义情况（如浮雕歧义）依然存在，并导致算法产生不正常的结果。为解决这一问题，Wu等在论文^[39]中提出了交互式几何重建的方法，用户通过画笔在输入图像上交互的绘制法向来提供几何信息，根据用户所绘制的法向，结合基于光影重建的法向贴图最终可以产生出具有符合用户期望的几何形体。

交互式材料编辑

Khan等^[40]提出了一个算法可以交互式的改变照片中物体的材质属性，根据照片所涉及的部分环境，以及物体本身的亮度信息，该算法可以估算物体的大致

几何外观和环境因素，并模拟出类似改变照片中物体材质类型的效果。然而这种方法并不能重构出具体的几何形体和实际的反射纹理，因此其结果并不能用于真实感图像渲染。Xue 等^[41]利用用户交互，计算出照片中材料风化（weathering）的程度，基于表观流形的方法，可以实现对照片中材质风化程度的调整。虽然该方法采用色调信息来协助分离漫反射与光影，然而仅仅通过该方法并不能完好地完成分离，其统计方法仅可作为用户交互的初始估计。同时，这些交互式材料编辑的方法并没有显式地重构出对应的反射贴图或法向贴图，因此其产生的结果并不是材质纹理，无法应用于其他场景的真实感渲染。

交互式纹理材质建模

既有的将用户交互用于纹理材质建模的研究并不多见，一些相关的方法或用于重构纹理的凹凸结构^[42]，树皮的凹凸质感^[43]，或是重构基于过程纹理的体数据^[44]。这些方法被设计专门用于某一特殊领域的建模，并不具有通用性。对于通用广泛类型纹理材质，如何重构包括反射模型和法向纹理在内的完整纹理材质，仍然是一个尚未得到深入研究的问题。

第3章 基于相关性的快速实体纹理合成

纹理映射（Texture Mapping）可以为几何模型增添大量的质感细节，是计算机图形学中一项重要应用。表面纹理映射主要通过将几何曲面参数化映射到二维平面，并将二维纹理定义在这个平面上来实现对几何表面上的纹理渲染。然而，由于这个映射过程会产生大量的畸变和不连续区域（参考图1.4），通常需要复杂的手工修正才能实现高质量的表面纹理映射。另一方面，实体纹理（Solid Texture）的定义域与几何模型一致，都是定义于三维空间，因此，当采用实体纹理为几何模型增添细节时，不需要对几何模型进行任何平面化映射。同时，实体纹理可以给几何模型带来一种“如同从一块实体材料中雕刻出来”的真实感受。

Perlin^[3]首先实现了一种通过简单的数学函数计算就可以得到三维空间中任何一点所对应实体纹理的方法。这种方法内存占用量小，计算简单，可以实时地对表面添加纹理。这种方法最大的优点在于，对于空间中任何位置，其纹理的计算仅仅与当前坐标和算法参数有关，而与空间中其他位置的纹理无关。这种局部计算（local evaluation）的性质可以使得纹理计算仅仅在表面所需要的空间位置进行，而不需要计算出完整的三维空间。虽然Perlin^[3]的方法具有这样的优势，但正如第2章中分析的，这种方法仅仅可以产生有限类型的材质，并不具有足够的普适性。

近几年基于样本纹理合成的方法提出了产生实体纹理的另外一种思路^[12,14,45]：根据输入的二维纹理样本，通过计算产生与二维纹理样本外观一致的完整三维实体纹理。然而，由于当前的实体纹理合成算法均是一种全局计算的过程，过长的决定性链导致计算任何一个体素（voxel）都会涉及到完整三维空间的全部体

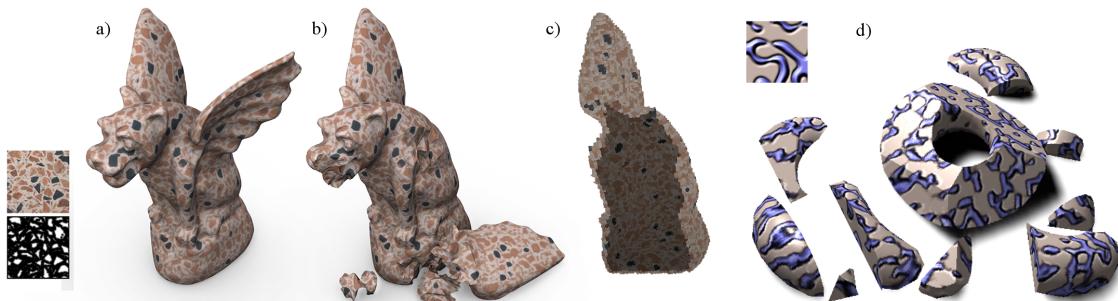


图 3.1 基于表面的纹理合成，根据二维纹理输入在物体表面合成实体纹理。整个体数据中仅有表面需要用于渲染的体素得到合成。a)在石像鬼模型上合成的分辨率为 1024^3 的实体纹理。b)合成的纹理具有实体纹理的连续性，因此物体可以被切开。c)在全部体素中，仅有0.42%的体素被实际合成，而非完整 1024^3 的体数据。d)该算法支持交互式的切割物体，新产生的表面可以在10ms内完成纹理合成。

素。因此，这些方法无法用于仅仅计算空间中实际用来表面渲染的一小部分体素，而必须计算完整的实体纹理。完整的实体空间对于表面面积而言，其数据量高了一个维度，由此导致的计算量与存储量也就相对地随之快速增长。对于一维分辨率为 n 的几何表面，所需要计算的目标体素具有表面量级的复杂度 $O(n^2)$ ，而这些传统方法无论是时间还是空间复杂度都是 $O(n^3)$ 。

传统纹理合成的方法，在进行实体纹理合成时，由于没有考虑到实体纹理在三维空间上的相关性，导致迭代周期长，并产生上述缺陷。为了解决现有方法中存在的问题，充分利用实体纹理在三维空间的相关性，本章提出一种基于相关性的实体纹理合成算法，同时具有基于样本的纹理合成所带来的高度真实感；并且实现了仅在表面局部进行计算的特性，其时间与空间复杂度仅与几何表面积有关，而与完整实体的三维尺寸无关。通过几秒钟计算，算法就可以完成复杂表面上高分辨率的实体纹理合成，随后对于任何的切割，纹理合成算法都可以在几十毫秒的时间内产生出切割表面所需的实体纹理，实现实时的实体纹理合成。

3.1 系统概述

给定三个方向上的二维纹理（通常情况下，是同一个二维纹理重复三次），实体纹理合成的目标是合成高质量，高分辨率的实体纹理，这个实体纹理在三个给定的方向上与输入的二维纹理一致。本文讨论在任意曲面上进行实体纹理合成的方法，与完整实体纹理数据的合成不同，本方法能够快速合成实体纹理数据中仅与曲面相关的部分。

对于进行三维实体纹理的合成，一个最直接的想法是基于Wei在博士论文^[12]中提出的算法，利用二维 k -coherent candidates方法^[9]进行并行化进行加速。然而，类似 k -coherent candidates这样专门为二维纹理合成设计的算法对于三维纹理合成并不具有实际的指导意义。虽然这些方法给出的每一个候选纹理（candidates texture patch）都表达了一个在原始二维纹理中合理的纹理区域，但将三个方向的候选纹理放在一起却会产生纹理颜色的不一致性。而这种不一致性或者会导致纹理合成质量的降低，或者导致需要更长的迭代周期来获得更高质量的结果。由于合成过程需要相当多的迭代周期进行计算，为计算空间中一个像素所需要的邻域像素数目也就随之快速增长，并导致无法进行局部计算。这种直接应用二维相关性的方法与本文提出的方法在3.4.5节有具体的比较。

本文提出的方法直接通过预算算从二维纹理产生三维候选组（3D candi-

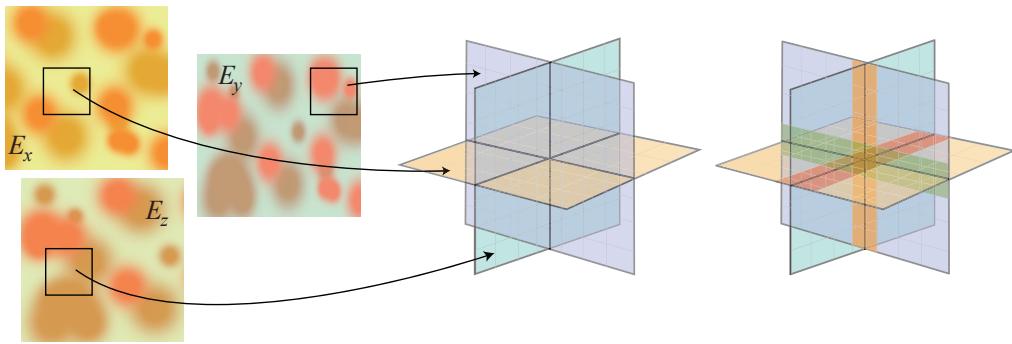


图 3.2 定义三元组与三维邻域，左图为三个输入二维纹理 E_x , E_y , E_z , 以及相互交叉的三维邻域。

dates），每个三维候选组由合理选择的三个方向的二维纹理互相交叉组成。利用这些候选组，实体纹理合成的速度和质量都可以得到显著地提高。三维候选组的产生仅需要对每个输入的二维纹理进行一次预计算，而后，这些候选组就可以用于并行化实体纹理合成，具体候选组产生算法将在第 3.2 节中介绍。随后第 3.3 节提出了一种多分辨率的纹理合成算法，该算法仅合成在整个三维纹理空间中所需要用于表面渲染的那一部分离散的纹理区域。由于此算法具有高度的并行性，可以直接利用 GPU 对其进行加速计算，具体的 GPU 实现内容将在第 3.4 节中介绍，根据这种实现，三维物体可以被交互式的实时切割，新切割出的表面部分所需纹理可以由算法在几个毫秒之内完成合成。

3.1.1 纹理合成中常用的名词与符号

由于纹理合成过程中会涉及到大量的坐标运算、专有名词的引用、以及二维、三维纹理空间的索引，为澄清起见，在这里集中介绍一下本章节中所涉及的名词与符号系统。

首先，我们称一个二维点阵图像中的每一个点为一个“像素”(pixel)，而对三维点阵中的某一个点则称之为“体素”(voxel)。在本章节中，如图 3.2 中间所示，三个 $N \times N$ 二维纹理邻域在三个方向上相互垂直交叉，三个二维纹理邻域的中心重合，构成了一个“三维邻域”(3-neighborhood)。本章节中涉及的试验均采用 $N = 5$ 作为参数，并可以获得相对适当的纹理合成质量与合成速度。对于那些经过选择，符合需求的三维邻域，则可以称之为“三维候选”(3D candidate)或“候选三元组”(3D candidate triple)

E_x , E_y , E_z 代表对应于 x , y , z 三个方向的三个二维输入纹理，如图 3.2 左所示。而“三元组”(triple) 则是包含三个二维坐标，这三个二维坐标与指定义了一个“三维邻域”所对应二维纹理邻域中心点所对应。

在多分辨率算法中，不同分辨率的纹理构成一个实体纹理金字塔 V 。金字塔的每一级被表示为 V^l ，其中 $l \in [0 \dots L]$ 表示层级， L 代表最精细（分辨率最高）的一层。

3.2 候选三元组

为了保证纹理合成过程中纹理在三维空间上的一致性，对于输入二维纹理的每一个像素，需要通过预算产生一组由三元组表达的候选三元组。这些候选三元组将会作为最佳匹配的三维邻域的候选用于实体纹理合成，因此，需要这些候选三元组能够在三维空间内依然保持输入纹理的纹理特征。

根据给定三个方向的输入纹理 E_x, E_y, E_z ，可供选择的三元组数目非常之大，任何三个坐标的排列组合都有可能成为候选。本文提出的方法关键就在于如何快速有效地去除不可能成为候选的三元组，因而提升寻找合理候选三元组的效率。然而，这里的难点在于，候选三元组的质量最终需要由纹理合成的结果决定，当我们还没有进行纹理合成的时候，就没有直接的方法来对三元组的质量进行衡量和评价。因此，需要设计一种用于产生候选三元组的预算算法，其算法输入仅与输入纹理有关，而不包含任何实体纹理合成计算的结果，算法仅仅通过输入纹理构成的三元组的性质来判断这样的三元组是否适宜进行实体纹理合成。

因此，这里针对候选三元组提出两条重要的性质作为选择依据：第一，一个有效的候选三元组，其构成的三维邻域应该在三个方向的交叉区域具有一致的颜色。根据这一性质，利用第3.2.1节提到的颜色一致性筛选方法，可以快速地筛选掉大量颜色不一致的三元组。第二个性质和纹理合成的算法有一定的关系，纹理合成之所以能够提高计算效率，其中一个主要因素就是利用到纹理中的相关性，在二维纹理合成中^[8,46]，具有一致性的纹理邻域有更高的可能性提供一个好的邻域匹配。由于三维邻域的三个方向互相垂直交叉，因此将相关性这一性质引入到三维空间并不是一个显而易见的过程，因为在每一个方向上具有相关性的邻域，并不保证在另外两个方向上同样保持相关性。因此本文将三维邻域在三个方向上的相关性一起考虑，那些只有在三个都能保证纹理相关性的三元组才会被留下来作为候选。如何具体的实现这种三维的相关性，将会在第3.2.2节中讨论。

为了配合多分辨率的纹理合成，在进行预算产生候选三元组时，需要先对输入的二维纹理构建对应的多尺度金字塔，而后，对应于每一个尺度的二维纹理，利用相同的方法对每一层的二维纹理构造候选三元组。为了讲述方便，本章

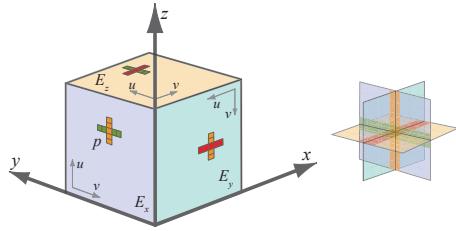


图 3.3 每个候选三元组由三个纹理坐标组成，并构成一个三维邻域。候选三元组的二维邻域交叉部分，应具有一定的纹理颜色。算法寻找在标有同样颜色的区域，纹理差异最小的三元组作为候选。

节所有叙述都针对某一层级的输入进行讲述。

3.2.1 颜色一致性原则

构造候选三元组的第一个重要观察就是，合理的候选三元组在三个方向交叉的区域应该具有一致的颜色。否则不一致的颜色互相混合，其产生的结果将不可预测，混合的颜色不会与原始纹理一致，破坏了纹理的相关性。根据这一性质，颜色一致性选择算法首先挑选那些具有在交叉区域颜色一致的三元组作为构建候选三元组的初始集合。

如图 3.3 所示，所谓的保持颜色一致性就是要最小化在图中标示出的阴影区域三个方向纹理邻域所共有部分的纹理颜色差异。这个差异可以表示为，在三个方向的输入纹理上(E_x , E_y , or E_z)，二维邻域对应的条状区域像素 ($N \times 1$ 或 $1 \times N$ 区域)之间的 L^2 颜色距离。对于任何一组三元组，其对应的二维邻域在三个方向上的差异之和就构成了整体的交叉区域颜色差 CB

对于输入纹理的每一个像素，三元组取自当前像素坐标以及另外两个方向的输入纹理的坐标。具有最小的交叉区域颜色差的三元组被留下作为候选三元组的初始集合。为了提高计算效率，对其中一个方向的输入纹理进行计算时，需要对另外两个方向的输入纹理建立 ANN 搜索结构^[53]，并由此快速寻找前 S 个具有在交叉的条状区域上最佳匹配的纹理邻域对应的坐标。例如，对于图 3.3 中的例子，当对纹理 E_x 的 p 像素进行预算算时，需要首先在纹理 E_y 中找到 S 个条状区域最满足 E_x 中标示为橘黄色对应的条状区域；而后，需要在纹理 E_z 中找到 S 个条状区域最满足 E_x 中标示为绿色的对应条状区域。基于这两组数据，并将当前像素作为第三个坐标方向，就可以产生 S^2 种可能的三元组组合，在所有的三元组组合中，选择具有最小 CB 的三元组，作为候选三元组的初始集合。在实际的计算中，通常取 $S = 65$ ，并选择具有最小 CB 的 100 个三元组作为初始集合。

3.2.2 三维空间的相关性原则

颜色的一致性仅能作为构成合理的候选三元组的一个必要条件，而依然有很多其他条件并没有被涵盖。因此，如果仅仅使用颜色一致性作为唯一的条件产生候选三元组，由于这些三元组中依然含有大量的不适合于实体纹理合成的候选，无法保证纹理合成算法的计算效率。

因此，当根据颜色一致性进行三元组的筛选后，基于三维空间的相关性筛选将进一步选择那些同时在三个方向上维持相关性的三维邻域，并最终构成用于纹理合成的候选三元组。

虽然在三维空间的相关性定义比较复杂，但实际的计算方式却很直观。对于某个像素的一个三元组，对于每一个坐标，三维相关性筛选算法会在它周围像素的三元组中进行寻找相关性匹配，只有在周围像素的三元组中找到一个三元组在对应方向的坐标和当前坐标相连续时，算法就认为这个坐标维持了该方向上的连续性。筛选算法对三个方向的连续性分别进行检查，并仅留下那些在三个方向均具有连续性的三元组作为候选。当然，就像传统二维纹理合成中一样，对于当前进行预算的方向对应的纹理 E_x 而言，在 E_x 方向的连续性自然会始终保持。

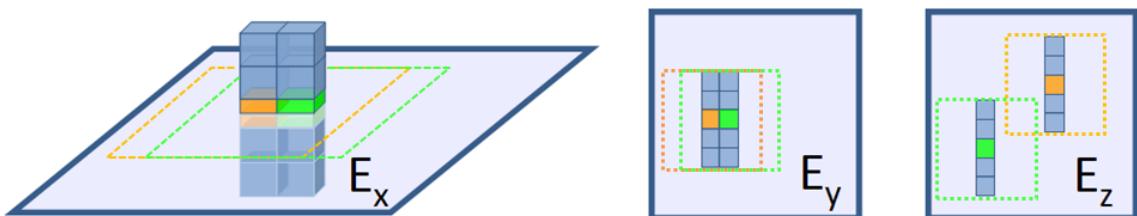


图 3.4 在 E_x 上两个相邻的候选三元组，每个三元组包含 E_x , E_y 和 E_z 三个纹理上的坐标。第一个三元组用橘黄色表示，而第二个用绿色表示。这两个三元组对应的纹理坐标在 E_y 依然连续，保持了纹理在该方向的相关性。而对于 E_z 方向上表明这一对三元组在该方向上不相关。

为了表达清晰，这里用数学化的方法来描述这个过程：不失一般性，这里仅考虑为方向 E_x 进行预算的情景。我们将 E_x （对应 E_y , E_z 同样）上所有的候选三元组记为 ${}^x C$ （对应 ${}^y C$, ${}^z C$ ）， ${}^x C^k[p]$ 表示对于 E_x 上像素 p 上的第 k 个候选三元组。同样的 ${}^x C^k[p]_y$ 和 ${}^x C^k[p]_z$ 则对应于 E_y 和 E_z 上的候选三元组。

对于任意像素 p ，算法迭代根据如下公式更新三元组集合：

$${}^x C_{i+1}[p] = \left\{ c \in {}^x C_i[p]: \exists k_1, k_2, |\delta_1| = 1, |\delta_2| = 1 \text{ s.t.} \begin{cases} |{}^x C_i^{k_1}[p + \delta_1]_y - c_y| = 1 \\ \text{并且} \\ |{}^x C_i^{k_2}[p + \delta_2]_z - c_z| = 1 \end{cases} \right\} \quad (3-1)$$

其中， i 是迭代计数， k_1, k_2 是候选三元组的索引，而 δ_1, δ_2 对应于在原始纹理对应邻域上的偏移量。筛选的过程经历多个这样的迭代，其中每个迭代都会去除掉一些不满足一致性的三元组。在本文的具体实现中，筛选算法会一直筛掉三元组，直到每个像素上剩下12个候选三元组时停止，一般情况下，需要2个迭代周期。如果始终有多于12个候选三元组，算法将选择具有最小颜色差异的12个三元组作为候选。虽然理论上无法证明一定存在满足这一性质的三元组，但实际计算中，很少出现无法产生足够候选三元组的情况。具体情况将在3.5节中有所讨论。

3.2.3 由候选三元组生成初始化纹理板

预算算之后，在输入的二维纹理的每个像素，都获得了一组候选三元组，这些三元组不仅仅可以在纹理合成中用来进行邻域匹配，它们还可以为纹理合成构造一个合适的初始值。

这里首先对初始化纹理板的基本概念进行一个形象的解释，由于每个候选三元组对应了一个三维邻域结构，因此每一个候选三元组事实上对应了三个相互垂直交叉的 $N \times N$ 二维纹理邻域。其中的一个二维纹理邻域就是当前的输入二维纹理平面，而另外两个则与其垂直（参见图3.5）其交叉线构成了一条与当前纹理垂直的N个体素长的线段。将二维纹理每个像素上的这一条线集合起来，就将原始的二维平面纹理“增厚”成为了一个具有N个体素厚度的纹理板（candidate slabs）。

在实际的初始化过程中，算法选取每个像素上第一个候选三元组来构成初始化纹理板。图3.5示意了一个在实际纹理合成过程中产生的纹理板。这种纹理板堆叠起来进行初始化，保证了初始化的实体纹理和输入纹理具有一定的相似性，进而减少了纹理合成所需的迭代数目。

值得注意的是，这里仅使用了第一个候选三元组来生成初始化纹理板，而对于每一个像素，其对应的候选三元组还有很多。这也就意味着，这个初始化纹理板仅仅适用于进行纹理的初始化，而不能作为一个三维的实体纹理样本，直接进行纹理合成。因为这样会完全忽略掉其他候选三元组所含有的信息。同时，这样的一个纹理板还有很多地方存在瑕疵需要修正，依然不能完全符合纹理合成的要求，只能作为一个初始值。因此，本文提出的纹理合成方法依然是基于所有的候选三元组进行三维邻域匹配，这里产生的纹理板仅仅作为一个初始值来使用。另外，这里讨论的方法与直接用一个三维实体纹理作为样本也有很大的不同，首先三维实体纹理样本难以获得，其次直接用三维实体纹理作为样本将会产生比本文提出的方法多得多的数据量才能获得相同规模和类型的候选组。

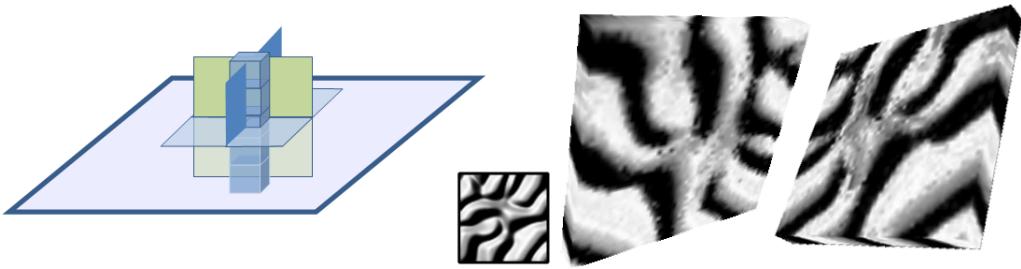


图 3.5 初始化纹理板：此数据仅作为初始化使用，用以保持纹理结构信息，并不作为纹理合成的最终结果。

3.3 实体纹理合成算法

给定输入的二维纹理，预算算产生了一组保持了纹理相关性的候选三元组，本节将讨论如何根据这些候选三元组，进行高效率的实体纹理合成。

这里介绍的并行化纹理合成算法从整体结构上与Lefebvre等提出的用于二维纹理合成的并行化算法^[15]相似，然而在每一个具体的算法步骤上，两者具有很多不同。

3.3.1 并行化实体纹理合成算法

首先，与传统的二维纹理合成方法中建立二维多分辨率金字塔不同，这里设计的方法是基于一个多分辨率的三维体金字塔结构。在纹理合成过程中，根据需要产生纹理的位置，只有三维体金字塔中稀疏的部分数据会被算法利用，而非整个三维体数据参与计算。

在每一个分辨率下，算法进行两个主要步骤：一个是将前一个分辨率的数据根据纹理坐标上采样（Upsampling）到当前分辨率，另一个则是根据候选三元组进行多个迭代的三维邻域匹配，并最终修正（Correction）三维实体纹理，使得结果符合输入纹理。与传统二维纹理合成方法不同，由于三维纹理合成在上采样时就会引入一部分细节上的随机性，而非二维纹理中的根据纹理坐标直接上采样产生完美的高分辨率细节，因此进行三维实体纹理合成时，仅在完成初始化之后进行一次抖动操作（Jitter），而后的每个分辨率下不另外添加抖动。如果用户需要更多抖动的细节变化，算法依然支持在每一层完成上采样后增加一个抖动的过程。

具体的算法流程如下所示：

1. `Synthesize(l_start, Vinit, Ex, Ey, Ez, xC, yC, zC, DesiredVoxels)`

```

2.    $Mask^{l_{start}} \leftarrow ComputeMask(DesiredVoxels, l_{start})$ 
3.    $V^{l_{start}} \leftarrow \text{tiling of } V_{init}$ 
4.    $V^{l_{start}} \leftarrow \text{Jitter}(V^{l_{start}})$ 
5.   For  $l = l_{start} \dots L$ 
6.     If  $l > l_{start}$  then  $V^l, Mask^l \leftarrow \text{Upsampling}(V^{l-1}, Mask^{l-1})$ 
7.     For  $p = 1 \dots 2$ 
8.        $V^l, Mask^l \leftarrow \text{Correction}(V^l, Mask^l, {}^x C, {}^y C, {}^z C)$ 
9.   End

```

l_{start} 是开始进行纹理合成的分辨率层级。ComputeMask 计算出在第 l_{start} 层需要进行计算的纹理区域。 V_{init} 是开始进行纹理合成的初始值。以上涉及到的每一个步骤，都会在下面的各个章节中独立展开说明。

对于在三维体金字塔中的每一个体素，算法存储的是一个候选三元组，这个候选三元组就对应着一个三维邻域。对于在第 l 层的 v 位置的一个体素，其上存储的候选三元组记作这样的一组三个坐标 $V[v]_x^l$, $V[v]_y^l$ 和 $V[v]_z^l$ 。对于每个体素，其颜色可以通过其上的三个坐标 $V[v]_x^l$, $V[v]_y^l$ 和 $V[v]_z^l$ 在对应的输入纹理 E_x , E_y 和 E_z 上的平均值来获得。

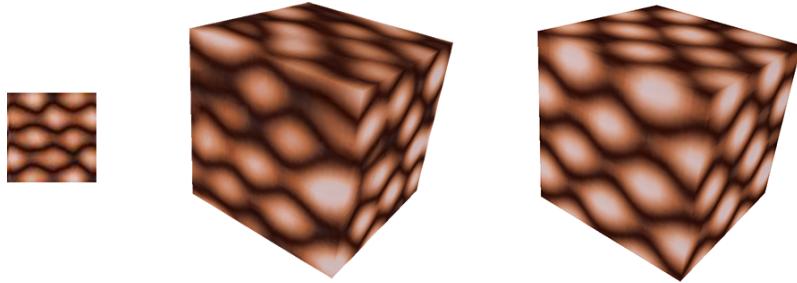


图 3.6 根据纹理板进行初始化，能够更好的保持纹理的周期性结构。左图结果采用完全随机输入进行初始化，右图的结果采用了纹理板进行初始化。

初始化

好的初始值是实现高速高质量纹理合成的一个关键。在实际的纹理合成过程中，多分辨率的纹理合成会从一个中间尺度的分辨率开始，获得纹理初值，并通过迭代的邻域匹配来进行逐步的修正。

与二维纹理合成不同，实体纹理合成的输入样本是二维纹理，因此不存在一个实际的实体纹理用来作为初始化的参考。同时，在前文中已经提及，预计算候选三元组时，可以产生一个纹理板，这里的初始化就是基于第 3.2.3 中产生的初始化纹理板进行。进行初始化时，算法在三个方向的输入纹理中选择其中一个方向，并产生对应的纹理板，将纹理板平铺在初始化层级 V_{init} 作为纹理合成的初始值。在实际实现中，我们从多分辨率金字塔的倒数第三层开始 ($l_{start} = L - 3$)，利用对应层级的纹理板进行初始化并开始纹理合成。

图3.6中体现了纹理板作为初始值对实体纹理合成质量的影响。由于初始化纹理板更好地保持了输入纹理的整体纹理结构，对于具有周期性结构的输入纹理，输入纹理的这种结构被更好地保持，实体纹理合成的质量有了显著提高。

坐标抖动-Jitter

由于初始化过程通过周期性平铺完成，为了打破平铺造成的对应周期性重复，这里提出一种坐标抖动的方法来为结果引入更多的变化。

形象的形容这种坐标抖动是一个连续性的高斯函数变形操作，类似于一个在空间中的随机扭曲。而具体的变形操作则遵从如下的随机坐标扰动

$$\forall v, J[v] = V[v + \sum_{i=0 \dots G} A_i \vec{d}_i e^{-\frac{\|v-c_i\|^2}{2\sigma_i^2}}] \quad (3-2)$$

其中， v 是体素的坐标， A_i 是一个扰动幅度参数， \vec{d}_i 是一个随机生成的扰动方向， c_i 是一个空间中的随机位置， σ_i 控制着第*i*个高斯函数的影响范围。在一个归一化的单位体空间中 G 通常取200左右， A_i 取值在0.1到0.3之间， σ_i 取值在0.01到0.05之间。每一个参数的具体数值对于纹理合成影响并不大，坐标抖动的关键目的在于为算法引入更多的随机性，因而获得更多结果上的变化。而整体的扰动量，可以由用户根据实际的合成要求决定。

上采样-Upsampling

上采样是一个直接的纹理坐标操作，对于高分辨率的八个体素，分别根据其低分辨率中的三元组坐标在对应的方向上进行相对的位移获得。具体而言，对于第*l*层在*ijk*位置新生成的纹理坐标可以根据下式进行计算：

$$V[ijk]_x^l = 2 \cdot V[\lfloor \frac{i}{2} \rfloor, \lfloor \frac{j}{2} \rfloor, \lfloor \frac{k}{2} \rfloor]_x^{l-1} + (j \bmod 2, k \bmod 2) \quad (3-3)$$

$$V[ijk]_y^l = 2 \cdot V[\lfloor \frac{i}{2} \rfloor, \lfloor \frac{j}{2} \rfloor, \lfloor \frac{k}{2} \rfloor]_y^{l-1} + (i \bmod 2, k \bmod 2) \quad (3-4)$$

$$V[ijk]_z^l = 2 \cdot V[\lfloor \frac{i}{2} \rfloor, \lfloor \frac{j}{2} \rfloor, \lfloor \frac{k}{2} \rfloor]_z^{l-1} + (i \bmod 2, j \bmod 2) \quad (3-5)$$

$$(3-6)$$

修正-Correction

在纹理修正的阶段，算法根据预算算产生的候选三元组进行快速的三维邻域匹配，并逐步修正纹理，使得合成的纹理符合输入纹理的特征。纹理修正阶段包含了纹理合成中主要的计算量，是影响纹理合成效率的核心，这里提出的修正算法可以同时对所有体素进行计算，利用高度并行性提高计算效率。为了维持并行性，减少数据读取冲突，在当前迭代中的修正计算读取前一个阶段的数据作为输入，因此邻域像素内的修正计算不会相互干扰影响。

上一阶段的算法在每一个体素位置上计算出一个坐标三元组，通过查询三元组坐标对应的输入纹理的颜色并计算平均值，可以获得对应于每个体素的纹理颜色。对于每一个需要进行纹理合成的体素，算法取得这个体素周围当前的三维邻域。这个三维邻域包含了当前体素邻域范围内的当前实体纹理颜色，并用于寻找达到最佳邻域匹配的三维邻域。

对于每一个体素，为了寻找最佳邻域匹配，算法首先需要获得对于当前体素的候选三元组。通过访问当前体素的每个一阶邻居体素，利用邻居体素上存储的三元组坐标，通过coherent^[8] 和 k-coherent search^[9]的方法可以收集到一组对于当前体素的候选三元组。从数学上，对于体素 v 的候选三元组集合 $C(v)$ 可以表示成：

$$\begin{aligned} C(v) &= C_x(v) \cup C_y(v) \cup C_z(v) \text{ where} \\ C_x(v) &= \{ {}^x C^k [V[v + P_x \delta]_x - \delta] : k = 1 \dots K, \delta \in \{-1, 0, 1\}^2 \} \\ C_y(v) &= \{ {}^y C^k [V[v + P_y \delta]_y - \delta] : k = 1 \dots K, \delta \in \{-1, 0, 1\}^2 \} \\ C_z(v) &= \{ {}^z C^k [V[v + P_z \delta]_z - \delta] : k = 1 \dots K, \delta \in \{-1, 0, 1\}^2 \} \end{aligned}$$

${}^x C^k[p]$ 对应于在 E_x 上坐标 p 位置上像素的第 k 个候选三元组， 3×2 矩阵 P_x , P_y 和 P_z 是从纹理坐标空间到三维体空间对应的空间变换矩阵(具体变换方式参考图3.3)。

每一个候选三元组对应于一个三维邻域，在进行邻域匹配过程中，算法计算当前体素的三维邻域与候选三元组的三维邻域在颜色空间的 L^2 距离，取距离最小的三元组更新当前体素三元组，作为一个修正。在具体实现中，可以通过主成份分析（PCA）将三维邻域空间构成的向量进行降维，进而加速计算。

整个修正过程中，对于每个体素更新的数据都来自于经过预算算的候选三元组。因此，三元组之间的颜色一致性与空间相关性始终得到保持。

在实际计算中，对于每一个分辨率层级，进行两个完整的修正迭代，同时，利用类似于Lefebvre^[15]设计的子过程结构（sub-pass mechanism），每一个完整迭代被分解成8个子过程，在每个子过程中间隔计算1/8数目的体素。实验表明这种

结构的子过程可以有效地提高纹理合成中修正迭代的收敛速度。

基于二维邻域快速匹配的加速算法 虽然基于当前提出的候选三元组算法已经极大的提高了纹理合成的计算效率，然而由于三维纹理的维度高，因此而产生的三维邻域匹配计算量依然很大。在实际情况中，对于一个体素的候选三元组来自于该体素的 $3^3 = 27$ 个直接邻居，每个邻居提供12个候选三元组，也就是总计324个需要进行邻域匹配的候选三维邻域。这里提出一种基于二维邻域快速匹配的方法，在进行修正迭代时，根据当前的纹理邻域，将匹配搜索分为两步，进一步筛选候选三元组，减少计算量。

对于一个体素，加速算法在第一步首先在三个方向上寻找最佳的二维邻域匹配，只有来自于二维邻域最佳匹配的候选三元组被用于第二步的三维邻域匹配。这种模式在保持了足够多的候选组和的同时，极大地减少了需要进行三维邻域匹配的候选三元组数目。在实际实现中，为了保证计算速度，对于输入纹理的每一个像素加速算法存储4个二维候选以及12个三维候选，对于最高分辨率的层级，候选的数目减少到2个二维候选和4个三维候选。因此，对于每一个体素，最多只需要进行 $27 \times 4 = 108$ 次二维邻域匹配，以及 $3 \times 12 = 36$ 次三维候选匹配即可获得最佳的三维匹配。

3.3.2 任意表面上的纹理合成

为了减少计算规模，算法仅针对那些用于表面渲染的体素进行纹理合成计算。因此，算法需要统计出为了合成目标体素所涉及到了哪些邻域像素。根据纹理合成的决定性关系链（dependency chain），算法在不同分辨率下标示出那些对目标体素起到决定性作用的像素。通过这一机制，算法可以保证对应于空间中任何一个位置的体素，其纹理合成过程可以被完全决定，保证了空间上的合成顺序无关性。为了便于直观理解，在图3.7中，以二维纹理合成为例示意了对应的基本思路。

对于三维空间中的一个体素，算法通过一个纹理蒙版（synthesis mask）来标识当前体素是否需要进行合成。当 $Mask_p^l[v]$ 为真时，表明在第 l 层、第 p 个修正迭代时，处于位置 v 处的体素需要进行纹理合成。值得注意的是，纹理蒙版仅需要在最初的层级 l_{start} 进行计算，在纹理合成的过程中，根据上采样和修正过程的逻辑，对应的纹理蒙版可以被直接更新。

蒙版的计算的过程按照从最精细的分辨率到最初始的分辨率，迭代的顺序从后往前的顺序进行。对应的蒙版计算过程可以用下面的伪代码来精确描述，其

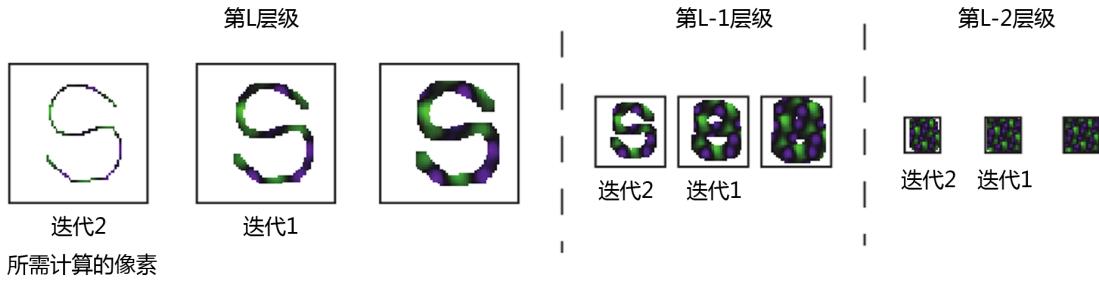


图 3.7 从最精细分辨率中所需要进行纹理合成的像素出发，根据决定性链，可以计算出在整个多分辨率金字塔上不同迭代周期内需要进行计算的像素数目。

中， $Mask_p^l \otimes NeighborhoodShape$ 表示蒙版（Mask）和三维邻域对应的空间形状（NeighborhoodShape）的一个卷积。函数 *Downsample* 将蒙版进行下采样，如果一个低分辨率中的体素所对应的 8 个高分辨率体素中有至少一个体素被标明为蒙版内区域，则当前低分辨率体素被标明为蒙版内区域。最终需要用于渲染的目标体素集合用 *DesiredVoxels* 来表示。

在纹理合成时，决定关系链受到迭代数目，以及邻域大小的影响。在 $N = 5$ ，两个修正迭代，三个分辨率层级的情况下，对应于一个目标体素，具有决定性关系的体素总计有 6778 个。

```

1. ComputeMask (DesiredVoxels)
2.   Masklastpassfinestlevel ← DesiredVoxels
3.   Foreach level  $l$  from finest to  $l_{start}$ 
4.     Foreach pass  $p$  from last to first
5.       Mask $p-1$  $l$  = Mask $p$  $l$   $\otimes$  NeighborhoodShape
6.     end foreach
7.     If  $l > l_{start}$  then Masklastpass $l-1$  = Downsample(Maskfirstpass $l$ )
8.   end foreach
9.   return Mask $l_{start}$  $l$ 

```

3.4 实现细节与结果

本节讲述任意表面实体纹理合成的具体实现细节，以及实验结果。为了有效地发挥算法高度并行化的特点，我们利用 GPU 对并行化的阶段进行加速。所有实验结果是基于一台配有 Intel Core2 6400 (2.13GHz) CPU 和 NVIDIA GeForce 8800 Ultra 的工作站进行。

在一部分实验结果中，与 Kopf^[14]一样，在传统的 RGB 通道之外，我们也采用了纹理的特征距离（feature distance）图像来进行辅助纹理合成。如果一个结果采用了特征距离的辅助，对应的结果图像中将同时附上所使用的特征距离图像。

3.4.1 候选三元组的预算算

除图3.10中的实验结果外，其他实验结果均采用同样一个输入纹理重复的使用在三个方向上作为输入纹理。根据所对应的纹理方向 E_x , E_y and E_z ，不同方向上的输入纹理可以共享预算算产生的候选三元组。考虑到这样的情况，预算算的时间复杂度和空间存储都可以被进一步减少。在本章所汇报的统计数字中，所有的预算算时间均以单一纹理输入的预算算为准，这个单一的纹理输入所对应的三个方向如图3.3所示。

进行候选三元组的预算算所需时间非常短，对于分辨率为 64^2 的输入纹理，平均的预算算时间为7秒。对于分辨率为 128^2 的输入纹理，平均的预算算时间为20到35秒不等。这里统计的预算算时间，包含建立多分辨率金字塔，利用PCA对二维邻域进行降维以及计算候选三元组。对于分辨率为 64^2 的输入纹理，预算算算法所需要的数据结构存储空间为231KB。

利用预算算产生的候选三元组，纹理合成算法可以实时的产生对应于任意表面上的实体纹理，合成的实体纹理具有三维空间上的连续性，同时具有和输入纹理一致的外观。

3.4.2 GPU实现及数据结构设计

本文实验中所采用的纹理合成算法，采用OpenGL Shading Language编写，并通过Fragment Shaders 实现在GPU上的并行计算。三维体纹理被展开平铺在二维纹理贴图上，三元组坐标存储于三个2通道 16 bit的纹理贴图。为减少计算量，三维邻域采用PCA降维，通常选用12到8维左右的空间来保存三维领域，其中，因为分辨率更低的层级的三维邻域含有更多结构性细节，其本质维度较高，因此往往采用更高的维度来存储。最后，所有邻域的存储被量化到8-bits进一步减少存储于计算开销。

任意表面上的纹理合成

当为物体表面赋予实体纹理时，算法仅需要计算那些与表面相交，实际用于表面渲染的体素。为减少内存消耗，本文采用了TileTree^[47]作为表面纹理的存储结构，当然如Octree Textures^[48]等其他类型的实体纹理数据结构同样可以用来存储对应的体素。纹理合成完成后，结果体素会存储在TileTree结构上，并由TileTree完成渲染的工作。如果需要，结果纹理同样可以根据UV坐标存储在物体表面，并可被其他渲染算法所使用。

TileTree数据结构将一个物体的表面切分成一组正方形拼块（Tiles）。每个拼块以一个高度场的形式存储了当前拼块所对应的物体表面渲染所需的体素位置。根据3.3.2节讲述的算法，我们可以计算出对应于这些体素所需要计算的纹理范围，而后对于每个块分别进行纹理合成。为了减少纹理合成时存储三维纹理的开销，我们设计了一个“推体素”的机制，如图3.8所示，具有不规则形状的体素会被“推”为一个更加规整的形状，同时具有更小的包围盒，减少了存储开销。这一设计带来了少量的计算开销，却可以极大地减少在GPU上计算时的显存使用量。

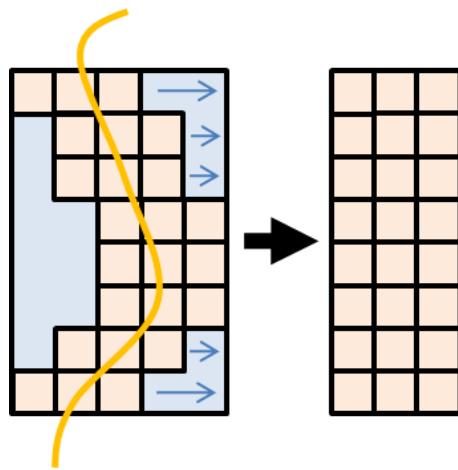


图 3.8 通过“推体素”的方法，可以将不规则形状的体素调整为规则的形状，减少其包围盒体积并节省存储空间。

独立地对表面的每一个拼块进行纹理合成意味着在低分辨率的层级上，大量的像素由于决定链的原因而被多次重复计算。为了避免这一问题，我们设计了一种有效的模拟缓存机制。算法首先会在第 $L - 1$ 层级合成一个 32^3 的纹理体，并将这个纹理体作为一个中间结果存储，而当需要进行纹理合成时，算法根据这个中间存储，并根据前文提到的扰动增加空间上的变换，而后从 $L - 1$ 开始启动进行纹理合成。这样可以很好的重复利用低层级上的纹理合成结果，同时保证最终纹理合成的结果质量。

实体纹理在三维空间上始终保持一致性，当用户交互式的切割物体时，新产生的表面所需要的纹理会在切面产生的同时完成纹理合成，纹理合成的结果直接存储在与切面对应的二维纹理贴图上，算法产生的纹理与之前表面的实体纹理保持完好的连续性。值得注意的是，虽然本文的试验中仅展示了切割面为平面的例子，但本文所提出的纹理合成算法并不仅限于平面，任何其他适当的切割算法与其对应的切面纹理数据结构均可适用于实体纹理合成算法。

3.4.3 完整体数据纹理合成

虽然本章所提出的算法主要着重于解决在任意表面上的快速纹理合成问题，该算法同样适用于快速产生完整的实体纹理数据。这里，我们将讨论利用该算法进行完整实体纹理数据合成，同时与传统实体纹理合成算法进行比较。

纹理合成质量

图3.9中比较了采用本文的方法合成的实体纹理，与其他基于二维纹理样本的实体纹理合成方法^[14]合成的结果。从图中可以看出，本文提出的方法在所有例子中都达到了至少与^[14]同样质量的结果。对于一些输入纹理而言，由于更好的保持了颜色一致性，本文所产生的结果边缘更加尖锐，而Kopf的方法^[14]则会出现一些细节模糊的情况。与Kopf的方法^[14]一样，我们的纹理合成算法同样可以在三个方向上采用不同的输入纹理进行合成。图3.10中展示了一些通过这样的方法产生的复杂的实体纹理。

纹理合成速度

对于图3.9中第一行，输入纹理分辨率为 64^2 ，对应的实体纹理的分辨率是 64^3 ，我们的方法可以在7.22秒内完成对整个实体纹理所有体素的合成（其中包括7秒的预算算时间，与220毫秒的纹理合成时间），相对的内存消耗为3.5MB。而对于 128^2 分辨率的输入纹理，我们的方法需要28.7秒，完成对全部 128^3 体素的实体纹理合成（其中包括27秒的预算算时间，与1.7秒的纹理合成时间）相比而言，Kopf^[14]在其论文中汇报的同样规模的实体纹理，其纹理合成时间在10到90分钟不等。

3.4.4 复杂表面的快速实体纹理合成

图3.11中展示了利用我们的纹理合成算法，在复杂表面上进行实体纹理合成的结果。与传统的完整体数据存储相比，我们的实体纹理合成算法在空间存储上具有绝对的优势。

包含预算算在内，完整表面的纹理合成时间在10.1秒到37.2秒之间，空间存储量在17.1MB到54MB之间，不同表面的复杂度导致不同的纹理合成时间和空间占用。相比传统方法存储完整 1024^3 实体纹理数据所需要的3G内存空间而言，我们的算法在空间复杂度上具有明显的优势。

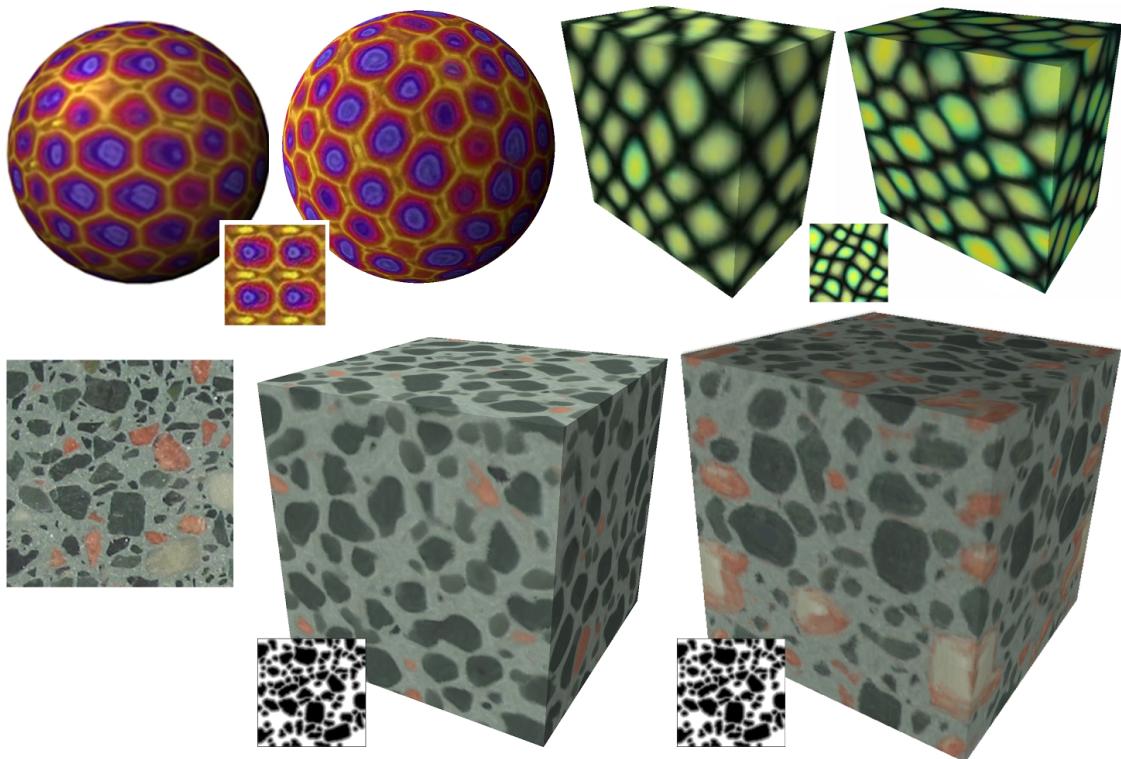


图 3.9 纹理合成结果与Kopf等^[14]方法产生的结果比较。其中每组比较，左图为Kopf等^[14]方法产生的结果，而右图为本章方法产生的结果



图 3.10 左图为在不同方向采用不同纹理输入，进行纹理合成的结果。右图为通过将某种颜色挖空，用来展示产生的体数据空间分布。

3.4.5 实时纹理合成

由于实体纹理具有三维的空间分布，因此，具有实体纹理的物体可以被任意的切开，其切面处的纹理会与其他纹理保持一致的连续性。我们的算法支持用户随意的切割物体，而新产生的表面纹理可以实时的进行纹理合成。图 3.11是实时合成的物体爆裂成碎片过程中的三个静帧。对应的实体纹理分辨率为 256^3 ，所需



图 3.11 表面纹理合成结果。第一行中的纹理分辨率为 1024^3 。第二行中展示了动态切割过程的几个中间帧

的存储空间为, 15.7MB。对于分辨率为 256^2 的新的切面, 纹理合成所需的时间是8 ms。

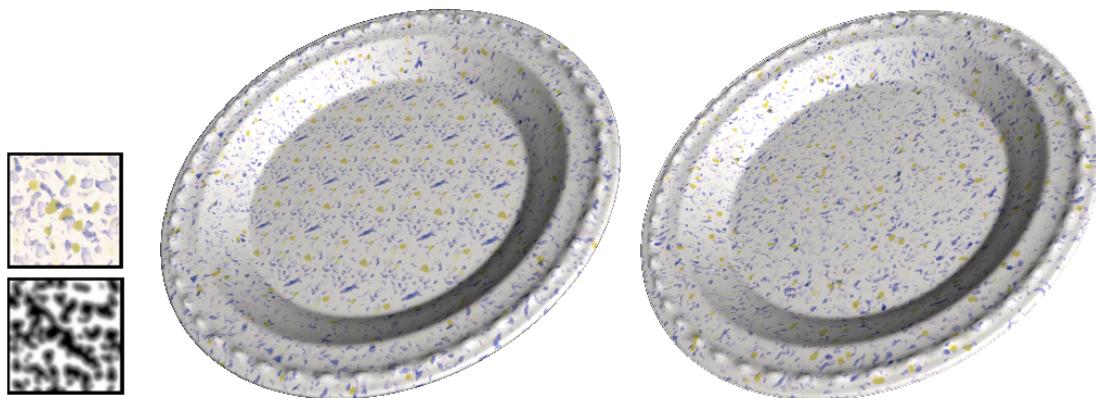


图 3.12 与平铺纹理比较。左图为平铺纹理, 具有明显不自然的重复花纹。右图为本文所产生的结果, 具有更好的真实感。

与纹理平铺进行比较

纹理平铺是一种将低分辨率的实体纹理多次重复的平铺在三维空间, 用以模拟高分辨率实体纹理的方法。我们在图 3.12 中比较了利用平铺的方法和本文方法合成的结果。由于平铺的方法会将同一个实体纹理多次重复使用, 因此会在结果

上体现出明显的规律性重复，并给人以一种不自然的感觉，相反，利用完整纹理合成的方法，我们的结果避免了规律性重复，获得了更加真实的结果。

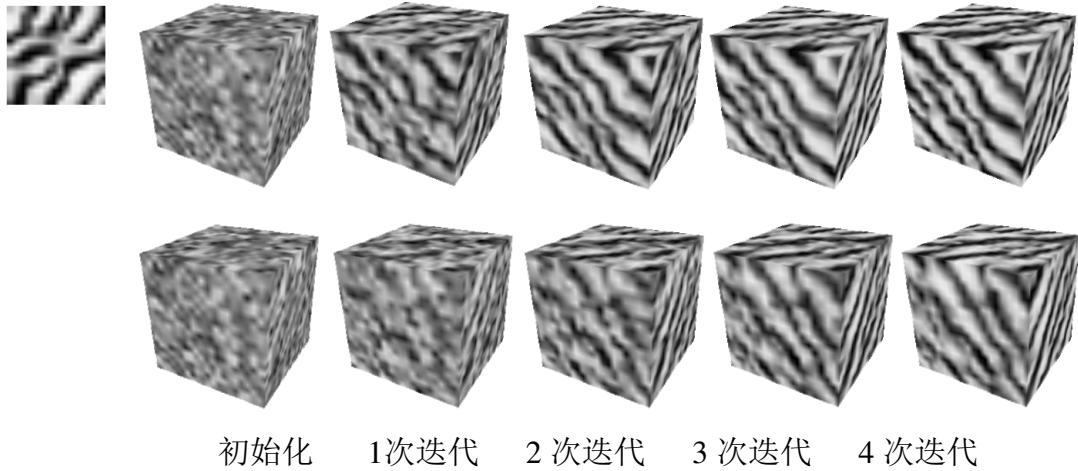


图 3.13 与传统纹理合成算法比较。第一行展示了本文提出的方法在纹理合成时每个迭代的中间结果。第二行展示了没有使用候选三元组的中间结果。结果表明，使用候选三元组能有效地减少迭代数目，而获得同样质量的结果。

关于候选三元组对于减少决定链的讨论

为了说明候选三元组能够有效地提高纹理合成的效率，并使得在表面上的实时纹理合成成为可能，我们在这里具体讨论候选三元组对于减少决定链所起的作用。抛开传统方法作为一个全局优化的模式无法进行并行计算不谈，这里仅仅考虑仅用传统的二维纹理合成的方法直接应用于实体纹理的三个方向，并进行实体纹理合成。经过我们的实验，这种方法对于一般的纹理，需要比候选三元组至少多两倍的迭代才能实现收敛（结果参考图3.13）。而仅仅两倍的迭代数目差异，对应于决定链的规模差异则非常明显。对于利用候选三元组方法，由于迭代次数少，对应于一个体素的决定链为6778个体素，而对于传统方法，则至少需要76812个体素，也就是11.3倍的差异。相对的计算量和存储量也就有11.3的差异。如果没有采用候选三元组，过长的决定链导致的计算量和存储空间，使得仅在表面上进行合成的思路失去了本来的意义。

3.5 小结与讨论

局限性讨论

与其他纹理合成的方法一样，本章所提出的纹理合成方法也存在一定的局限性，因此在这里首先对于纹理合成的局限性进行具体分析。如果输入的纹理在三个方向上 E_x, E_y, E_z 无法定义出一个具有相关性的三维体数据，导致其问题本身没有一个满足三个方向纹理性质的解，纹理合成的结果会产生如图 3.14(a)为例的不自然的结果。如何通过预算算，判断输入纹理是否有存在互相矛盾，能否产生一个一致的自然的三维实体纹理，将是一个值得研究的课题。

同样的，对于输入纹理的局部特征，如图 3.14(b)中红色的花纹为例，由于无法为其构造适当候选三元组，在纹理合成的过程中，这些局部特征将无法体现在结果的实体纹理中。

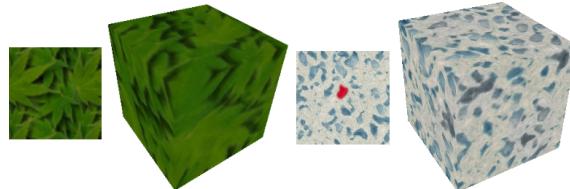


图 3.14 左图的例子中，输入纹理并不能定义一个实际有效的三维纹理，因此产生不自然的合成结果。右图中由于缺少适当的候选三元组，红色的特征没有体现在最终结果中。

结论

本文提出了一种在基于相关性的快速实体纹理合成算法，其产生的实体纹理具有三维空间的连续性，同时保持了二维输入纹理的纹理特征。该算法有效地将纹理合成的计算局限在仅用于渲染的体素周围，却同时保持了空间上的一致性，因此导致纹理合成的空间和时间复杂度仅与所需体素的数目有关。

本章的核心思想在于，通过预算算产生一组保证了纹理相关性的候选三元组，并在纹理合成的过程中应用这些候选三元组，以随时保证实体纹理的相关性，这一方法极大地减少了纹理合成过程中盲目搜索的范围，减少了纹理合成的迭代次数，并使得仅需在所需要的体素周围进行计算的快速实体纹理合成成为可能。该算法具有计算效率高，并行度高的特点，利用GPU加速，算法实现了在交互式切割物体表面时，实时地合成新产生表面处的实体纹理，这一特性在游戏，物理模拟等实时交互场合具有广泛应用。

第4章 基于流形的表面反射纹理材质快速建模

在第3章中所研究的问题，集中于通过纹理合成的方法获得在高维空间分布的纹理。对于真实世界中材料的复杂反射属性，往往需要通过同时定义在空间和角度域的SVBRDF^[1]来表达。由于其角度域分布与空间分布具有完全不同的性质，对于SVBRDF这类数据需要不同的方法来进行建模。

因此，本章提出一种基于流形的SVBRDF快速采集方法。其核心目标就在于，如何有效地利用SVBRDF所具有的相关性特性简化纹理材质采集过程。当前的一些研究方法，试图通过将BRDF限制为参数化模型，并利用离散采样重构SVBRDF^[49,50]。虽然这类方法尝试利用到空间上的相关性^[31,32,35]，然而，如Ngan等在论文中^[17]所证明的，这种简化为参数化模型的方法并不能完好的保持原始数据的真实感。另一方面，即使考虑到一定程度上的空间相关性，由于没有有效地利用到SVBRDF相关性中非线性的性质，当前的采集方法仍然需要大量的采样才能获得高分辨率的结果^[18,33,34,37]。

本章提出的算法基于SVBRDF流形模型，可以从少量稀疏的采样数据重构高分辨率的SVBRDF数据。其相关性模型体现为，对于某一个材质样本而言，其SVBRDF所构成的是一个定义在高维BRDF空间上的一个低维流形结构。SVBRDF流形在局部结构上体现显出低维线性的特性，但在全局尺度上却是体现为非线性的结构。因此，如Matusik在其论文^[51]中所证明的，在全局尺度上利用线性的方法重构出的BRDF将超出SVBRDF所构成的流形空间，并造成错误的BRDF。然而，如传统流形研究^[52]所指出的，在SVBRDF流形的局部邻域进行局部线性插值，可以很好地拟合流形本身结构并获得正确的重构结果。

根据SVBRDF流形的模型，采集过程被分为两个阶段：首先采集针对当前样本的SVBRDF流形结构、其次对于空间中每个像素 x 采集其在流形空间上的实际

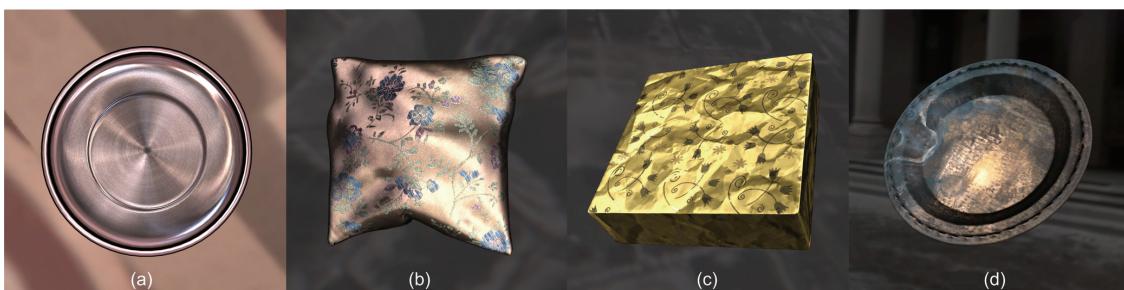


图 4.1 通过本方法重构的高质量SVBRDF渲染结果。(a)各向异性打磨过的金属盘,(b)针织品,(c)褶皱的闪亮包装纸,(d)生锈的铜盘。高质量的SVBRDF真实的重现了材质本身的各种细节。

位置。具体而言，第一个阶段在样本表面稀疏的采集具有完整角度分辨率的具有代表性的BRDF，并不需要采集每个BRDF具体对应的空间位置；在第二个阶段，根据固定视角及少量的不同光照条件，采集完整空间分辨率的样本反射信息，并对于每个像素 x 构成一个表征其反射性质的低维向量key。而后，根据SVBRDF的流形模型，对于每个像素 x 寻找其邻域内代表性BRDF所对应的key，并在这些邻域的代表性BRDF中进行局部线性插值，构成高分辨率的BRDF。对于这种重构方法，仅需要少量的key采样，就可以有效地保持SVBRDF的流形结构，并保证一个合理的重建结果。

本章提出的基于流形的SVBRDF重建，是一种简单快速地采集高分辨率SVBRDF的方法，该方法支持广泛类型的反射材质，包含各向同性或各向异性材质、漫反射或完全镜面反射材质以及光滑平面或凹凸表面等不同情况。通过将一个高维函数的采集过程划分为两个相对低维的采集阶段，该方法有效地减少了采集过程的复杂度。对于第一个阶段，将在第4.2.1.1节中介绍一种便携式BRDF测量仪。通过一组condenser透镜，这种测量仪可以在几分钟之内快速地测量上百个代表性BRDF。在第二个阶段，在一个固定的拍摄角度，拍摄非常少数目的key采样（20-200）即可获得高质量的重构结果。在第4.1.4节中介绍的非正交光源矫正，使得使用环境光源或面状光源成为可能，并且不需要对于光源做特殊或精确的控制，仅用手持光源随意移动即可完成采集。基于流形的SVBRDF重建是一种简易、便携且实用的采集高质量SVBRDF的方法。

4.1 SVBRDF流形模型及其重建方法

本节介绍SVBRDF流形的基本概念，以及基于流形的SVBRDF重建与采集的基本方法。具体的数据采集设备的设计、搭建，以及具体采集实现相关的问题将在下一节进行讨论。

4.1.1 具有代表性的BRDF及角度域Key采样

4.1.1.1 代表性BRDF

在第一个阶段，我们首先采集一组 M 个具有高角度分辨率的具有代表性的BRDF，其中每个BRDF可以被表示为：

$$B^* = \{b_p^*(\mathbf{o}, \mathbf{i}) \mid p = 1, 2, \dots, M\}. \quad (4-1)$$

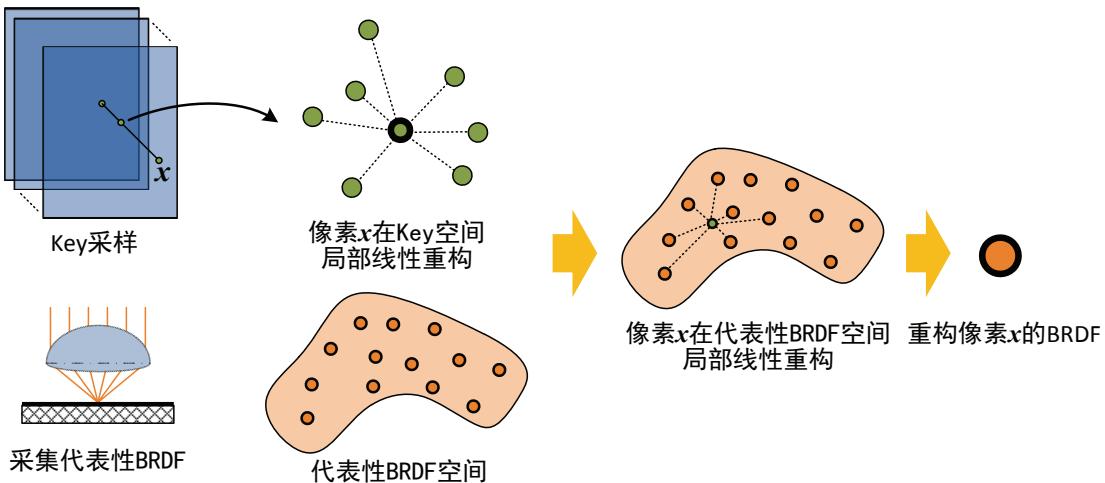


图 4.2 基于流形的SVBRDF重建的流程示意图。

为了表达BRDF丰富的角度域细节，每一个代表性BRDF对应于一个BRDF代表向量(representative vector) \mathbf{b}_p^* ，该向量包含了 N_o 个出射光角度以及 N_i 个入射光角度总计 $N_b = N_o \times N_i$ 个角度域采样。本文假设，从样本表面稀疏采集到的这样的一组具有代表性的BRDF，可以有效地表达SVBRDF流形的空间结构。

为了实现对SVBRDF流形进行一个均匀采样，在进行采样时，所有相互距离小于 ϵ 的采样点会被认为是重复的采样，并从代表性BRDF中移除。其中， ϵ ，被定义为当前所有采样之间最近距离平均值的10%

4.1.1.2 角度域Key采样

第二个采集阶段集中于采集一组低维度的角度域Key采样。这些Key采样包含了离散的角度域反射信息，同时，在空间域上是一个完整采样。我们将根据这些Key采样来分辨并重构空间域上每一个像素的BRDF，因此，这些Key采样对于BRDF的分辨能力将成为基于流形的SVBRDF重建的一个关键。

现有的一些研究^[18,23]表明，绝大多数自然界中的BRDF的特性可以完全由单一的一个具有固定出射光方向在不同入射光方向采样得到的二维的BRDF切片来表达。其中一个直观的解释是，基于微面元模型(microfacet model)^[19]的BRDF可以真实的表达大量真实世界的材质。而微面元BRDF模型的核心就是用一个二维的法向分布函数(normal distribution function : NDF) 来表达四维的BRDF数据。而NDF则可以通过半角向量(half-angle vectors) \mathbf{h} 在半球面上的采样获得。

$$\mathbf{h} = (\mathbf{o} + \mathbf{i}) / \|\mathbf{o} + \mathbf{i}\|. \quad (4-2)$$

其中，半角向量是指入射光方向和出射光方向之间构成的角度的角平分线方

向。由此，我们可以得到这样一个结论，即通过固定的出射光方向，也就是固定采集角度，是完全可以得到足以表达BRDF完整细节的信息的。我们将会在下一节的具体实现中介绍和讨论微面元模型，以及该模型在我们方法中的应用。

最后需要强调的是，虽然绝大多数自然界的BRDF可以用微面元模型来表达，并不意味着其他参数化的BRDF模型具有同样多的信息来有效地表达BRDF的细节。真实世界的材质具有复杂的反射特性，需要一个基于离散化采样表达的BRDF模型，或多参数的复杂数学模型才能有效地完整表达。这一观点已经在大量的相关工作中^[17,18]得到了详细地分析和证明。

通过前面分析，我们已经确定可以通过固定的采集角度就可以完成SVBRDF流形的Key采集。这里，我们讨论如何选择具体的采集角度 \mathbf{o}^* 。在实际采集过程中，我们选择从样本正上方偏离 45° 作为固定的采集角度，当这个角度选择过大时，相机的采集到的图像将有过大的畸变，以至于修正畸变过程中会损失大量的空间分辨率，而当这个角度过小时，相机本身的阴影将会对采集环境造成一定的影响，因而我们选择 45° 左右这一角度作为折衷。

具体而言，我们通过固定采集角度 \mathbf{o}^* 处的相机，采集材料样本在不同光照条件下的 N 张照片来实现Key采集过程。在采集样本的同时，我们也获取对应的环境光照的入射光场 L_j ，其中 j 用来索引采集到的每张照片。这样，在照片上样本的每个像素 \mathbf{x}_j ，就对应着该点位置的BRDF $b_x(\mathbf{i}, \mathbf{o})$ 在当前环境光照 L_j 下的一个积分：

$$\mathbf{r}_j(\mathbf{x}) = \int_{\Omega_+(\mathbf{n})} b_x(\mathbf{i}, \mathbf{o}^*) (\mathbf{n} \cdot \mathbf{i}) L_j(\mathbf{i}) d\mathbf{i}, \quad (4-3)$$

其中 \mathbf{n} 是材质表面的法向方向， \mathbf{o}^* 代表采集方向，而 L_j 则是对应与第 j 个Key采样的环境光照情况。

随后，将对应于位置 \mathbf{x} 所有的 N 个材质反射采样集合到一起，就可以得到一个 N 维的key向量：

$$\mathbf{r}_x = (r_1(\mathbf{x}), r_2(\mathbf{x}), \dots, r_N(\mathbf{x}))^T, \quad (4-4)$$

根据公式，环境光照在材质表面的反射积分可以被写成如下的矩阵形式：

$$\mathbf{r}_x = \mathbf{R} \mathbf{b}_x, \quad (4-5)$$

其中，在位置 \mathbf{x} 处的BRDF可以用 \mathbf{b}_x 来表示。而采集过程中得到的环境光照信息构成了一个 $N \times N_b$ 的key采样矩阵(key measurement matrix) \mathbf{R} ，该矩阵将采集到

的BRDF转化成对应的key采样。

$$\mathbf{R}_{jk} = \begin{cases} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{i}_{k_i}) L_j(\mathbf{i}_{k_i}), & \mathbf{o}_{k_o} = \mathbf{o}^* \\ 0, & \mathbf{o}_{k_o} \neq \mathbf{o}^* \end{cases} \quad (4-6)$$

这里，统一的BRDF索引 k 被分离成 k_o 和 k_i ，用来分别索引对应于 BRDF向量 \mathbf{b}_x 的入射光与出射光方向。具体可以表述成， $k = k_o N_i + k_i$ 。

由于本文提出的采样方法仅仅基于单一采集角度 \mathbf{o}^* ，其他角度上的反射响应总为0。因此 \mathbf{R} 的维度不是完整的 $N \times N_b$ ，而是 $N \times N_i$ 。

基于之前两个采集阶段得到的样本信息，基于SVBRDF流形重建的方法将结合两个阶段分别获得的：具有完整角度分辨率的代表性BRDF；以及具有完整空间分辨率的Key采样，重建高质量的SVBRDF。图 4.2中用示意图的形式展示了SVBRDF流形重建的基本步骤。

4.1.2 局部线性空间BRDF重建

Matusik等在其研究中^[51] 已经证明，对于各项同性的BRDF而言，在相关性较低、欧氏距离较远的BRDF之间进行线性插值将得到错误的结果，并导致渲染中出现瑕疵。如图 4.10所示，实验表明，在各向异性的BRDF中，这种错误地线性插值造成的结果造成的瑕疵将变得更加严重。为了解决这一问题，利用SVBRDF中的非线性相关性，基于流形的SVBRDF重建的方法在BRDF的邻域内进行局部线性插值，在插值过程中，只有目标临近的代表性BRDF才会参与插值。在本文中，将假设SVBRDF流形在各处的维度都是固定一致的。

具体而言，本文认为在空间位置 x 的某个BRDF \mathbf{b}_x 可以通过其周围临近的 k 个代表性BRDF进行一个局部线性插值表达：

$$\mathbf{b}_x \approx \sum_{p \in \delta(\mathbf{b}_x)} w_p \mathbf{b}_p^*, \quad \sum_{p \in \delta(\mathbf{b}_x)} w_p = 1, \quad (4-7)$$

而这些临近的代表性BRDF就被称之为代表性BRDF邻域(representative neighborhood)

$$\mathbf{b}_p^*, p \in \delta(\mathbf{b}_x), k = |\delta(\mathbf{b}_x)| \quad (4-8)$$

由于BRDF邻域是通过BRDF空间上的 l^2 距离来度量，而不是通过其空间位置上与 x 的距离度量。因此，该度量方法描述了SVBRDF流形上的相关性，而不是空间

上的临近相关性，并可以保持局部线性插值得到的BRDF满足SVBRDF流形的特性，并符合真实世界中BRDF的一般属性。

代表性BRDF投影

将公式4-5代入公式4-7，就可以得到在key空间上的线性插值，以及对应的插值系数 w_p ：

$$\mathbf{r}_x = \sum_{p \in \delta(\mathbf{r}_x)} w_p \mathbf{r}_p^*, \quad \sum_{p \in \delta(\mathbf{r}_x)} w_p = 1 \quad (4-9)$$

其中

$$\mathbf{r}_p^* = \mathbf{R} \mathbf{b}_p^*. \quad (4-10)$$

公式4-10通过将第二个阶段采集到的环境光照应用到第一个阶段采集到的代表性BRDF对应于采集角度 \mathbf{o}^* 的一个切片上，把完整的 N_b 维代表性BRDF \mathbf{b}_p^* 投影成为一个 N 维的匹配向量(matching vector) \mathbf{r}_p^* 。进而实现了从代表性BRDF到Key采样空间的一个投影。其中，公式4-7和公式4-5保证了在第二个阶段中采集到的key向量 \mathbf{r}_x 可以被表达为其周围邻域内的匹配向量 $\mathbf{r}_p^*, p \in \delta(\mathbf{r}_x)$ 的一个局部线性插值。

由于重建过程中并没有对于 x 位置处的完整BRDF向量 \mathbf{b}_x 信息，而只有通过第二阶段采集到的Key采样数据 \mathbf{r}_x 。因此，重建方法需要Key采样能够基本保持BRDF之间的距离关系，这样才能保证在Key采样空间的邻域与在BRDF空间的邻域具有一定的相似性。而这就对Key采样的数量有一定的要求，因此我们需要分析SVBRDF流形的性质来决定所需Key采样的数目。

4.1.3 估测BRDF邻域的空间维度

为了选择适当的邻域范围 k ，这里要对SVBRDF流形进行分析，并根据其本质维度来决定 k 的选择。对SVBRDF流形进行分析时，因为当前只有代表性BRDF具有完整角度域采样，保持了BRDF全部的信息，因此这个分析就在代表性BRDF之间进行。分析的基本方法是，以某一个代表性BRDF为中心，不断增加邻域的范围以增加邻域内的代表性BRDF，而后利用奇异值分解（singular value decomposition）的方法来评估当前邻域范围的维度。

具体而言，首先需要从SVD所得到的奇异值中去除能量过小的部分，仅保留超过95%总能量的奇异值作为有效计数。这个所剩下的奇异值数目就可以作为当前局部邻域维度的一个估计。随着邻域范围的增长，最初，由于每增加一个新的临近代表性BRDF都会增加一个新的本质维度，其构成的空间维度的增长速度很

快。然而，随着数目增长逐渐达到一定数目，增加新的邻居BRDF将不会对空间的维度产生太大影响。这也就意味着当前的局部线性空间维度达到了一个相对稳定的状态，因此，我们做出一个推断，当邻居数目 k 超过两倍于局部维度估计时，我们认为当前得到的局部维度估计就是当前中心点的局部线性空间维度。

而后，根据对于空间中随机选择的多个代表性BRDF进行同样的实验，估测其局部维度，并取得随机实验结果的平均值作为当前样本的SVBRDF流形的局部线性空间的维度。

4.1.4 正交化采样缩放

由于采用自然的环境光照作为key采样的输入，很多光源之间存在很高的相关性，因而造成对应的key采样矩阵是一个非正交的矩阵。因此，这个非正交矩阵所对应的投影会造成在原始SVBRDF空间的球形邻域在key空间的对应是一个椭球邻域，这会大大增加邻域的计算复杂度，同时也会使得邻域的线性插值出现偏差。因此，这里提出一种基于奇异值分解（singular value decomposition）方法的正交化矫正手段。首先，通过对矩阵 \mathbf{R} 进行SVD分解可以得到：

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}_R \Lambda_R \mathbf{V}_R \quad (4-11)$$

其中 \mathbf{U}_R 包含左半部分的特征向量，是一个 $N \times N$ 的正交矩阵，而 Λ_R 是一个 $N \times N$ 的以奇异值为对角线元素的对角阵，最后， \mathbf{V}_R 包含右半部分的特征向量，是一个 $N \times N_b$ 的正交矩阵。

为了去除非正交投影导致的空间畸变，我们利用SVD（公式4-11）来获得校准后的key向量。

$$\hat{\mathbf{r}}_x = \Lambda_R^{-1} \mathbf{U}_R^T \mathbf{r}_x. \quad (4-12)$$

同样的，我们对由代表性BRDF投影所产生的匹配向量同样进行校准，得到校准后的匹配向量（uniform matching vector） $\hat{\mathbf{r}}_p^*$ ：

$$\hat{\mathbf{r}}_p^* = \mathbf{V}_R \mathbf{b}_p^*. \quad (4-13)$$

通过正交化采样缩放，在key空间利用邻域距离计算得到的局部邻域与SVBRDF流形空间上的邻域就构成线性正交的对应，并可以直接通过key空间距离阀值找到适当的局部邻域。最终通过在这个邻域上，得到 $\hat{\mathbf{r}}_p^*$ 对 $\hat{\mathbf{r}}_x$ 的一个局部线性插值。

4.1.5 局部邻域选择

对key向量和匹配向量进行正交化采样缩放之后，通过对任意位置 \mathbf{x} 上校准后的key向量 $\hat{\mathbf{r}}_x$ 寻找最邻近的 k 个校准后的匹配向量 $\hat{\mathbf{r}}_p^*$ ，来构成对应于该位置的一个代表性邻域 δ 。

在具体实现中，我们采用了approximated nearest neighbor (ANN) 搜索^[53] 的方式来加速寻找 k 个最近邻的过程。同时，如果有些近邻的距离超过5倍于其他近邻距离中心的平均距离，这些近邻就会被认为是一个例外的样本，而被单独去除。

4.1.6 局部邻域上的线性重建

根据已经得到的局部邻域，可以利用^[52]的方法来获得对应的线性插值权重 w_p ，

$$w_p = \sum_{q \in \delta(\mathbf{r}_x)} \mathbf{C}_{pq}^{-1} (\hat{\mathbf{r}}_x \cdot \hat{\mathbf{r}}_q^* + \lambda), \quad (4-14)$$

$$\lambda = \frac{1 - \sum_{p,q \in \delta(\mathbf{r}_x)} \mathbf{C}_{pq}^{-1} (\hat{\mathbf{r}}_x \cdot \hat{\mathbf{r}}_q^*)}{\sum_{p,q \in \delta(\mathbf{r}_x)} \mathbf{C}_{pq}^{-1}}. \quad (4-15)$$

其中， $\mathbf{C}_{pq} = \hat{\mathbf{r}}_p^* \cdot \hat{\mathbf{r}}_q^*$ 是邻域的协方差矩阵（covariance matrix）而 \mathbf{C}^{-1} 代表它的逆矩阵。由于邻域范围与估算的流形的维度接近，因此获得的协方差矩阵是可逆的。在进行数值计算时，我们利用SVD分解来进一步增强求逆的数值稳定性。对 \mathbf{C} 进行SVD分解后，将接近0的奇异值去掉，而后计算矩阵的逆。虽然这里的线性插值公式并不保证所有的 w_p 都是正数，但是在实践中，由于我们采集的代表性BRDF足够涵盖整个SVBRDF流形，因此，在实际计算中不会出现 w_p 是负值的外插情况。

4.1.7 代表性BRDF的人工合成与扩展

通过在法向方向上对BRDF进行旋转，可以对BRDF的法向方向变化进行模拟。通过计算生成具有不同法向方向的BRDF作为扩展后的代表性BRDF集合，本文的方法可以用来处理由于表面凹凸不平造成的效果。在进行计算生成扩展的BRDF集合时，对于不同的法向方向，需要在水平角度上进行120个均匀采样，而在垂直的角度上，对 0° 到 75° 之间进行30个均匀采样。这样总计有3600个不同的法向方向得到了采样。而后，可以采用完全相同的基于SVBRDF流形的重构方法，来处理具有凹凸不平特征的样本表面。值得注意的一点是，当进行完扩展计算后，仍然需要根据第 4.1.1.1 节介绍的方法，再次检测

并去除重复的代表性BRDF，从而保证得到的代表性BRDF是在流形上的一个均匀采样。

对于各向异性的BRDF，可以对其各向异性的主方向，也就是Tangent方向变化进行模拟。在沿着与法向方向垂直的角度进行旋转，可以计算生成具有不同Tangent方向的各向异性BRDF。在进行计算生成扩展的BRDF集合时，对应于不同的Tangent方向，需要在旋转角度上平均的进行360个角度采样，并构成扩展后的BRDF集合。

当采样方向决定后，可以得到一个 3×3 的旋转矩阵 \mathcal{R} ，利用这个旋转矩阵，可以根据下式计算出旋转后的BRDF $b'(\mathbf{i}, \mathbf{o})$

$$b'(\mathbf{i}, \mathbf{o}) = b(\mathcal{R}^T \mathbf{i}, \mathcal{R}^T \mathbf{o}). \quad (4-16)$$

为了计算由于法向变化造成的BRDF旋转，代表性BRDF需要定义在一个完整的球空间上，而不是一般情况下的上半球空间。在旋转之前，下半球的BRDF数值始终设为0。在本文的具体实现中，代表性BRDF是通过微面元模型进行采集的，因此我们可以直接通过微面元模型计算出一个完整球空间上的BRDF。更多的细节可以参考第 4.2.1 节的介绍。

4.1.8 Key采样的完备性验证

为了能够正确的进行局部线性重建，Key采样需要有足够的信息用来分辨不同的BRDF。具体而言，这种分辨力体现在如下两个方面：第一，需要保证在Key采样空间中的临近代表性BRDF $\delta(\mathbf{r}_x)$ ，在对应的SVBRDF流形空间上同样也是近邻 $\delta(\mathbf{b}_x)$ ，这样在SVBRDF空间上距离远的BRDF将不会被用于插值。第二，SVBRDF流形上的局部邻域内，代表性BRDF之间的相对距离需要在对应的Key采样空间得到保证。只有这样才能保证在Key采样空间进行的局部线性插值，可以无畸变地应用到代表性BRDF上。根据这一分析，就可以提出一种衡量Key采样完备性的方法，即考察Key采样空间是否保持了原有SVBRDF的全局和局部范围尺度上的距离。

不失一般性，这里首先定义，对于给定的邻域半径 r ，以及给定的局部邻域 $\delta(p, r) = \{q \mid \|\mathbf{b}_p^* - \mathbf{b}_q^*\| < r\}$ 上的距离保持性 τ ：

$$\tau(p, r) = \frac{\sum_{i, j \in \delta(p, r)} \|\hat{\mathbf{r}}_i^* - \hat{\mathbf{r}}_j^*\|}{\sum_{i, j \in \delta(p, r)} \|\mathbf{b}_i^* - \mathbf{b}_j^*\|}. \quad (4-17)$$

由于之前进行过正交化采样缩放，因此，两个空间之间的距离有如下的关系

$$0 \leq \|\hat{\mathbf{r}}_i^* - \hat{\mathbf{r}}_j^*\| \leq \|\mathbf{b}_i^* - \mathbf{b}_j^*\| \quad (4-18)$$

因此， τ 越接近1，就说明key采样更好的维持了在邻域半径为 r 的意义下，在 $\delta(p, r)$ 处两个空间之间之间的距离。

基于这一距离保持性计算方法，对应于邻域半径 r ，全局平均的距离保持性可以通过下式计算：

$$\bar{\tau}(r) = 1/M \sum_{p=1}^M \tau(\delta(p, r)). \quad (4-19)$$

最后，根据以上推导，考虑到所有代表性BRDF之间的距离，可以定义全局距离保持性（global distance preservation）为：

$$\tau_g = \bar{\tau}(\infty) \quad (4-20)$$

同时，局部距离保持性（local distance preservation）可以定义为：

$$\tau_l = \bar{\tau}(\bar{r}) \quad (4-21)$$

其中 \bar{r} 是所有代表性BRDF之间的平均局部邻域半径。局部邻域半径的具体定义为BRDF的第 k 个近邻到该BRDF的距离。

4.2 数据采集

为了重建给定平板材料样本的SVBRDF，需要对两个阶段分别进行数据采集。本文设计和使用的采集设备简单轻便，适用于快速现场采集。通过便携式BRDF测量仪可以快速采集单个位置上的BRDF，通过普通的环境光照以及一个手持的简便光源可以快速地进行Key采样，这样的设备设计可以实现在外景现场没有专用暗室的情况下快速数据采集。在实际操作中，本文进行实验采集的样本尺寸在10cm×10cm左右。

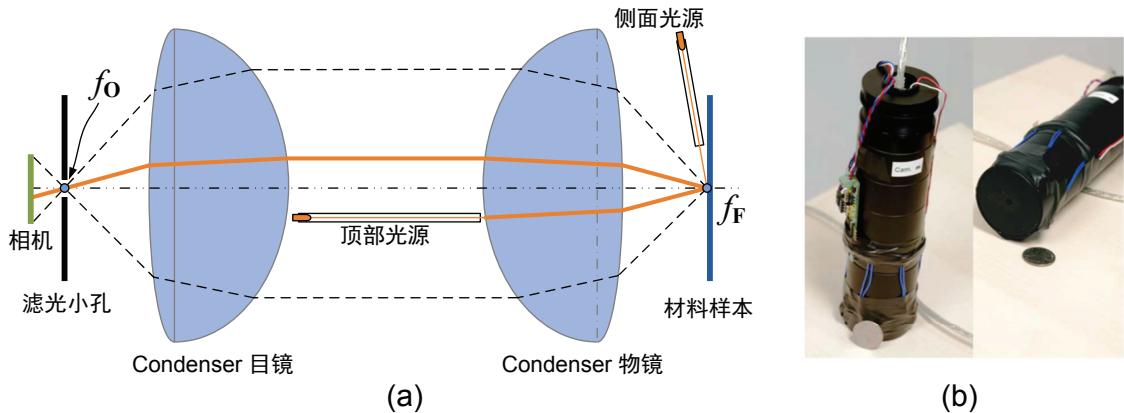


图 4.3 便携式BRDF测量仪: (a) 光路图, (b) 组装完成的测量仪

4.2.1 采集代表性BRDF

为了快速采集在空间中某一点上，对于不同入射和出射方向的光线反射率，本文设计了一种便携式BRDF测量仪。这种BRDF测量仪利用一个固定位置的相机采集来自 $n_l = 6$ 个固定位置的光源的光线在材料样本上的反射。根据采集到的反射数据，重构一个具有高分辨率的微面元BRDF^[20]。为了均匀地在样本构成的SVBRDF上进行均匀完整采样，需要对单一样本空间上不同的位置进行几百次随机的BRDF测量。

4.2.1.1 BRDF测量仪的设计

图 4.3 展示了本文提出的BRDF测量仪的基本设计图。该设计的主要光学系统是两片Anchor Optics 47mm condenser 聚焦镜片，聚焦镜片的焦距是21mm，数据采集通过一台Point Grey Research公司生产的Firefly^(R)MV 相机进行，光源来自于6支装载于碳纤维支架上的高光强发光二极管，其他组成配件包含一枚200 μm 滤光小孔，以及装载用套筒等。

6支发光二极管的具体安放位置是，其中一支安放于两片聚焦镜片之间，并从主光轴10度左右的位置照射材料样本表面。其他5支发光二极管安放于物镜与材料样本表面之间，与材质表面呈20度左右的夹角。

待测量的样本被置于物镜的焦点处 f_F ，滤光小孔安装在目镜的焦点处 f_0 用于滤除杂光，因而只有从光源直接照射向样本表面的反射光能通过光学系统并穿过小孔，最终被相机采集到，相机采集到的数据通过IEEE1394接口直接传输到笔记本电脑进行数据处理。所有组成零件装载在一个直径50mm的套筒上以保持光学系统处于设计规定的位置。根据设计，光学系统可以涵盖48°范围内从材质表面反射的光线，结合来自6支发光二极管获得的数据，就可以采集到完整的材料表

面反射属性。

4.2.1.2 光学系统校准

通过外装套筒，可以保证光学镜片的主光轴相互对齐，主光轴通过滤光小孔，相机位于主光轴上。镜片及其他设备的纵向位置通过套筒上的装配位置进行精确控制和对齐。顶部的发光二极管用丙烯塑料支架安置到适当位置，并利用放置在物镜焦点处的镜面进行校准。侧边的5支发光二极管用碳纤维管支架固定在设计位置上，并通过套筒进行配准。对相机的颜色进行校准，需要利用标准颜色卡配合LED光源进行。通过Anchor Optics给出的镜片设计参数进行计算，可以实现对光学系统中的成像变形进行纠正，并最终计算出相机在每个像素上所对应的出射光方向。

4.2.1.3 采集过程

最终组装完成的BRDF测量仪是一个高150mm，直径50mm的圆柱形设备，总重约500g。在进行测量时，须将测量仪放置于材料表面，并缓缓移动到不同的位置，对不同空间位置的BRDF进行采集。对应于每一个位置，测量仪会采集对应于6支发光二极管分别照射时候的反射图像，为了涵盖更高的动态范围，对应于每支发光二极管，利用不同曝光设置采集两张照片。采集用相机可以以135Hz的速度采集分辨率为 320×240 的动态图片，因此采集一个BRDF的时间约为0.1秒。

在后处理中，不同曝光的照片通过Debevec^[54]提供的方法拼合成一张高动态范围图片(High Dynamic Range Image)。对数据进行裁剪后，产生的6张 240×240 HDR图像最终用于计算生成高分辨率的微面元BRDF。具体的拼接范围可以参考图4.4所示的例子。

安装于两片镜片之间的发光二极管会阻挡周围3mm区域的光线，并因此遮挡掉一部分数据。由于顶部发光二极管是从一个偏斜的角度射向样本，因此镜面反射方向上的主要反射光线不会被遮挡住。为了测量这个遮挡范围，我们在进行颜色校准的同时，对这个遮挡范围进行测量，并计算出对应的无效数据区域。当这个无效数据区域只包含有低频数据时，可以简单的利用调谐插值(harmonic interpolation)^[55]来填充无效区域的数据，而不产生错误的结果。而当这个无效区域包含高频成份时，简单插值将造成错误的结果，这种问题可以通过旋转测量仪来避免。因此，采集过程中算法会计算无效区域边缘像素的变化，如果无效区域边缘的像素最大值与最小值之间相差超过2倍，算法就会判明这个区域可能包含高频成分，并抛弃掉这个采样。

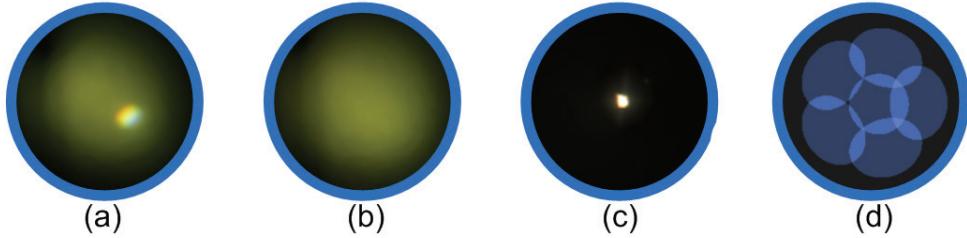


图 4.4 NDF重建: (a) 从相机采集到的对应于顶部光源的BRDF切片, (b) 对应于侧面光源的BRDF切片, (c) 重构的NDF, (d) 采集到的数据所覆盖的NDF范围, 6个光源能够覆盖到NDF的绝大部分保持有材料反射特性的范围。

将6张HDR图片中的反射光强除以对应的入射方向余弦项(cosine factor)就得到了样本在对应入射方向和反射方向的反射比率:

$$\rho(\mathbf{o}(\mathbf{u}), \mathbf{i}_l) = \frac{G_l(\mathbf{u})}{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{i}_l) L_l} \quad (4-22)$$

其中 \mathbf{u} 是对于出射角度 $\mathbf{o}(\mathbf{u})$ 的一个像素, \mathbf{i}_l 和 L_l 对应于第 l 支发光二极管的角度以及亮度。以上数据都可以通过光学系统校准中的测量过程得到。

数据采集软件支持两种采集模式, 连续采集模式和定点采集模式。在连续采集模式中, 用户可以以约1mm/s的速度在样本表面缓慢的移动BRDF测量仪, 软件会自动采集所有经过的位置, 并重构BRDF。对于具有明显材料边界的样本, 或具有过多材质细节的样本, 需要将软件转换到定点采集模式, 用户将BRDF测量仪放置到某个位置, 而后控制软件确认采集当前点的BRDF, 随后再移动BRDF测量仪到其他位置。

4.2.1.4 BRDF数据重建

从采集到的数据进行4维BRDF重建时, 首先需要把数据分离成漫反射部分(diffuse components)与高光反射(specular components)部分。其中, 漫反射部分 ρ_d 可以通过在所有的数据采样中寻找最小的反射比率来获得。

$$\rho_d = \frac{\sum_l \min_u \{\rho(\mathbf{o}(\mathbf{u}), \mathbf{i}_l)\}}{n_l}. \quad (4-23)$$

其中, ρ 来自于公式4-22。

从采集到的数据中, 减掉漫反射部分, 就得到了高光反射部分:

$$\rho_s(\mathbf{o}(\mathbf{u}), \mathbf{i}_l) = \rho(\mathbf{o}(\mathbf{u}), \mathbf{i}_l) - \rho_d. \quad (4-24)$$

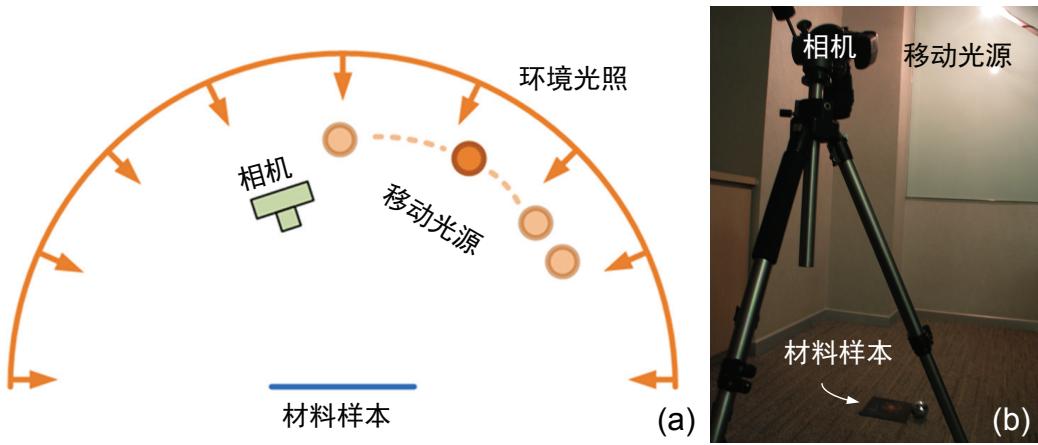


图 4.5 Key 采样过程: (a) 示意图, (b) 实际采集时的照片.

之后, 这部分高光反射的数据可以通过微面元BRDF模型^[20]来表达。

$$\rho_s(\mathbf{o}, \mathbf{i}) = c_s \frac{D(\mathbf{h}) S(\mathbf{i}) S(\mathbf{o}) F_r(\mathbf{o}, \mathbf{i})}{\pi (\mathbf{i} \cdot \mathbf{n})(\mathbf{o} \cdot \mathbf{n})}, \quad (4-25)$$

微面元BRDF模型由五个部分组成, 他们分别是定义在半角向量(4-2)域的微面元法向方向分布函数 (Microfacet Normal Distribution Function : NDF) D , 对应的阴影遮挡项 (Shadowing Factor) S , 菲涅尔反射项 (Fresnel Reflection Factor) F_r , 以及高光反射系数 (Specular Coefficient), c_s 。

在这里, 本文认为样本表面的法向方向是朝向正上方z轴方向的, 也就是 $\mathbf{n} = \mathbf{z} = (0, 0, 1)$ 。已有的相关工作中^[18,20,49]已经表明, NDF项 D 是主要包含有BRDF反射特性细节的部分, 因此我们利用离散化采样的方法完整存储 D 对应的数据。其中, 我们将 D 所在的半球面进行参数化^[56]投影到平面上, 并根据参数化进行均匀采样与存储。

根据Ngan等在论文^[17]提出的方法, 可以从采集到高光反射部分 ρ_s 计算出对应的微面元BRDF模型。在本文处理的情况下, 出射方向具有密集采样, 而入射方向具有离散采样。因此, 通过对 n_l 个不同光照方向得到的高光反射项进行处理, 可以得到对应的 n_l 个NDF的局部区域 (Partial NDF), 并最终拼合成一个完整的NDF。在本文中, 重构的NDF通过半球面参数化^[56]采样, 存储于一个400×400的平面图像中。整个重构过程可以参考图示 4.4中的一个流程例子。

4.2.2 Key采样

如图 4.5所示, N 个不同光照条件下, 固定视角拍摄的一组样本照片构成了样本的Key采样。进行Key采样时, 光照环境包含了环境光源, 手持的面状光源,

以及光源在周围环境中的反射等等。图4.6中展示了几个在本文中用到的环境光源情景。数据采集时，用户手持主动光源，在样本1.5m以外的位置随意地移动，创造不同的环境光照情况。在移动过程中，光源需要尽量移动到不同的角落，因而保证不会丢失样本的反射性质的细节。然而，整个采集过程中，并不需要用户对光源进行精确的控制。

在本文的实现中，光照环境通过一个镜面钢球进行采集，而包含样本在内的整个场景通过一台放置在2m以外装配有EF-100 2.8镜头的Canon 30D相机进行拍摄。相机拍摄到的图像分辨率为 3504×2336 。

作为采集的准备工作，需要对相机的位置和光学系统进行校准，校准过程可以采用Zhang^[57]提出的方法进行。对于每改变一次光照情况，需要拍摄多张不同曝光情况的照片，并通过Debevec^[54]提出的方法重建成为一张HDR图像。

Key采样过程最终会获得 N 张图像，其中每个像素 $r_j(\mathbf{x})$ 对应于在 \mathbf{x} 位置，第 j 个光照条件下的样本反射信息。同时获得的数据还包括对应于每张图像的环境光照情况 $L_j(\mathbf{i})$ ，其中 $j \in 1, 2, \dots, N$ 。由于环境光照和主动光源都在相对于样本很远的地方，因此本文认为环境光照情况在样本表面的不同位置是完全一样的。同样的，对于样本的不同位置也认为其出射方向 \mathbf{o}^* 一致，以按照样本中心像素 \mathbf{x} 计算得到的方向为准。

4.2.2.1 Key采样维度分析

在前文中已经进行过分析，SVBRDF流形重建的方法需要足够的Key采样才能实现。因此，在这里对Key采样数目进行一个具体的分析。分析过程基于的数据是用一个移动的小面积光源获得的100个不同光照条件的样本图片，每次随机选取 N 张图片作为Key采样输入。作为参考的1200个BRDF从样本表面随机采集获得，分析基于的样本照片参见图 4.11b所示。

所有的随机选取实验，都进行了10次不同的随机测试，并取平均值作为结果。图 4.7中的曲线体现了随着 N 的增长全局和局部距离保持性的变化过程。在我们的实验过程中，当 $\tau_g > 0.9$ 且 $\tau_l > 0.85$ 时，SVBRDF流形重建就可以得到一



图 4.6 实际用于采集key采样时的环境光照, L_j , 这里采用cubemap来表示半球面上的光照情况

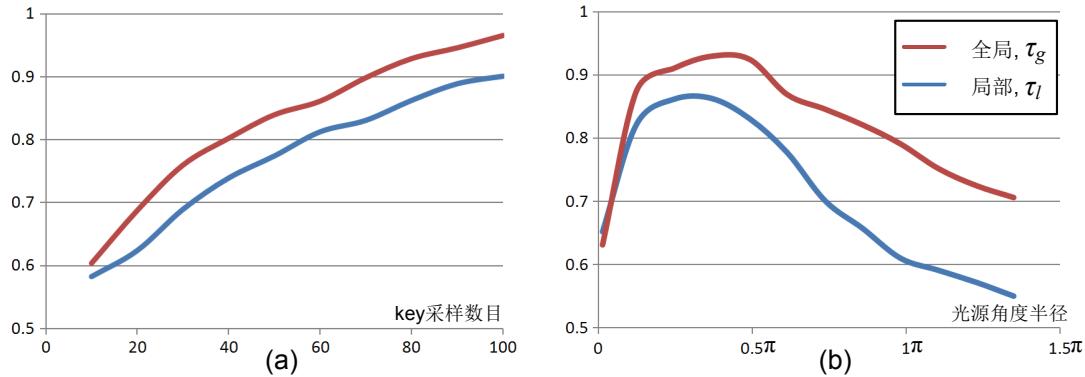


图 4.7 从key空间到代表性BRDF空间的距离保持性 (a) 随着采样数目增长变化。 (b) 随着光源尺寸增长变化。其中，光源尺寸用其覆盖的角度来衡量。实验基于的样本参考图 4.11b。其中距离保持性根据公式4-20与 4-21 计算

个很好的结果。根据这一结论，当完成第一阶段采样后，可以选择一部分代表性BRDF对其进行这样的分析，就可以得到第二阶段需要采集的光照数目 N 的一个估算，并对第二阶段的采集有一定指导意义。

4.2.2.2 光源尺寸对Key采样的影响

除了采样数目外，光源的尺寸也会影响到Key采样的效率，这里将分析光源尺寸对于Key采样的影响。该实验分析基于的样本照片参见图 4.11b，该样本包含了不同的类型的反射特性，适宜作为一个实验分析的标准。实验过程利用计算机模拟生成的不同尺寸圆形的光源作为输入，利用采集到的1200个BRDF计算出对应于这些光源的反射，并分析不同光源尺寸对距离保持性的影响。图 4.7b中的曲线表示了在同样采样数目的条件下，随着光源尺寸增长，距离保持性的变化。

对该结果的一个直观解释是，面积较小的光源具有更高的独立性，不同的光源位置不会造成重叠。但是，较小的光源难以完整覆盖整个入射光方向的半球面，因此，没有被覆盖到的部分可能会导致SVBRDF流形在这些方向上坍缩成一点。而相对的，过于大的光源独立性差，重叠位置的光源减少了分辨力，因此，过大的光源同样不具有很好的采样效率。根据实验分析结果，本文认为覆盖角度面积在 0.4π 左右，中间尺度大小的面状光源可以最好的协调独立性与覆盖效果，具有最好的保持距离的特性。

4.3 实验结果

本章节将列举基于流型的SVBRDF重建方法的实验结果。实验使用的计算

材料样本	Key采样		代表性BRDF		
	分辨率	# (N)	# (M)	τ_g/τ_l	k
包装纸(图 4.11b)	1000×1000	50	30	0.90/0.87	10
褶皱的包装纸(图 4.12b)	1000×600	200	30 †	0.90/0.83	13
生锈的铜(图 4.11a)	2000×2000	80	1200	0.93/0.85	21
抛光金属盘(图 4.12a)	2000×2000	200	10 §	0.99/0.85	15
针织品(图 4.11c)	2000×2000	90	30	0.99/0.85	15
褶皱的针织品(图 4.12c)	1500×1500	200	30 †§	0.91/0.85	19

表 4.1 实际采集反射纹理样本的数据统计。其中 M 是BRDF扩展之前的代表性BRDF数量。标识 † 代表该样本采用法向方向的BRDF扩展，标识 § 则代表采用tangent方向的BRDF扩展。

机平台是一台装有Intel CoreTM2 Duo 2.13G 处理器和2G内存的工作站。包含准备材料，搭设相机以及光源等设备的时间在内，采集代表性BRDF以及进行Key采样总计需要10-20分钟。随后的数据处理时间小于10分钟。在数据采集和处理中所具体涉及到的参数详见表 4.1。采集到的NDF分辨率达到了400×400，其对应的4维BRDF数据的入射与出射角度组合在一起其采样基本将达到千万。而在空间分辨率上，采集到的样本像素规模在百万量级。

4.3.1 重构方法的实验验证

4.3.1.1 在完整采样的SVBRDF数据集上进行验证

为了验证本文提出的基于流形的SVBRDF重建方法能够正确的重建自然界中的纹理信息，这里首先在一个利用完整采样的方法得到的SVBRDF参考数据上进行数值分析实验。分析实验使用的数据来自于Lawrence等，在论文^[23]中提供的完整采样的各向异性SVBRDF数据(greeting card)。实验采用在SVBRDF数据中随机选取1000个BRDF作为代表性BRDF数据。数值模拟的光照环境是根据Debevec在论文^[54]中采集的Grace Cathedral作为基础，并增加一个涵盖角度为 0.4π 的移动面光源构成。在实验过程中，随机选取N个不同光源，并根据对应光源计算出对应的Key采样用于实际的数据重建。最后，将重建出的SVBRDF与参考的SVBRDF数据集进行比较，并计算相对误差。为去除随机性影响，对于不同的N，实验过程进行10次随机选择，并取平均的误差值作为对应的最终数值误差。

实验结果详见图 4.8，从曲线图中可以看出，随着采样数目N 的增长，重建误差快速下降。同时，从右侧的比较图可以看出，基于SVBRDF重建的方法获得的SVBRDF数据 (c) 可以得到和参考数据(b)一致的渲染结果。为了进行更加客观的评价，这里采用的视点方向，以及光源方向均不在第二阶段的Key采样之内。

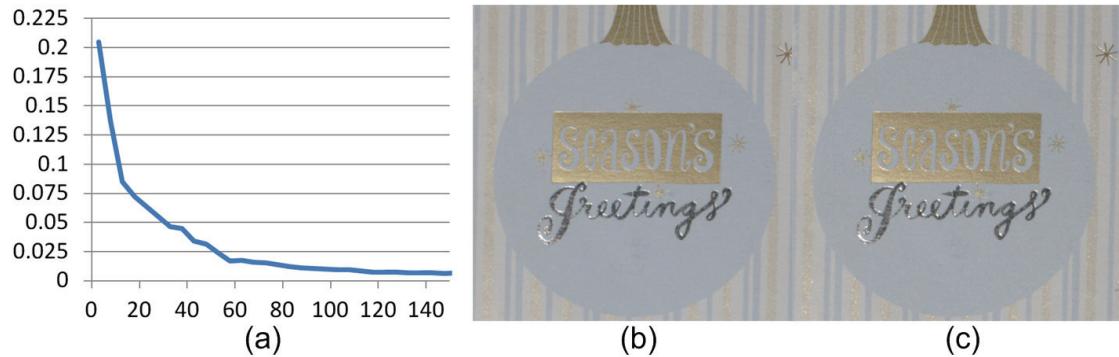


图 4.8 利用完整采样的SVBRDF进行测试. (a) 随着采样数目 N 的增长, 重构误差下降曲线 (b) 完整采样的SVBRDF渲染结果作为参考 (c) 本文中方法重构SVBRDF的渲染结果

4.3.1.2 与微面元合成方法进行比较

传统的SVBRDF采集方法中，只有非常有限的工作能够采集高质量的SVBRDF。基于参数化模型的SVBRDF无法获得高度的真实感，因此，在这里我们选择Wang等提出的，当前最先进的基于微面元模型的采集方法^[18]作为传统方法的代表，并进行比较。

根据论文^[18]中所描述，我们设定 $N = 400 = 20 \times 20$ 个采样作为该方法的输入数据，并用论文中提到的微面元合成的方法进行重构。同时，本文提出的方法使用 $N=50$ 个Key采样。为了进行更客观的比较，两种方法均采用点光源作为光照模型。图 4.9中的结果表明，虽然微面元合成的方法采集了8倍多的数据，其合成结果依然会出现一些瑕疵，具有尖锐镜面反射的花纹部分出现条纹状的可见瑕疵。而对于本文提出的方法，第一阶段采集的高分辨率代表性BRDF有效地采集到了这些尖锐的镜面反射细节，结合第二阶段的数据，很好的重构了这些拥有尖锐的镜面反射的特效。采用本问题提出的方法，利用了更少的数据采样，获得了更接近真实数据的渲染结果。



图 4.9 与微面元合成[Wang et al. 2008]方法进行比较. (a) 参考图片 (b) 本文重构结果 (c) 微面元合成方法产生的结果

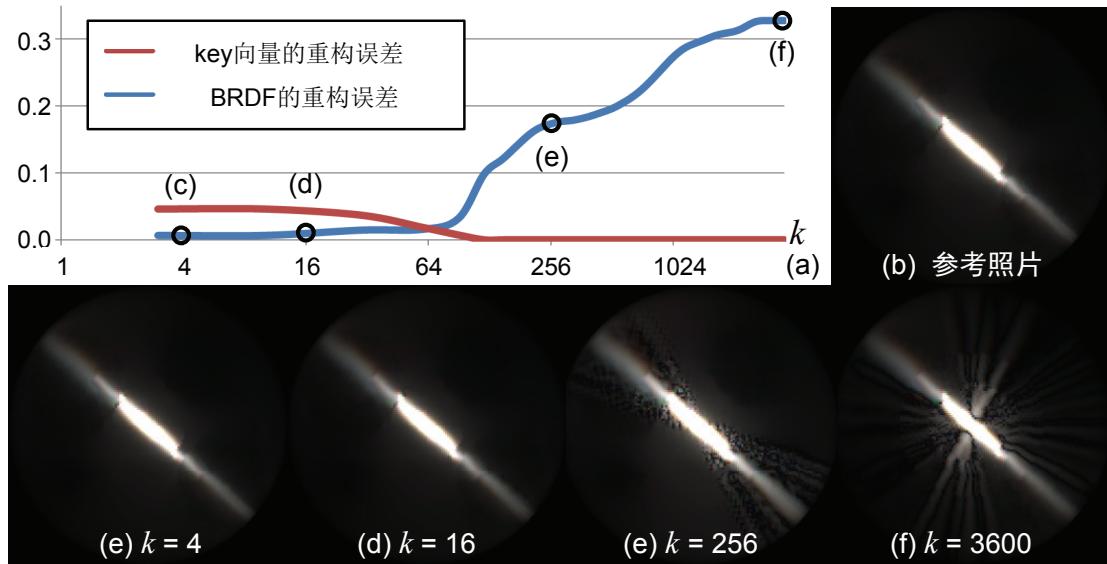


图 4.10 对于不同邻域大小 k 局部线性重建的结果分析。其中误差均为 L2 距离，根据信号的长度进行归一化，重构的 BRDF 通过微面元模型的二维 NDFs 来表示。(a) key 采样重构误差和 BRDF 重构误差随着 k 增长的曲线。(b) BRDF 参考图像。(c-f) 对于在(a)中标示出的不同 k ，对应的 BRDF 重构结果。

4.3.1.3 邻域范围选择对重构过程的影响

本小节通过实验分析邻域大小 k 对重构数据结果的影响，本组实验在具有高度各向异性 BRDF 的金属盘子上进行。实验从金属盘上取得 $N=100$ 个 Key 采样，并通过第 4.1.7 节中的方法扩展获得代表性 BRDF，总计获得 $M=3600$ 个代表性 BRDF。由于总计有 $M=3600$ 个代表性 BRDF，本实验将测试 k 从 1 变化到 3600 的过程对重构结果的影响。数值比较以一个定点精确测量的 BRDF 作为参考，该参考 BRDF 用第 4.2.1 章提出的 BRDF 测量仪精确定点测量来获得，此参考点在图 4.10a 中用红圈标识出来。随着 k 的数目增长，从匹配向量重构 key 向量的误差一致下降，当 $k = N$ 时，约束方程与未知数个数相同，因此重构误差降至 0。但是，key 向量的重构误差并不能代表最终 BRDF 的重构误差，由于 N 远小于 BRDF 上的采样数目，而 BRDF 全局上是个高维空间，其空间维度高于 N ，因此用 N 个采样重构 BRDF 是一个非确定性问题，并导致在 BRDF 上进行全局线性插值会产生错误的 BRDF 重构结果。这种错误体现在图 4.2.1 中重构的 BRDF 上，当采用很大的 k 进行重构时，得到的重构 BRDF 出现大量的重影等瑕疵，并会影响渲染质量。然而当 k 接近 SVBRDF 流形的维度范围时，在一个较大的范围(4-60)内，选择不同的 k 对重构结果影响不大。

4.3.2 实际采集SVBRDF

图 4.11 展示了本章节中进行实验的不同材料样本。为了证明该算法正确的重

构了材料本身的反射属性，这里比较了真实的参考照片与通过重构的SVBRDF在同样光照环境下的渲染结果。比较结果表明，无论是具有复杂的渐变材料(a)，或具有明显边界(b)的材料，都可以被该算法有效地重构。各项同性材质(a)(b)，和各向异性材质(c)的重构结果均与参考照片一致。为了排除特殊情况的干扰，这一比较实验是在与采集角度不同的视角，利用与采集过程中不同的光源作为环境进行渲染的结果。

图 4.12 展示了算法处理具有凹凸质感的各项同性材料(b)，具有复杂Tangent方向的各项异性材料(a)以及同时具有法向变化与Tangent方向变化的材料(c)的情况。第二行的渲染结果很好的符合了第一行的参考照片，证明该算法重构的反射属性与材料本身的属性一致。实际采集到的代表性BRDF数目列于表 4.1 中。对于针织物的非线性材质，代表性BRDF根据不同的tangent进行了 $72\times$ 扩展，根据不同的法向方向进行了 $400\times$ 扩展，产生总计864k个代表性BRDF。对于其他材质，如 4.1.7 节中所描述，对于不同法向方向采用了 $3600\times$ 扩展，对于不同tangent方向采用 $360\times$ 扩展。根据扩展的代表性BRDF本身的方向和tangent信息，在SVBRDF重建过程中，可以推导出每个像素所对应的法向和tangent方向，最终重构出的法向和tangent贴图（详见图 4.12）。

图 4.1 和图 4.13 中展示了将采集到的SVBRDF 应用到几何物体上的渲染结

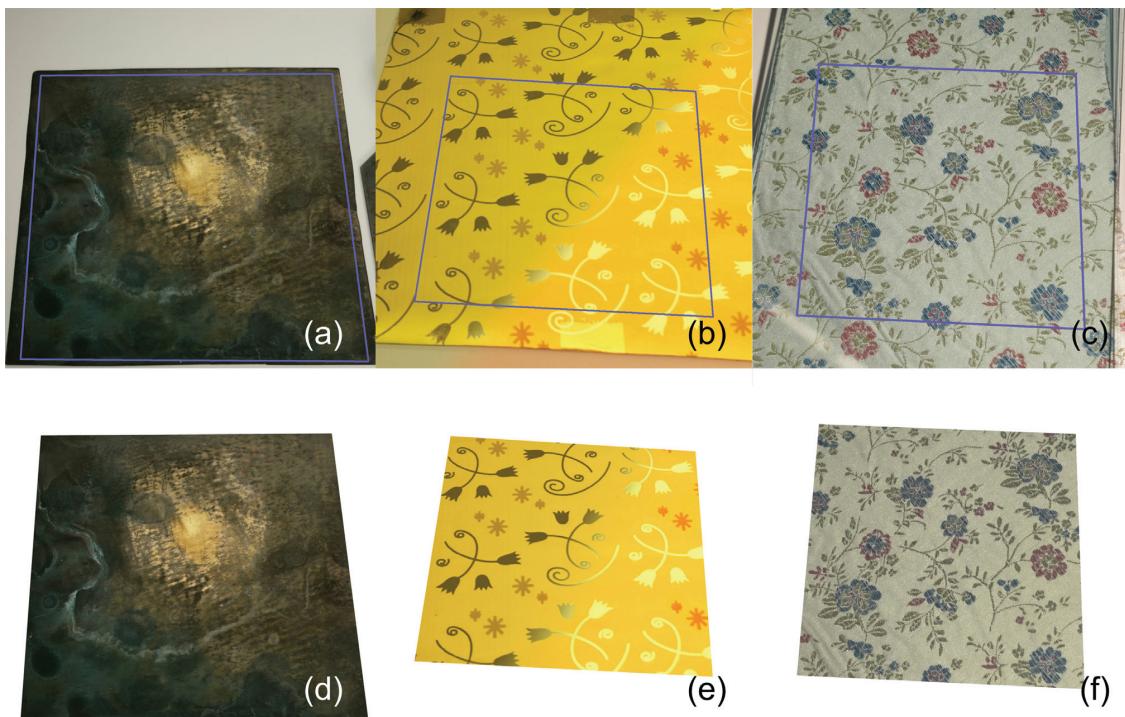


图 4.11 采集的SVBRDF与原始样本. 第一行展示的是原始样本的照片. 第二行展示的是重构的SVBRDF在同样光照条件下的渲染结果。对应的样本: (a/d) 生锈的铜, (b/e) 包装纸, (c/f) 针织品.

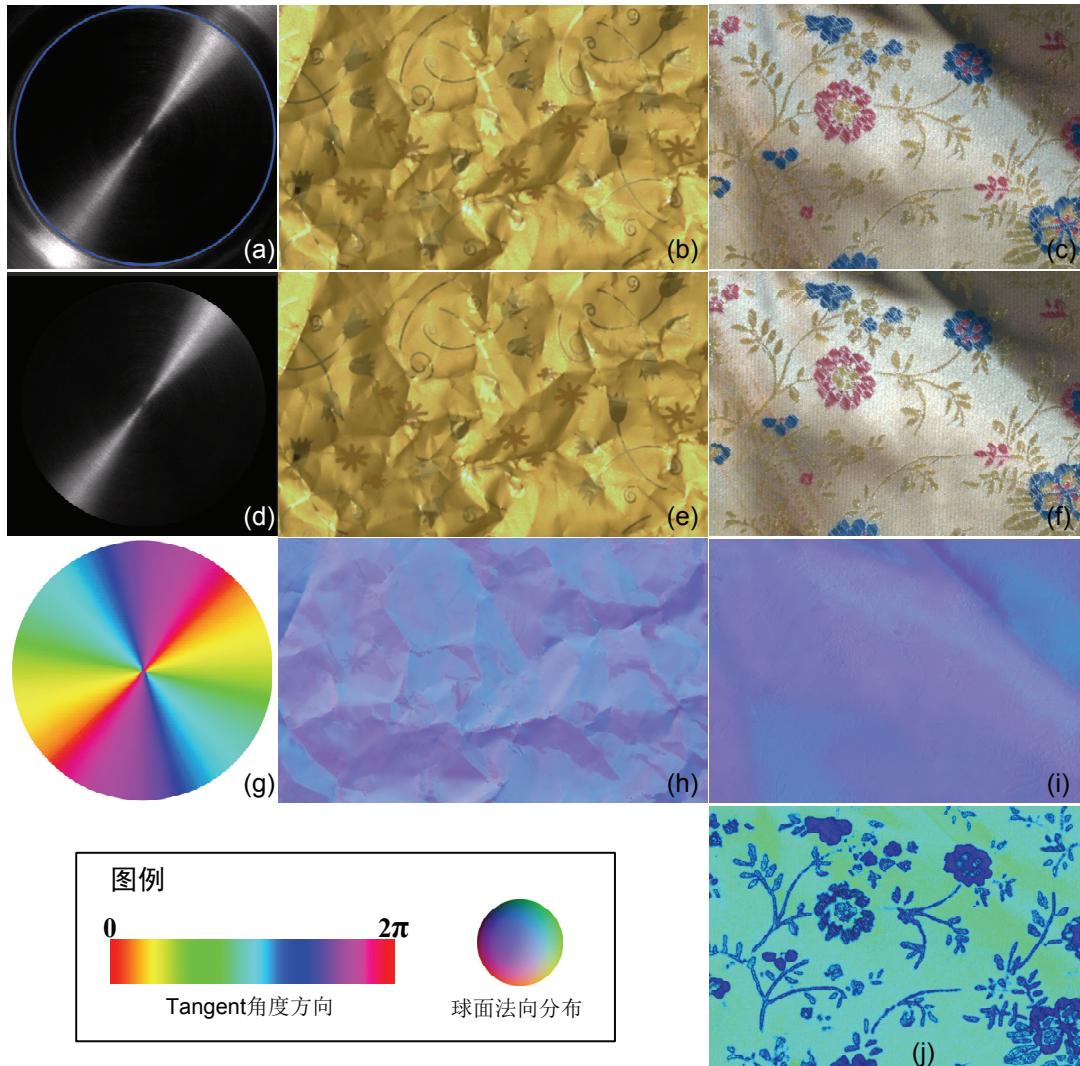


图 4.12 各向异性和具有凹凸的SVBRDF样本。第一行展示的是原始样本的照片。第二行展示的是重构的SVBRDF在同样光照条件下的渲染结果。最后两行是对应的tangent方向和法向贴图。对应样本: (a/d) 打磨过的铝盘, (b/e) 褶皱的包装纸, (c/f) 褶皱的针织品。

果。精细打磨的铝盘(a)上扇状的高光以及细腻的打磨细节展现出高度的真实感。在环境光照下, 针织品(b)随着光照的不同体现出各向异性材料所特有的光泽效果。褶皱的包装纸(c)具有非常尖锐的镜面反射高光, 其锐利的边缘和镜面反射的细节被很好地重现。如生锈的铜盘(d)一样复杂渐变的反射细节一样可以很好地被刻画。

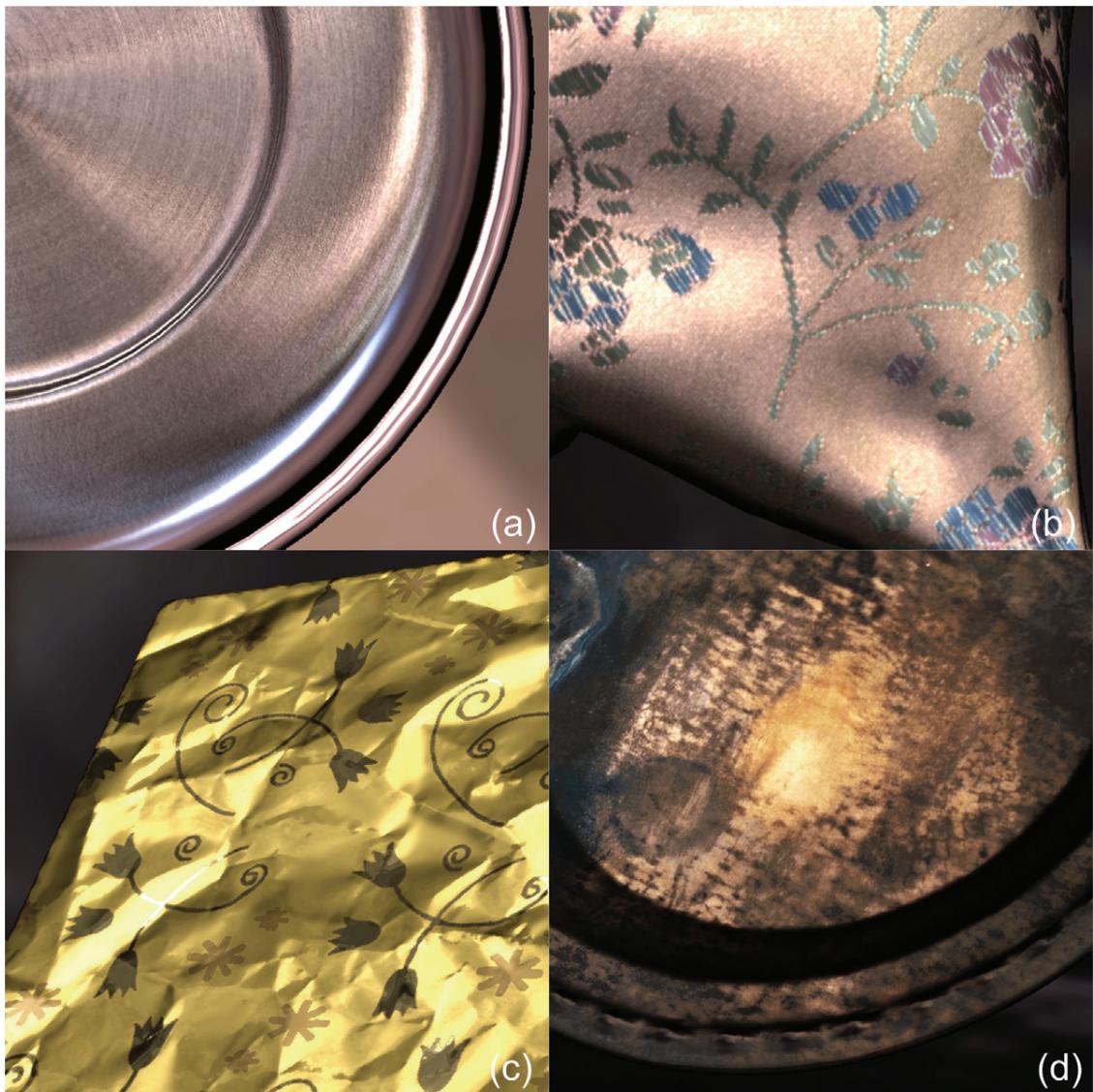


图 4.13 渲染结果的细节：(a) 打磨过的铝盘, (b) 针织品, (c) 褶皱的包装纸, (d) 生锈的铜盘。

4.4 小结与讨论

结论

基于流形的SVBRDF数据采集，将原本耗时冗长的数据采集过程分割成两个阶段：一个阶段采集SVBRDF流形，另一个阶段重构这个流形与材质表面的对应关系。每个阶段都仅仅采集了SVBRDF数据非常少的一部分稀疏采样，却可以重构高分辨率的SVBRDF数据。针对采集具有代表性的BRDF，本文设计了一种基于condenser镜片的BRDF测量仪，实现了每秒10个单点BRDF的高速采集。通过基于流形结构的局部线性插值，该算法可以重构在角度和空间域上都具有高分辨率的SVBRDF数据。利用扩展的代表性BRDF集合，算法可以有效地重构包括各向异性BRDF和表面法向变化在内的复杂反射特性。基于流形的SVBRDF采集简化并加速了传统反射材质采集方法，适用于各种复杂反射材质，并可以产生高质量的渲染结果。

局限性讨论

虽然本章所提出的基于流形重建的方法并不依赖于微面元BRDF模型，但在4.2.1.1节所设计的BRDF测量仪是基于微面元BRDF模型设计，虽然微面元模型适用于绝大多数反射材质^[18,20]，对于一些特殊类型的如回光反射材质（retro-reflective）并不能为这一模型所表达。

本章所提出的key采样限于全局平坦的材料，因此包括阴影和光线多次反射等复杂的全局光照效果并没有被考虑到。如何处理这些因素将成为一个值得研究的问题。

第5章 基于用户交互的表面反射纹理材质建模

第4章介绍了一种高效采集真实世界纹理材质的方法，采集到的SVBRDF具有高度的真实感，并能产生高质量的渲染结果。然而即使利用了SVBRDF流形模型，仍然需要数十或数百个采样才能完成高质量的采集。

在当前的图形学工业界，依然有大量的纹理材质来源于艺术家的手工制作。一般而言，艺术家从一张输入的颜色纹理开始，根据经验和一些辅助工具绘制出对应的漫反射、高光反射、粗糙度（BRDF参数）以及法向纹理。这个手工制作的过程往往需要数小时的精细调整，其间涉及到大量的图形图像软件应用（如Photoshop、Maya等），这项工作不仅耗时长久，由于艺术家没有合适的工具用于区分纹理中属于反射材质与凹凸几何的部分细节，这种手工建模有时还很难达到艺术家所期待的正确效果。

针对这一问题，本章节将介绍一种基于用户交互的纹理材质建模方法。与纹理材质采集所不同，该方法仅需要一张纹理图片作为输入。包括漫反射、高光反射以及法向在内的复杂纹理材质，均可以从单一的，在方向光源照射下的平坦表面纹理图片中建模产生。这种纹理图片通常也是艺术家用来开始手工绘制纹理的基础，因此可以很容易地在大量纹理库中找到。由于从单一幅纹理图片精确重构物理上正确的纹理材质贴图是一个完全病态的问题，因此，交互式建模的目的并不是对原始材质的精确重构，而是利用用户交互，产生用户所希望的具有真实感的结果，通过有效的交互式系统简化传统艺术家手工建模的工作流程。如图5.1所示，该方法通过基于画刷的直观交互，从用户处获得关于光影与反射材质粗略的基本信息，而后算法会精确的推算出对于每个像素上对应的材质细节，并最终产生具有高度真实感的渲染结果。

基于一张输入纹理，交互式建模的方法可以通过用户在几分钟之内绘制的少

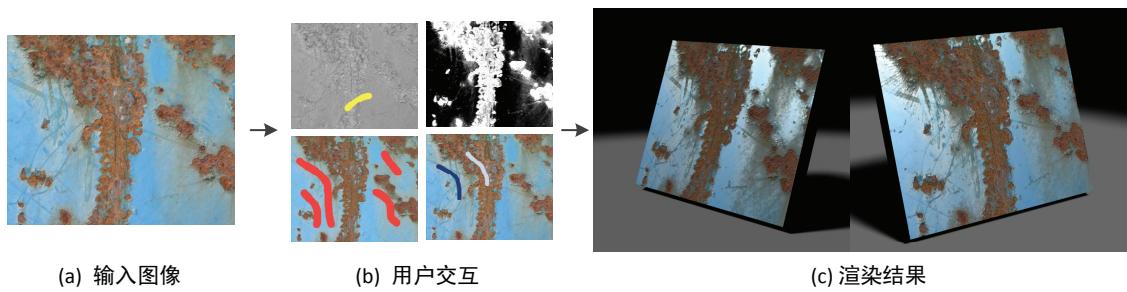


图 5.1 根据单一的输入图片(a)，交互式纹理建模的方法利用少量基于画刷的用户输入(b)，重建出完整的反射材质贴图和法向贴图，其结果可以用于其他物体的真实感图形渲染(c)。

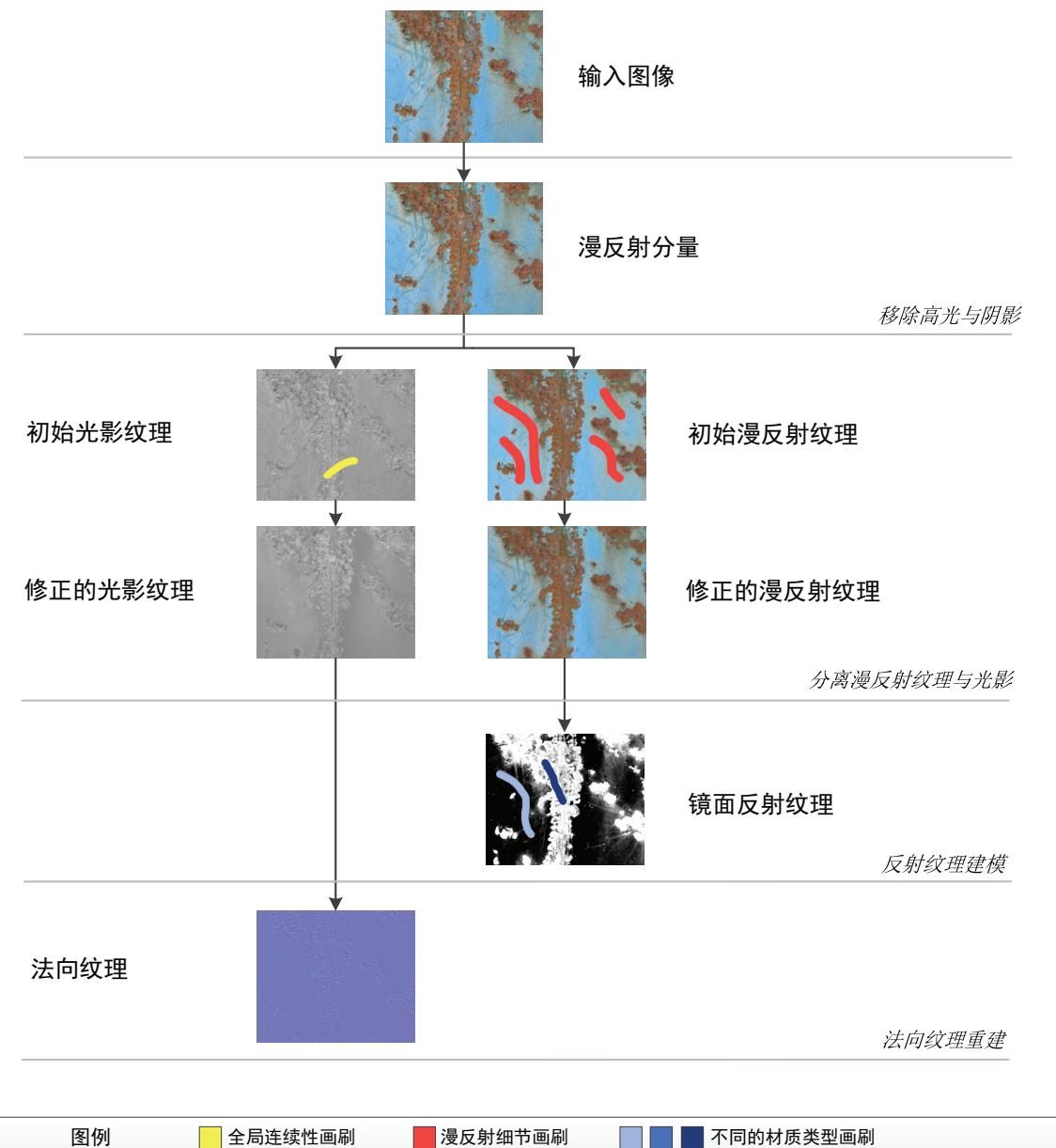


图 5.2 交互式纹理材质建模的流程。

量笔刷重建出高质量的纹理材质。最终的实验结果证明，该方法适用于广泛类型的材质，包含如金属、木头、岩石和皮革等自然材质；以及布料、纸张和混凝土等人工材料。本章所介绍的交互式建模方法，第一个实现了通过少量交互即可重建广泛类型的材质，并产生包含漫反射、高光反射以及法向纹理在内的全部反射效果。

5.1 系统概述

交互系统的输入图片 I 是一张在均一方向光照下拍摄的，整体上接近平面的材质纹理表面。材质表面包含由反射材质以及局部凹凸起伏而产生的丰富的纹理细节。由于材质表面整体上基本接近于平面，没有大幅度的几何结构，因而几何结构之间的遮挡（occlusion）以及光线在大尺度几何结构上的反射（inter-reflections）对光照效果的影响很小，可以忽略不计。虽然这样的光照模型假设并不一定完全符合实际的物理规律，但在本文中所展示的大量实验结果表明，基于这样的光照模型假设依然可以获得视觉上真实的建模结果。

对于像素 x 处的光线反射，可以用一个BRDF $\rho(x)$ 来描述，而这个BRDF可以进一步的分解为一个由漫反射系数 $\rho_d(x)$ 决定，符合Lambertian模型的漫反射部分；以及一个由高光反射系数 $\rho_s(x)$ 以及高光反射分布函数 $f_r(x)$ 决定的高光反射部分。在方向光源的情况下，输入图片 $\mathbf{I}(x)$ 中的像素 x 可以被划分为漫反射部分 $\mathbf{I}_d(x)$ 与高光反射部分 $\mathbf{I}_s(x)$ 之和。

$$\mathbf{I}(x) = \mathbf{I}_d(x) + \mathbf{I}_s(x), \quad (5-1)$$

其中

$$\mathbf{I}_d(x) = \rho_d(x)\mathbf{S}_d(x) = \rho_d(x)(\mathbf{N}(x) \cdot \mathbf{L}) I_l \quad (5-2)$$

$$\mathbf{I}_s(x) = \rho_s(x)\mathbf{S}_s(x) = \rho_s(x)f_r(\mathbf{N}(x), \mathbf{L}, \mathbf{V}) I_l. \quad (5-3)$$

像素 x 的漫反射光影（diffuse shading） $\mathbf{S}_d(x)$ 是由这个像素的法向方向（normal） $\mathbf{N}(x)$ ，光照方向（light direction） \mathbf{L} 以及光照强度 I_l 决定。而其高光反射光影（specular shading）还受到视角方向 \mathbf{V} 的影响。

交互式纹理材质建模的目标就是要实现：根据少量的用户交互，从单一的一张输入图像 \mathbf{I} ，建立出具有复杂空间分布的漫反射纹理 $\rho_d(x)$ ，高光反射纹理 $\rho_s(x)$ ，具有空间分布的高光反射分布函数 $f_r(x)$ ，以及法向纹理 $\mathbf{N}(x)$ 。图5.2中示意了交互式纹理材质建模的基本流程，整个建模过程分为如下几个步骤：

1. 移除高光与阴影

算法的第一步首先根据阈值移除高光与阴影成分。在实际实现中，对于8比特图像，将 $I(x) > 235$ 的像素归为高光像素， $I(x) < 25$ 归为阴影像素，随后

将这些像素移除，并利用图像 inpainting^[58]的方法填充对应的像素。进行移除操作后，当前图像便仅含有漫反射部分 \mathbf{I}_d 。

2. 分离光影与漫反射纹理 (5.2 节)

随后需要将上一步中获得的漫反射部分 \mathbf{I}_d 分解成为漫反射纹理 ρ_d 和漫反射光影 \mathbf{S}_d 的乘积。算法首先对纹理的统计分布进行假设，即颜色变化与漫反射材质的变化相关，而和光影变化不相关。根据这一假设，根据全局的统计信息，算法可以对漫反射纹理和漫反射光影进行一个初始的估计。之后，用户可以利用基于画刷的简单交互标示出那些由于假设不成立而造成的错误部分，算法会根据用户输入快速的修正结果，获得满足用户需求的光影与漫反射纹理分离。

3. 交互式高光反射建模 (5.3节)

物体的高光反射往往与其本身的材料类型（如金属、塑料或锈迹）有直接关系，而与其漫反射材质不具有显式的直接关系。基于这样的一个认识，本文提出一种交互式的高光反射建模方法，用户利用画刷简单地指示出部分位置的材质类型，根据用户的输入，一个快速分类算法将根据漫反射纹理以及用户的画刷来决定对于空间中每一个像素的材质类型，并最终计算出对于每一个像素的反射模型 (ρ_s 以及 f_r)

4. 重建法向纹理 (5.4节)

根据分离出的漫反射光影 \mathbf{S}_d ，算法通过一个以高度场作为软约束的多分辨率法向重建算法获得法向纹理 \mathbf{N} 。

5.2 交互式分离漫反射纹理与光影

本章节讨论如何将输入的漫反射图像 \mathbf{I}_d 分离成对应的漫反射纹理 ρ_d 和漫反射光影 \mathbf{S}_d 。分离出的这两项数据不仅作为一部分材质纹理结果，还将会被用于之后的交互式高光反射建模与多分辨率法向重建的步骤中作为输入。

由于本章节涉及到颜色相关的计算，因此可以将一张图像 \mathbf{I}_d 表示为的RGB三个颜色通道($\mathbf{I}_d^r, \mathbf{I}_d^g, \mathbf{I}_d^b$)，而对应的亮度 (intensity) 图像可以表示为 $\mathbf{I}_d^i = (\mathbf{I}_d^r + \mathbf{I}_d^g + \mathbf{I}_d^b)/3$ 色度 (chroma value) 部分可以表示为 $\mathbf{I}_d^c = (\mathbf{I}_d^r/\mathbf{I}_d^i, \mathbf{I}_d^g/\mathbf{I}_d^i, 3 - \mathbf{I}_d^r/\mathbf{I}_d^i - \mathbf{I}_d^g/\mathbf{I}_d^i)$ 。这里假设图像已经经过白平衡处理，光照颜色为白色，因此所有的色度部分都是由

漫反射纹理产生。而亮度变化则由漫反射纹理的亮度以及光影效果的乘积决定。

$$\mathbf{I}_d^c(x) = \rho_d^c(x), \quad \mathbf{I}_d^i(x) = \rho_d^i(x)\mathbf{S}_d^i(x). \quad (5-4)$$

因此，分离漫反射与光影的问题就可以进一步简化为从输入图像的亮度部分 \mathbf{I}_d^i 分离出漫反射纹理的亮度 ρ_d^i 和光影的亮度 \mathbf{S}_d^i 。这个分离过程可以又分为初始化和交互式修正两步。

5.2.1 初始分离

在进行初始化分离时，算法对图像有如下假设：漫反射材质的变化与色度的变化具有相关性，而法向纹理的变化与色度变化不具有相关性。输入图像的色度完全由漫反射材质的色度决定 $\mathbf{I}_d^c = \rho_d^c = c$ 。法向纹理的分布于色度不相关，因此对于不同色度的像素，其光影的分布具有统计上的独立性。

$$E(\mathbf{I}_d^i | \mathbf{I}_d^c = c) = E(\mathbf{S}_d^i \rho_d^i | \mathbf{I}_d^c = c) = E(\mathbf{N}(x) \cdot L) E(\rho_d^i | \mathbf{I}_d^c = c), \quad (5-5)$$

其中 $E(\mathbf{I}_d^i | \mathbf{I}_d^c = c)$ 表示对于具有色度 c 的所有像素在输入图像 \mathbf{I}_d 上的数学期望，而 $E(\rho_d^i | \mathbf{I}_d^c = c)$ 则是对于具有色度 c 的所有像素对应的漫反射亮度 ρ_d^i 的数学期望。由于之前的假设，光影部分的数学期望 $E(\mathbf{S}_d)$ 对于不同的色度是一致的。

在忽略一个全局的亮度尺度变换后，可以设定 $E(\mathbf{S}_d) = 1.0$ ，因而，可以统计出具有同样色度 c 的像素亮度的平均值，作为漫反射亮度的数学期望 $E(\rho_d^i | \mathbf{I}_d^c = c)$ ，展开成为如下公式：

$$E(\rho_d^i | \mathbf{I}_d^c = c) = E(\mathbf{I}_d^i | \mathbf{I}_d^c = c) = \frac{1}{N_c} \sum_{\mathbf{I}_d^c(x)=c} \mathbf{I}_d^i(x), \quad (5-6)$$

其中 N_c 指所有具有色度 c 的像素数目。在实际计算中，算法将色度的两个通道平均的划分为 20 个区间，因此总计产生出 400 个划分出来的不同色度。所有在相同区间内的像素被认为具有相同色度，并参与统计计算。对于每个像素，根据其色度 c 将获得的亮度的数学期望，作为当前像素的漫反射亮度的初始估计。

$$\rho_d^i(x) = E(\rho_d^i | \mathbf{I}_d^c = \mathbf{I}_d^c(x)), \quad (5-7)$$

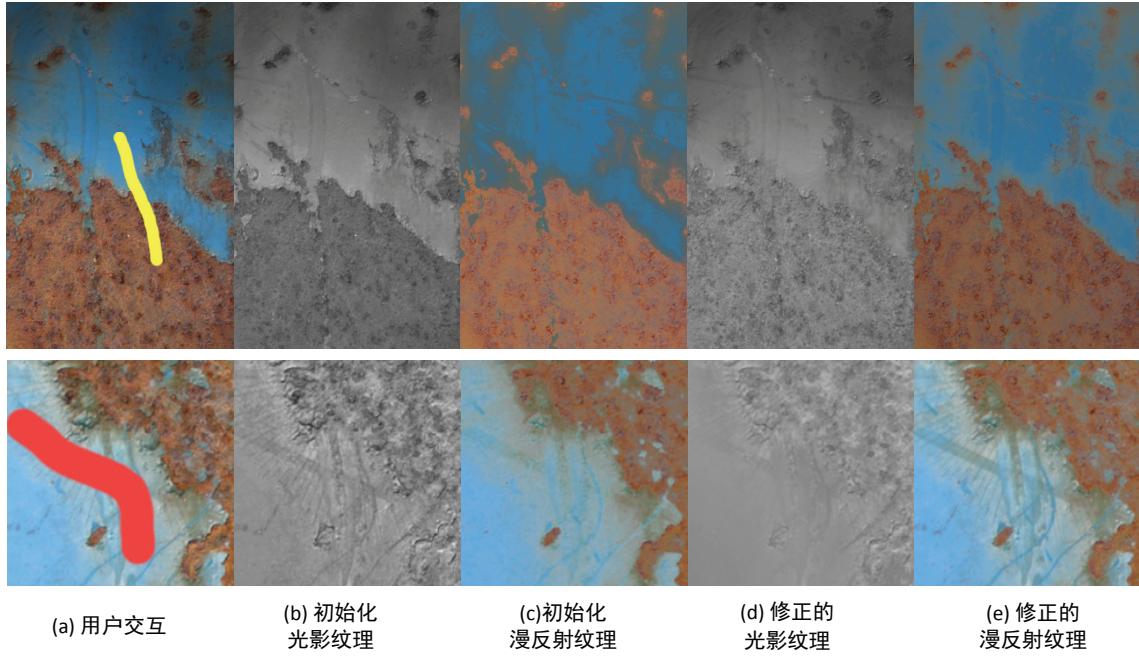


图 5.3 基于用户交互的漫反射纹理与光影分离。通过用户交互(a),初始的光影(b)与反射纹理(c)中违反假设的错误结果得到修正(d)(e)。第一行展示了全局连续性画刷的效果。第二行展示了漫反射纹理细节画刷的作用。

而后，可以根据如下公式计算对应的光影成分

$$\mathbf{S}_d^i(x) = \frac{\mathbf{I}_d^i(x)}{\rho_d^i(x)}. \quad (5-8)$$

根据得到的漫反射材质与光影的亮度部分，与对应的色度部分相结合，就获得了漫反射材质与光影的初步分解。图5.3中展示了初始分解的漫反射纹理与光影部分的结果。值得注意的是，虽然算法假设光影的数学期望 $E(\mathbf{S}_d)$ 是个常数，但结果中的光影依然保持了大量的空间变化细节。

5.2.2 交互式修正

初始化分离步骤中，算法假设图像中的色度与漫反射纹理具有相关性，而与光影部分不具有相关性。而对于有些情况，这个假设并不一定始终成立，对于那些违反了假设的部分，初始化分离算法将会产生错误的估计，并在一些区域产生瑕疵。

为了修正这些问题，这里设计了两种画刷来帮助用户进行交互。对应于全局与局部的瑕疵，这两种画刷分别是：全局连续性画刷（smooth shading stroke）以及漫反射纹理细节画刷（albedo detail stroke）。全局连续性画刷用于修正那些，

由于色度与法向纹理存在一定的相关性造成的色度边界上的光影不连续的问题。漫反射纹理细节画刷用于修正那些，由于漫反射变化与色度变化并不完全相关而造成的漫反射纹理亮度细节丢失的问题。根据用户简单的几笔画刷作为输入，分离算法将重新进行统计计算，对整张输入图像进行更新，并快速地产生新的分离结果。

全局连续性画刷 Smooth Shading Stroke 当漫反射纹理变化与法向纹理变化存在一定的相关性时，由于初始化分离算法认为对法向纹理的数学期望与漫反射的部分无关，因而会产生一个偏离的估计，并造成结果中的一些瑕疵。这种情况一般发生在具有大面积连续相同色度的区域，同时这些区域又与大尺度上的几何结构有一定的相关性的情况。例如图5.3的一个直观例子所表明，图中蓝色的喷漆金属部分与红色的生锈部分有不同的大尺度结构，金属部分的上半部分有一个较大尺度的缓慢法向变化，并造成了大尺度上光影的变化。这种不符合假设的情况，会造成初始化估计出的光影图像中，在色度边界的区域出现一个明显的不连续区域，而事实上这里的光影应该是在全局的尺度上是相似的。

对于这样的问题，可以由用户在色度边界的不连续区域用一个简单的画刷来指明这种错误的不连续边界。而后，算法认为用户希望这些画刷覆盖的像素应该在全局尺度上具有相似的光影，也就是说这些像素的光影应该具有相同的数学期望。因此，对于每一个用户画刷，利用与初始化一致的统计算法，对于画刷内部的所有像素进行统计计算，对于每一个色度 c 重新估计其对应的漫反射纹理的数学期望 $E_k(\rho_d^i|c)$ 。当获得在画刷内的数学期望统计后，全局的漫反射纹理按照如下方式进行更新：

$$E(\rho_d^i|\mathbf{I}_d^c = c) = \frac{E(\rho_d^i|\mathbf{I}_d^c = c) + \sum w_k E_k(\rho_d^i|\mathbf{I}_d^c = c)}{1 + \sum w_k} \quad (5-9)$$

其中 $w_k=0.5$ 是对于第 k 个画刷的一个权值。

当所全局统计更新后，漫反射纹理与光影图像会根据公式5-7与5-8进行相应的更新。随着这个更新过程，不仅仅是画笔覆盖的部分，整张图像中具有相同颜色的部分都会得到更新。图5.3中可以看出，由于初始化计算中产生的瑕疵，可以由少数几笔用户交互快速的修正。

漫反射纹理细节画刷 Albedo Detail Stroke 算法在初始化计算中，假设漫反射纹理与色度变化完全相关，并由此为所有具有相同色度的像素赋予相同的漫反射

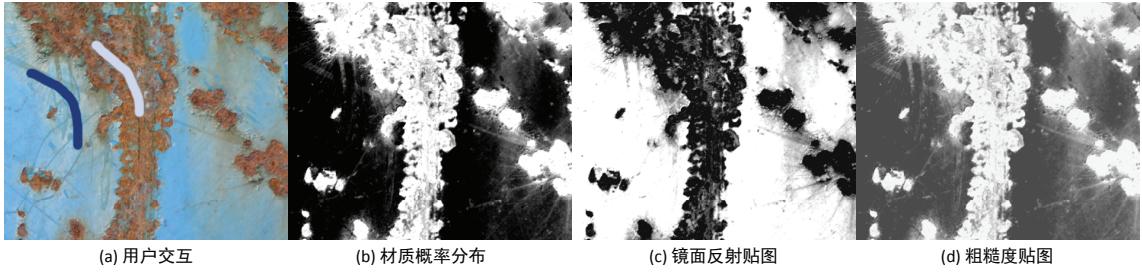


图 5.4 交互式高光反射建模。通过用户利用画刷指定离散的一些材质类型(a)，算法将所有像素根据材质类型进行分类，并计算出每个像素对应每种类型材质的概率(b)，并最终指导产生高光反射系数(c)和粗糙度(d)贴图。

亮度。对于实际的材料中不满足这一假设的情况，对于同样的色度的像素，初始化算法会将所有的亮度变化归为光影的变化，并因此产生一些不应该存在的光影变化。如图5.3 所展示，这种变化在完全平面的情况下会更加明显。为了去除这种瑕疵，用户可以用画笔标记出瑕疵所在的区域，对于这些区域，算法会将亮度细节归属到漫反射纹理的细节中：

$$\rho_d^i(x) = \mathbf{I}_d^i(x)/E(\mathbf{S}_d^i(x)), \quad \mathbf{S}_d^i(x) = E(\mathbf{S}_d^i(x)) \quad (5-10)$$

其中 $E(\mathbf{S}_d^i(x))$ 是当前画刷内部像素的光影的数学期望。得到恢复了细节的漫反射纹理后，对应的光影被更新为 $E(\mathbf{S}_d^i(x))$ 。为了防止出现画笔边缘的带状边界，算法自动对用户的画笔进行一个高斯羽化过程（Gaussian feathering）来柔化画笔边缘。最后，对于那些同时具有大量光影以及漫反射纹理亮度细节变化的区域，如果像素具有相同的色度，分离算法将亮度的细节变化归为光影部分。虽然这种算法并不符合物理事实，但根据这种分离方式得到的交互式建模结果依然能够具有很高的真实感，并没有体现出明显的视觉瑕疵。

5.3 交互式高光反射建模

本章节讨论如何交互式的为纹理图像中的每一个像素计算出对应的高光反射系数 ρ_s 以及对应的高光反射分布函数 f_r 。由于材质的高光反射属性并不直接与漫反射系数相关，而是直接与材质本身的材质类型相关。因此，这里提出一种交互式的高光反射建模方法，用户通过画刷来指定部分像素的材质类型，而后算法会自动决定其他像素所应有的高光反射属性。

当用户指定了 N_M 种材质类型，以及与其对应的 N_M 种BRDF后，基于用户的输入数据，通过一个分类的算法，对于每一个像素系统会自动计算出该像素属于某个材质类型的概率。根据分类的结果，以及指定的BRDF信息，系统为每个像素产生对应的高光反射属性。在本文的具体实现中，高光反射部分的BRDF或者是来自于用户手工设定，或者来自于已有的材质数据集。本文所采用的BRDF模型是Ward模型，其中粗糙度roughness参数 $\alpha(x)$ 控制着高光反射函数的形状 f_r 。值得注意的是，在本文实现中采用了参数化的Ward模型，是考虑到Ward模型参数简单易于用户调整，但本文所设计的高光反射建模的方法并不局限于参数化模型。

5.3.1 材质类型分类

根据用户输入，算法得到一系列被标示出材质类型的像素。为进行材质类型分类，算法将所有属于同一材质类型的像素归于一类，并将它们的漫反射系数组成集合 M 。为了去除材质类型集合 M_i 中的一些干扰像素，算法对于每一个像素，在所有有标定材质类型的像素中查询对于它的漫反射系数在颜色空间的 $k = 10$ 个最近邻，如果这些最近邻中，有超过50% 的像素被标示为其他类型的材质，而不是 i 这个类型，算法将这个像素从集合 M_i 中移除。

而后，分类算法通过Shepard's方法^[59]计算出对于像素 x 属于第 i 类材质类型的概率 $p_i(x)$

$$p_i(x) = \frac{d_i(x)^{-p}}{\sum_{j=1}^{N_M} d_j(x)^{-p}}, \quad (5-11)$$

其中 N_M 是用户标示出的材质类型的总数，Shepard's方法的参数 $p = 1$ 。 $d_i(x)$ 是像素 x 的漫反射系数到第 i 个材质类型集合的距离，并通过下式进行计算：

$$d_i(x) = \frac{1}{10} \sum_{j=0}^{10} \|\rho_d(m_j) - \rho_d(x)\|, \quad (5-12)$$

其中， $\rho_d(m_j)$ 是在集合 M_i 中距离 $d_i(x)$ 最近的10个漫反射系数。当 $d_i(x) = 0$ 时，需要加 $\epsilon = 0.01$ 来保持数值稳定性。

计算高光反射属性 当材质类型确定之后，对应于每个像素高光反射系数 $\rho_s(x)$ 与高光反射的粗糙度 $\alpha(x)$ 可以根据如下公式进行计算：

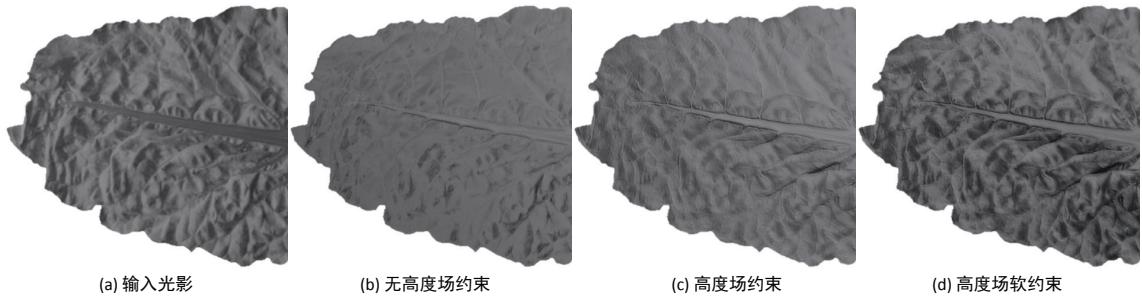


图 5.5 高度场约束对于法向重建的影响

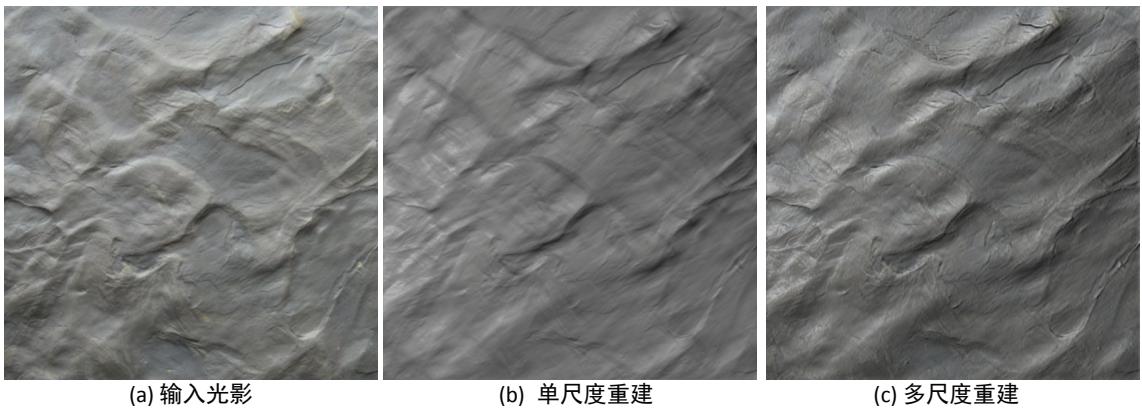


图 5.6 多层级法向重建比起单层级方法能更好的保持空间细节。

$$\rho_s(x) = \sum_{i=1}^M \rho_i p_i(x), \quad \alpha(x) = \sum_{i=1}^M \alpha_i p_i(x), \quad (5-13)$$

其中 $p_i(x)$ 是像素 x 属于第 i 种材质类型的概率， ρ_i 和 α_i 是对应于第 i 种材质类型的高光反射系数与高光反射的粗糙度。

5.4 多尺度法向重建

为了有效地表达样本材料表面的凹凸细节，算法需要根据光影 $\mathbf{S}_d(x)$ 以及光照方向 L 重构对应的法向纹理 $\mathbf{N}(x)$ 。其中，光影部分来自于分离的结果，而光照方向则由用户通过界面进行大致的指定。

重构法向纹理的一个最直接想法就是利用 Horn^[60] 等传统算法中使用的规则化项 (regularization term) 来直接从光影恢复法向。虽然这种方法重构出的结果，在同样的光照方向上可以完好的符合给定的光影，但由于这些方法重构的法向存在向光源方向 L 的一个统一偏斜，因此，在改变光照方向时，其结果会出现丢失细节等问题（参见图 5.5）。因此，一些方法引入高度场作为一个强约束，保证输入的光影对应于一个高度场。然而强制约束输入的凹凸表面维持一个高度

场，会导致一些细碎的细节被平滑或丢失，如图 5.5(c)中所示的Wu所提出的方法^[39]就是这样一个明显的例子，虽然高度场约束使得产生的法向纹理在新的光照条件下保持输入光影的一些特征，依然有一些光影的细节没有得到很好的保留。

根据这样的分析，这里提出一种多分辨率法向纹理重建算法。该算法并不强制假设最终的法向纹理构成一个实际的高度场，而只是利用^[39]方法获得的高度场作为法向重建的一个软约束。同时，为了保持输入光影在不同尺度上的细节，该算法在不同分辨率下进行法向重建。从图 5.6所示的结果可以看出，本文提出的法向重建算法比起传统算法可以更好的保持输入光影在不同尺度上的纹理细节，并在新的光照角度下产生出更加真实的渲染结果。

5.4.1 高度场作为软约束的法向重建

根据输入的光影图像 \mathbf{S}_d ，法向重建算法通过最小化下述的能量函数，求得最佳的法向纹理 \mathbf{N} 。

$$E_n = \sum_x \|\mathbf{N}(x) \cdot \mathbf{L} - \mathbf{S}_d(x)\|^2 + \lambda \sum \|\mathbf{N}(x) - \mathbf{N}'(x)\|^2. \quad (5-14)$$

这个能量函数包含两部分内容，并由 λ 来控制两项约束条件之间的比例关系，其中第一项约束使得结果的法向纹理 \mathbf{N} 在光照方向 \mathbf{L} 条件下的光影符合输入的光影图像 \mathbf{S}_d 。而第二项约束，则保证结果的法向纹理 \mathbf{N} 尽量符合参考法向 \mathbf{N}' ，而这个参考法向是从一个高度场 \mathbf{H} 根据如下公式计算得来：

$$\mathbf{N}' = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial y}}} \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x}, \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial y}, 1 \right)^T. \quad (5-15)$$

而从法向纹理 \mathbf{N} 计算出其对应的高度场 \mathbf{H} ，则依照^[39]提出的 osculating arc 计算方法，最小化以下能量函数来完成：

$$E_h = \sum_{\{i,j\}} ((\mathbf{H}(i) - \mathbf{H}(j)) - q_{ij})^2, \quad (5-16)$$

其中 $\{i, j\}$ 表示直接相邻的像素对， q_{ij} 是在相邻的法向向量 $\mathbf{N}(i)$ 与 $\mathbf{N}(j)$ 之间根据 osculating arc 计算出的相对高度（relative height）。具体的计算方法可以参照论文^[39]中的具体描述。

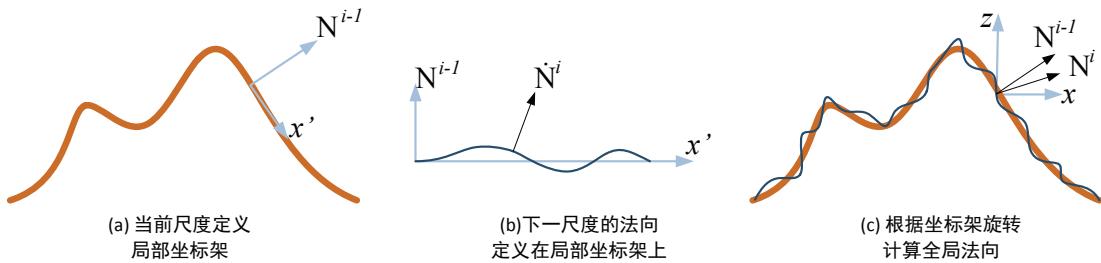


图 5.7 多尺度法向重建示意图。

为了得到初始的高度场约束，算法首先利用^[39]的方法根据输入的光影图像 \mathbf{S}_d 计算出最初的法向纹理 \mathbf{N}_0 以及对应的高度场 \mathbf{H}_0 。而后，重建算法依次的迭代优化 E_h 和 E_n 。在每一个迭代，首先根据方程 5-15 从高度场 \mathbf{H}_i 计算出对应的法向纹理 \mathbf{N}'_{i+1} ；而后，利用高斯赛德尔法求解线性方程，最小化能量函数 E_n 并获得 \mathbf{N}_{i+1} 。最后，利用multi-grid的方法求解Posission方程来实现最小化 E_h 并从 \mathbf{N}_{i+1} 获得对应的高度场 \mathbf{H}_{i+1} 。在本文的实现中，所有的实验结果是根据 $\lambda = 0.8$ 以及 $K = 3$ 获得。

5.4.2 多分辨率重建

当前的法向纹理重建方法依然存在一个主要的问题，即由于最小化 E_h 的过程被设定成为一个全局的优化过程，因此求解对应的高度场过程中，法向纹理里的误差会被平均的分散到图像的各个部分。对于那些在不同尺度上均存在凹凸几何特征变化的纹理，那些大尺度的纹理上的误差会被重新分布并影响到那些细节尺度上的法向的重建。从视觉上看，会体现为细节尺度的凹凸变化被平滑或者完全丢失。（如图5.6(b)所示），这一问题对于具有复杂细节的纹理材质更为突出。

为了解决这一问题，这里提出一种多尺度重建的方法。通过将输入光影分离成不同尺度，并在不同尺度上从粗到细的进行法向重建，可以有效地保护不同尺度的几何细节。对于每一个尺度，算法在由上一个尺度的法向定义的局部坐标架下重构当前尺度的法向纹理。如图 5.7 所示，当前法向为初始的 $(0.0, 0.0, 1.0)$ 时，整体的法向将维持上一个尺度的法向方向。在最小化 E_h 时，算法直接在局部坐标架上重建对应的高度场，而将上层尺度的几何结构当做平面来考虑，这样就有效地避免了不同尺度之间几何细节在重建过程中的相互干扰。而在最小化 E_n 时，算法会根据当前的局部坐标架，将全局的光照方向 L 旋转到对应的局部坐标架上，因此可以正确的对应于当前局部坐标下的法向与光影。当算法获得了当前尺度在局部坐标下的法向纹理后，这个法向纹理将根据局部坐标架旋转到全局坐标架，成为最终的法向纹理。并为下一级作为输入。从实验的结果图5.6(c)所体现的，

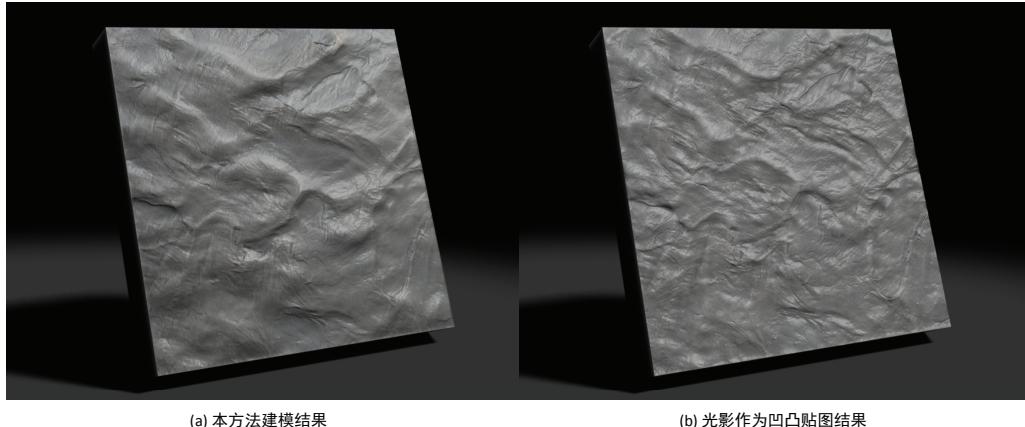


图 5.8 与光影作为凹凸贴图的方法进行比较。艺术家常用的光影作为凹凸贴图的方法会产生不自然的结果，而本文方法的建模结果能够很好保持输入图像的特征，产生自然的渲染结果。

利用了多尺度重建的方法，可以在新的光照条件下更好的保持输入光影在不同尺度上的细节。

在具体实现中，本文将输入光影作为最精细的一个层级，而另外两个层级则通过对输入光影进行 3×3 与 5×5 的bilateral 高斯过滤得到。用于过滤的具体参数是 $\sigma_s = 0.5$, $\sigma_i = 0.2$ 。

5.5 实验结果

计算效率 本节所有实验均在一台装有Intel Xeon 2.83GHz CPU与4GB内存的工作站上进行。对于通常分辨率为 768×768 的输入，漫反射与光影分离计算需要0.5秒，计算高光反射属性可以在0.2秒内完成，对于需要用户交互的这两个步骤，可以在非常短的时间内完成计算，使得程序可以对于任何用户交互提供即时地响应。根据光影输入的复杂度不同，多尺度法向重建的计算时间在0.5秒到3秒之间不等。

用户交互效率 本章中所有结果所需的用户交互时间均在一分钟到五分钟之间。针对输入纹理的不同复杂度算法所需的用户交互有所不同，具体而言，对于漫反射与光影的分离需要4到12个用户画刷，反射属性建模需要1到4个画刷。在图5.10 到 5.14 所展示的结果中，所有用户交互的画刷均画在输入图像上作为参考，不同类型的画刷通过颜色来区分。

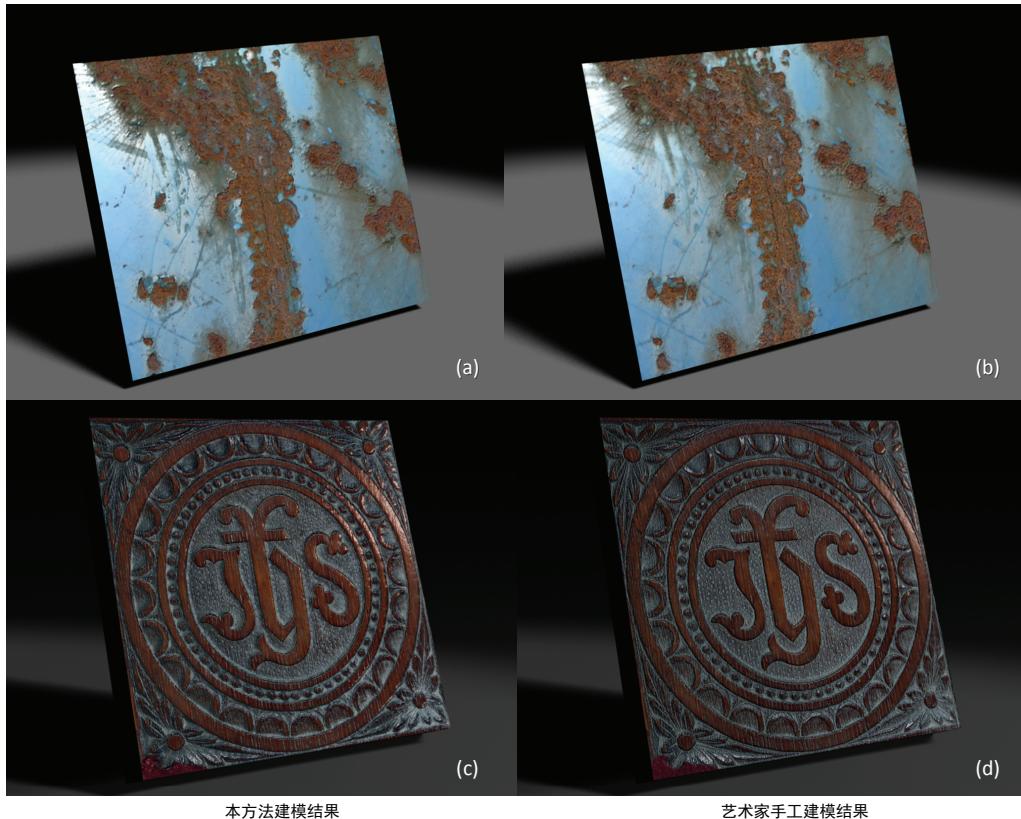


图 5.9 与艺术家手工建模的结果相比，本文中方法建模的结果具有相同的质量。相对于艺术家一个小时的手工调整，本文的方法仅需要5分钟交互时间。

与传统艺术家建模方法比较 图 5.8 与图 5.9 比较了通过本章交互式建模产生的结果与艺术家传统手工建模方法产生的结果。把光影直接作为凹凸贴图（shading-as-depth）是艺术家常用的获得凹凸质感的方法，虽然这种方法对于部分例子能够产生近似真实的效果，然而对于一些具有更加明显的凹凸所产生的输入光影（如图 5.6）这种方法将会产生不够真实，与输入所不一致的结果（如图 5.8）。相对的，本章所提出的交互式建模方法，可以重构出高质量的法向贴图，并完好地保持了不同尺度上的凹凸细节。

对于图 5.9 中的结果，艺术家根据与算法输入相同的纹理，利用多种图形图像处理软件进行手工加工，并产生出可以用于渲染的纹理材质。为了获得图中所示的效果，艺术家需要花费一个小时左右的时间来完成一个纹理的建模。通过本章提出的交互式建模方法，用户可以在五分钟之内，通过少量画刷交互，获得同样质量的建模结果。这组比较中可以明显地体现出，交互式建模的方法可以获得艺术家所需要的建模结果，同时极大的简化了手工建模的复杂度。

交互式建模结果

为了测试交互式建模算法对于不同类型的材质的建模效果，这里选取了大量不同的输入纹理进行测试，实验结果参见图 5.10 到图 5.14，每组结果包含输入纹理、对应用户交互画刷以及最终的渲染结果。不同类型的画刷用颜色进行区分，全局连续性画刷用黄色示意；漫反射纹理细节画刷用红色表示；不同的蓝色画刷代表不同类型的高光反射材质类型。

实验结果中包含了大量不同类型的材料，其中有人造材料，如：纸张（图 5.11）、雕刻品（图 5.14-a），水泥墙(Fig 5.14-b)。还包含大量的自然材质，如：木材（图 5.10-c, 5.12-a）、石材(图 5.10-a)、柏油(图 5.13-c)、金属和锈蚀(图 5.12-c, 5.13-a)。不同类型的材料涵盖了各种复杂的几何、反射属性的空间分布，体现了本章所述方法的广泛应用范围。

图5.10展示了两种具有复杂几何细节的自然材质，岩石上大尺度的几何细节和原木上细碎的几何凹凸都被很好地为本方法所刻画。对于图5.11中的褶皱纸张，具有明显的颜色边界同时在不同尺度上具有大量的凹凸几何外观，而渲染结果表明这些凹凸效果和反射材质分布均得到很好地保持。对于大量的自然材料，其反射材质与表面的凹凸细节常常混合在一起，图 5.12 的例子就属于这样一类。然而通过少量的用户交互，算法依然可以很好地重现木材复杂的光影效果，以及锈蚀金属的纹理细节。

图5.13 和图 5.14 中的例子是由多种材料构成，而每一种材料自身具有独特的空间分布和反射属性。在图5.13-a的金属部分展现出强烈的高光反光，而锈蚀的部分则具有明显的凹凸细节。我们的算法可以很好地同时重建出金属和锈蚀部分的细节，并保持两者之间的一个连续过渡。同样的例子可以参考图5.13-d 重建结果中黄色油漆部分的整体结构与柏油部分的丰富细节。

最后，在图5.14中，由于人工的加工，多种材质以一种具有明显结构化的方式相互混合。我们算法产生的结果同时保持了人工加工所造成的结果整体结构以及材料本身所具有的天然花纹和材质属性。在木雕的例子中，通过高效的高光反射建模，打磨过的木材部分体现出光滑的高光而中间灰尘的部分则体现出亚光的效果。同时在水泥石墙的结果中，可以看到石材本身丰富的细节，以及水泥与石材之间明确的边界均被很好地重建。

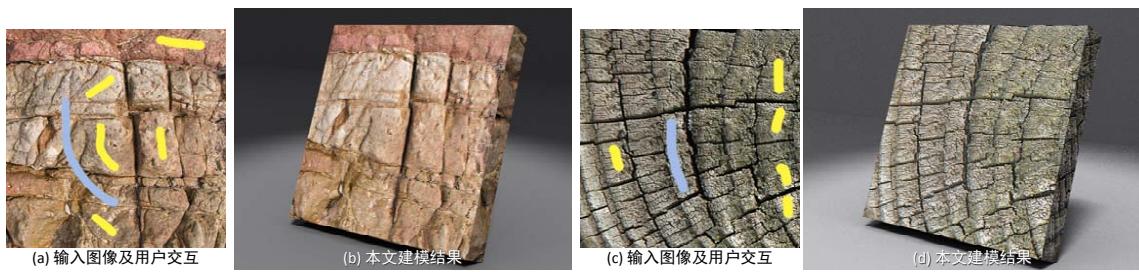


图 5.10 本文建模产生的具有复杂几何细节的自然材质：(a)(b) 石材, (c)(d) 原木。

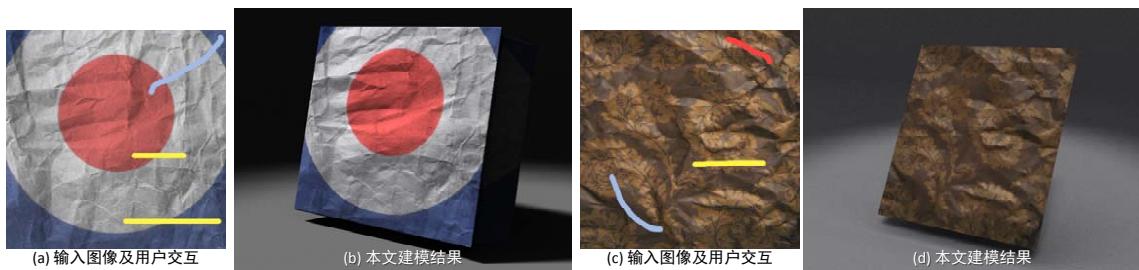


图 5.11 本文建模产生的褶皱纸张纹理。

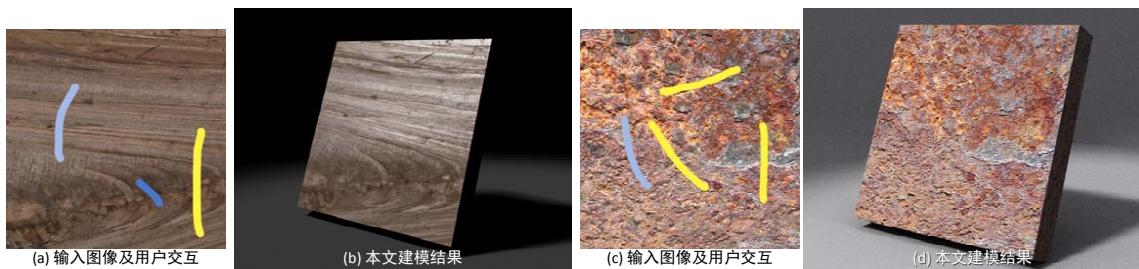


图 5.12 本文建模产生的抛光木材 (a)(b) 和生锈的金属 (c)(d)。

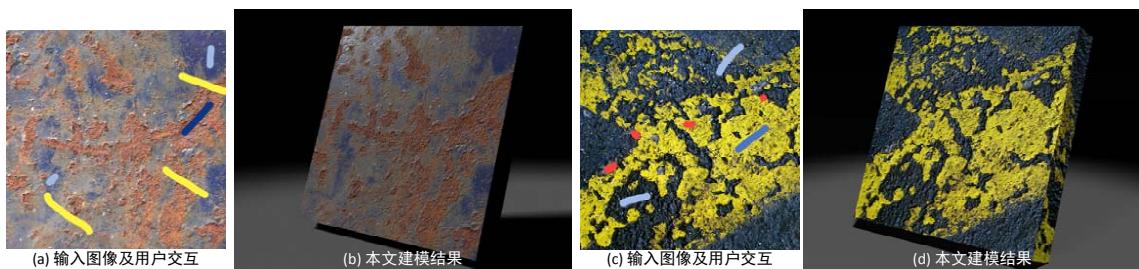


图 5.13 本文建模产生的锈蚀金属 (a)(b) 和涂有黄色油漆的柏油地面 (c)(d)。

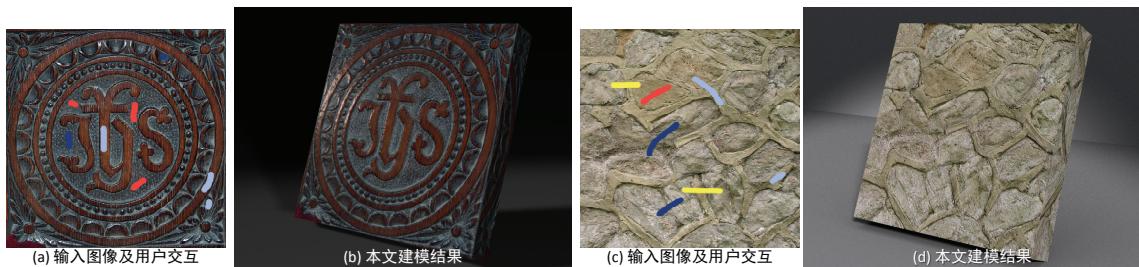


图 5.14 本文建模产生的木雕 (a)(b) 和水泥石墙 (c)(d)。

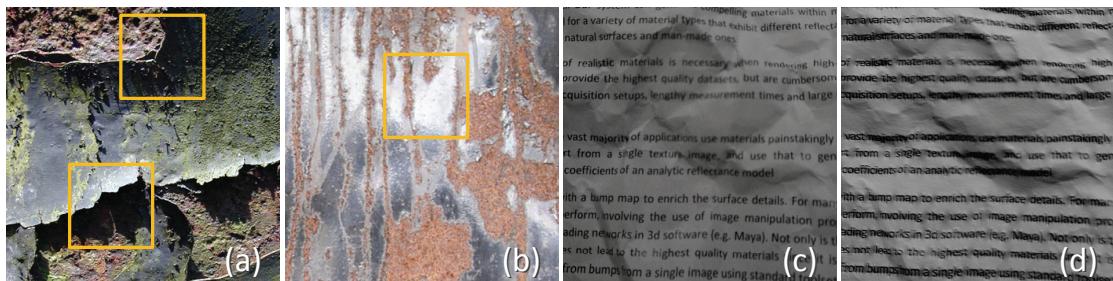


图 5.15 本文无法有效进行建模的例子：(a) 具有全局大尺度几何结构的图像。(b) 含有大量高光和阴影区域的图像。(c) 没有色调的灰度图像，材质的漫反射纹理仅有灰度变化。(d) 本文的方法无法将打印在纸上的黑色文字与灰阶的光影有效分离，并产生了错误的法向结果。

5.6 小结与讨论

局限性讨论

虽然之前的结果表明本章所提出的方法适用于广泛类型的材质，但算法本身对于输入的假设被违反时（以图5.15为例），依然无法得到正确的重建结果。算法假设输入图像来自基本平坦的材料样本，对于违反了这一假设的输入(例如图5.15(a))，将无法被有效重建。如果图像基本被高光与阴影充满(例如图5.15(b))这些像素本身的信息均已饱和无法参与建模，因此无法产生正确的结果。最后，本章所提出的漫反射与光影分离方法基于色调的假设，因此对于没有颜色变化的灰度图像，算法无法产生合理的初始分离，需要非常多的用户交互才能完成建模。图5.15(c)给出了这样一个例子，由于用户无法完成交互，因此获得的法向贴图和漫反射贴图含有大量错误的成分，并导致不正常的渲染结果。

结论

本文提出了基于用户交互的纹理建模方法。根据一张于在方向光源照射下平坦的表面纹理图像，艺术家可以少量的画刷式交互，可以通过算法产生完整的反射材质和法向贴图。大量的实验结果表明，本文提出的交互式建模方法可以简单有效地处理广泛类型的纹理材质，包括不同类型的反射材质，不同尺度和类型的凹凸细节等。该算法有效地提高了艺术家为纹理材质进行建模的工作效率，甚至在某种程度上减少了纹理材质建模所需要的专业知识，在实际的纹理建模领域中具有广泛的应用价值。

该方法基于方向光源照射的图像，而如何处理环境光照和处理复杂的阴影效果等情况将是一个非常值得研究的方向。

第6章 总结与展望

高效率的高维纹理的建模与采集是图形学研究中的一个热点和难点问题。针对这一问题，本论文通过分析高维纹理数据内部相关性，研究并提出了一系列基于稀疏材质采样数据的高维纹理建模算法。论文重点对常用的三维体纹理数据和表面反射纹理数据建模进行研究，并对其常用的建模方法：纹理合成、数据采集，和交互编辑方法提出了新的算法与改进。

基于样本的纹理合成是实体纹理建模的一种重要方法。传统的实体纹理合成方法可以从输入的二维纹理样本生成完整的实体纹理。但是，这些方法采用盲目搜索，无法将纹理合成局限在所需要的体素周围，而必须合成完整的体纹理数据。使得算法的计算量和存储量大，合成时间长。针对这一问题，本文在第3章中提出了一种高效的实体纹理合成算法。算法利用实体纹理的相关性，通过预计产生满足纹理相关性的候选三元组，有效地减少了纹理合成的迭代数目，提高了纹理合成算法效率。论文同时提出了这一算法的GPU实现，充分发挥算法高度并行化的优势，进一步提高纹理合成的速度。该算法是第一个实现空间与计算复杂度仅与空间表面的体素数目有关的快速体纹理合成算法。相比于传统算法，该方法将纹理合成所需的时间和空间开销均减少两个数量级以上，极大地提高了实体纹理合成的效率。利用这一算法，本文首次实现高质量体纹理的实时切割与交互合成。

直接采集真实世界的材质样本是空间双向反射纹理函数建模的一种常用手段。然而，传统基于全局线性模型的纹理采集算法无法充分挖掘高维纹理中的冗余信息，需要大量的采样才能进行高维空间双向反射纹理函数的重构。在第4章，本文提出了基于流形的SVBRDF快速建模算法。算法首次将SVBRDF流形模型应用于高维纹理的采集，利用稀疏采集的代表性低维BRDF和低维度key采样，重构出高分辨率的高维SVBRDF数据。算法充分利用了高维纹理的非线性相关性，极大地提高了采样效率。同时，针对稀疏数据的采集，本文设计了一种基于condenser镜片的BRDF采集方法，实现了每秒10个单点BRDF的高速采集，提高了采集效率。本文同时提出了一个非正交光源矫正算法，使得利用环境光源或面状光源进行数据采集成为可能，从而进一步简化了采集设备。相比于传统方法数个小时的采集时间，该方法采集数据仅需要20分钟的时间；在提高采集速度的同时，重构结果的分辨率比传统方法也有很大提升，极大地提高了表面反射纹理采

集效率与实用性。

在计算机图形学工业界，基于单一图像的交互式建模也是获得高质量纹理材质的重要手段。在这一过程中，艺术家根据经验，利用复杂图形图像操作对单一图像进行精细调整，创作出具有高度真实感的高维纹理。然而，由于纹理图像具有大量细节，交互往往不够直观，传统手工建模的方法往往需要丰富的经验和大量的手工调整工作。利用纹理相关性，本文在第5章提出了一种直观高效的交互式纹理材质建模系统。根据色度、漫反射纹理与光影等信息的相关性，该系统设计了针对于纹理输入的新的交互式反射光影分离算法和新的多尺度法向重建算法，使得用户通过少量交互，能够重建纹理丰富的材质与几何细节。实验结果表明，该方法适用于大量不同类型的纹理材质，具有广泛的适用性。相对于传统艺术家手工建模小时级的工作量，该系统仅需少于5分钟的简单用户交互，即可获得同样质量的建模结果，有效地提高了艺术家为纹理材质进行建模的工作效率。

数据相关性是高维纹理材质的重要属性，体现了自然世界中高维纹理不同于一般高维函数的独特性质，也是提高高维纹理建模算法效率的关键。如果算法不能有效地利用高维纹理的相关性，往往会带来数据量大、采集时间长、难以直观交互等一系列问题，并严重影响纹理建模的效率。基于数据相关性这一重要性质，算法可以从真实世界材质样本的稀疏数据出发，快速高效地构建真实的高维纹理数据。

研究前景

数据相关性具有相当广泛的研究前景。主要体现在充分利用现有数据作为先验知识，从先验知识中获取更多相关性信息，提高建模效率。另一方面，如何将基于相关性建模的方法扩展到更加广泛通用的条件，进一步减少对所需采样数据的限制也是一个值得研究的课题。

利用现有数据作为先验知识 本文提出的基于离散数据的高维纹理材质建模方法，可以简单有效地产生大量高质量的高维纹理材质。拥有大量的数据就可以基于既有数据，建立更加通用的数学模型，从这些现有的数据中抽取出具有共性的部分，用于指导纹理材质的采集与建模，进一步简化材质建模的过程。

进一步减少对所需数据的限制 本文提出的纹理数据采集方法将传统的暗房与点光源的采集环境，简化为普通的环境光源与移动面状光源的条件，减少了采集数据所对环境的限制。然而，该算法依然需要一些基本的光学校准等操作，增加

了实际操作的难度。同样的，在交互式建模中，对于输入的纹理材质对应的光照条件也有一定的限制，如何减少这样的限制，实现无需校准，或自校准的采集方法；针对更加广泛类型的输入纹理实现交互式建模将成为一个非常具有实际应用前景的研究方向。

参考文献

- [1] Nicodemus F E, Richmond J C, Hsia J J, et al. Geometric considerations and nomenclature for reflectance. Monograph 161, National Bureau of Standards (US), 1977.
- [2] Peachey D. Solid texturing of complex surfaces. Proceedings of the 12th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. ACM, 1985. 279–286.
- [3] Perlin K. An Image Synthesizer. Proceedings of ACM SIGGRAPH, volume 19(3), 1985. 287–296.
- [4] Ebert D, Musgrave K, Peachey D, et al. Texturing and Modeling: A Procedural Approach. Academic Press, 1994.
- [5] Wei L, Lefebvre S, Kwatra V, et al. State of the art in example-based texture synthesis. Eurographics 2009, State of the Art Report, EG-STAR, 2009.
- [6] Efros A A, Leung T. Texture synthesis by non-parametric sampling. International Conference on Computer Vision, 1999. 1033–1038.
- [7] Wei L Y, Levoy M. Fast texture synthesis using tree-structured vector quantization. International Conference on Computer Vision, 2000. 479–488.
- [8] Ashikhmin M. Synthesizing Natural Textures. ACM Symposium on Interactive 3D Graphics, 2001. 217–226.
- [9] Tong X, Zhang J, Liu L, et al. Synthesis of Bidirectional Texture Functions on Arbitrary Surfaces. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3):665–672.
- [10] Zelinka S, Garland M. Jump map-based interactive texture synthesis. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2004, 23(4):930–962.
- [11] Kwatra V, Essa I, Bobick A, et al. Texture optimization for example-based synthesis. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2005, 24(3):795–802.
- [12] Wei L Y. Texture synthesis by fixed neighborhood searching[D]. Palo Alto, California, USA: Stanford University, 2002.
- [13] Kwatra V, Schodl A, Essa I, et al. Graphcut textures: Image and video synthesis using graph cuts. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3):277–286.
- [14] Kopf J, Fu C W, Cohen-Or D, et al. Solid texture synthesis from 2D exemplars. Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2007.
- [15] Lefebvre S, Hoppe H. Parallel controllable texture synthesis. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2005, 24(3):777–786.
- [16] Ward G J. Measuring and modeling anisotropic reflection. Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, New York, NY, USA: ACM Press, 1992. 265–272.
- [17] Ngan A, Durand F, Matusik W. Experimental Analysis of BRDF Models. Proceedings of Eurographics Symposium on Rendering, 2005.

- [18] Wang J, Zhao S, Tong X, et al. Modeling anisotropic surface reflectance with example-based microfacet synthesis. Proceedings of ACM SIGGRAPH 2008 papers, New York, NY, USA: ACM, 2008. 1–9.
- [19] Cook R L, Torrance K E. A Reflectance Model for Computer Graphics. ACM Transaction on Graphics., 1982, 1(1):7–24.
- [20] Ashikhmin M, Premoze S, Shirley P. A Microfacet-based BRDF Generator. Proceedings of Siggraph 2000, Computer Graphics Proceedings. ACM Press / ACM SIGGRAPH / Addison Wesley Longman, 2000. 65–74.
- [21] Dana K J, Nayar S K, Ginnaken B, et al. Reflectance and texture of real-world surfaces. ACM Transactions on Graphics, 1999, 18(1):1–34.
- [22] McAllister D K, Lastra A A, Heidrich W. Efficient Rendering of Spatial Bi-directional Reflectance Distribution Functions. Proceedings of the 17th Eurographics/SIGGRAPH workshop on graphics hardware (EGGH-02), New York: ACM Press, 2002. 79–88.
- [23] Lawrence J, Ben-Artzi A, DeCoro C, et al. Inverse Shade Trees for Non-Parametric Material Representation and Editing. ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH), 2006, 25(3).
- [24] Dana K J. BRDF/BTF Measurement Device. Proceedings of eighth IEEE international conference on computer vision (ICCV), volume 2, 2001. 460–466.
- [25] Garg G, Talvala E V, Levoy M, et al. Symmetric photography: exploiting data-sparseness in reflectance fields. Proceedings of Eurographics Workshop/ Symposium on Rendering, Nicosia, Cyprus: Eurographics Association, 2006. 251–262.
- [26] Marschner S, Westin S, Lafourche E, et al. Image-based BRDF Measurement Including Human Skin. Proceedings of 10th Eurographics Rendering Workshop, 1999.
- [27] Lu R, Koenderink J J, Kappers A M L. Optical properties Bidirectional Reflectance Distribution Functions of velvet. Applied Optics, 1998, 37(25):5974–5984.
- [28] Han J Y, Perlin K. Measuring bidirectional texture reflectance with a kaleidoscope. ACM Transaction on Graphics., 2003, 22(3):741–748.
- [29] Mukaigawa Y, sumino K, yagi Y. High-Speed Measurement of BRDF using an Ellipsoidal Mirror and a Projector. Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, 2007. 1–8.
- [30] Moshe B E, Wang J, Bennett W, et al. An LED-only BRDF measurement device. Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. 1–8.
- [31] Lensch H P A, Kautz J, Goesele M, et al. Image-based reconstruction of spatial appearance and geometric detail. ACM Transaction on Graphics, 2003, 22(2):234–257.
- [32] Goldman D B, Curless B, Hertzmann A, et al. Shape and Spatially-Varying BRDFs from Photometric Stereo. Proceedings of International Conference on Computer Vision, 2005. I: 341–348.
- [33] Zickler T, Enrique S, Ramamoorthi R, et al. Reflectance sharing: image-based rendering from a sparse set of images. In: Bala K, Dutré P, (eds.). Proceedings of Eurographics Symposium on Rendering, Konstanz, Germany: Eurographics Association, 2005. 253–264.
- [34] Alldrin N, Zickler T E, Kriegman D. Photometric stereo with non-parametric and spatially-varying reflectance. Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. 1–8.

- [35] Debevec P, Tchou C, Gardner A, et al. Estimating Surface Reflectance Properties of a Complex Scene under Captured Natural Illumination. Technical report ICT-TR-06, University of Southern California Institute for Creative Technologies Graphics Laboratory, 2004.
- [36] Matusik W, Pfister H, Brand M, et al. Efficient isotropic BRDF measurement. Proceedings of the 14th Eurographics workshop on Rendering, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2003. 241–247.
- [37] Weyrich T, Matusik W, Pfister H, et al. Analysis of human faces using a measurement-based skin reflectance model. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3):1013–1024.
- [38] Bousseau A, Paris S, Durand F. User-assisted intrinsic images. *ACM Transaction on Graphics*, 2009, 28:130:1–130:10.
- [39] Wu T P, Sun J, Tang C K, et al. Interactive normal reconstruction from a single image. *ACM Transaction on Graphics*, 2008, 27(5):1–9.
- [40] Khan E A, Reinhard E, Fleming R W, et al. Image-based material editing. *ACM Transaction on Graphics*, 2006, 25:654–663.
- [41] Xue S, Wang J, Tong X, et al. Image-based Material Weathering. *Comput. Graph. Forum*, 2008, 27(2):617–626.
- [42] Dischler J M, Maritaud K, Ghazanfarpour D. Coherent Bump Map Recovery from a Single Texture Image. *Proceedings of Graphics Interface*, 2002. 201–208.
- [43] Wang X, Wang L, Liu L, et al. Interactive Modeling of Tree Bark. *Proceedings of 11th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2003. 83.
- [44] Gilet G, Dischler J M. An Image-Based Approach for Stochastic Volumetric and Procedural Details. *Comput. Graph. Forum*, 2010, 29(4):1411–1419.
- [45] Qin X, Yang Y H. Aura 3D Textures. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007, 13(2):379–389.
- [46] Hertzmann A, Jacobs C E, Oliver N, et al. Image analogies. *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, 2001. 327–340.
- [47] Lefebvre S, Dachsbaecher C. TileTrees. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, 2007.
- [48] Benson D, Davis J. Octree textures. *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, 2002. 785–790.
- [49] Debevec P, Hawkins T, Tchou C, et al. Acquiring the Reflectance Field of a Human Face. *Proceedings of Proc. SIGGRAPH 2000*, 2000. 145–156.
- [50] Gardner A, Tchou C, Hawkins T, et al. Linear light source reflectometry. *ACM Transaction on Graphics*, 2003, 22(3):749–758.
- [51] Matusik W, Pfister H, Brand M, et al. A data-driven reflectance model. *ACM Transaction on Graphics*, 2003, 22(3):759–769.
- [52] Roweis S T, Saul L K. Nonlinear Dimensionality Reduction by Locally Linear Embedding. *Proceedings of Science*, 2000. 2323–2326.
- [53] Mount D, Arya S. ANN: A library for approximate nearest neighbor searching. *Proceedings of 2nd CGC Workshop on Computational Geometry*, 1997.

- [54] Debevec P E, Malik J. Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs. Proceedings of ACM SIGGRAPH, 1997. 369–378.
- [55] Schuster W. Harmonische interpolation. Proceedings of Math. Semesterber. Springer-Verlag, 2001. 1–27.
- [56] Shirley P, Chiu K. A low distortion map between disk and square. The Journal of Graphics Tools, 1997, 2(3):45–52.
- [57] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. Proceedings of Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, volume 22, 2000. 1330– 1334.
- [58] Bertalmio M, Sapiro G, Caselles V, et al. Image inpainting. Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, New York, NY, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000. 417–424.
- [59] Shepard D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference, New York, NY, USA: ACM, 1968. 517–524.
- [60] Horn B K P, Brooks M J. Shape From Shading. The MIT Press, 1989.

致 谢

五年的博士生活，是我走上学术道路的一个开端，也是我人生一段最重要的岁月。在这博士学习生活即将结束之际，回首过往感慨良多。首先要诚挚的感谢我的导师沈向洋教授，从最初科研能力训练，选择博士研究课题开始，沈老师便以其丰富的科研经验为我指明正确的研究方向。在博士研究期间，沈老师不仅以其高屋建瓴纵观全局的视点为我的科研指点迷津，他更是注重对于我作为一个合格科研人员品质的培养。沈老师以其自身严谨的治学之道，不知疲倦的科研态度和永不停息地追求卓越的精神，为我树立了一生学习的典范。他的教导将激励我在今后的学术道路上励精图治，不断创新。

同时还要以诚挚的心意感谢微软亚洲研究院的童欣研究员，感谢他对我博士期间科研工作的全力支持和悉心指导。在我博士期间的大量科研工作都离不开童老师的具体指导，童老师在纹理建模领域的丰厚知识和科研经验对我的博士研究起到了巨大的推动作用。同时，感谢微软亚洲研究院网络图形组的全体同仁和实验室的所有同学，他们在我的博士研究中给予了大量的帮助，也让我的博士生活更加多彩。

感谢微软亚洲研究院的王嘉平研究员，Stephen Lin研究员，感谢法国INIRA的Sylvain Lefebvre教授，感谢美国达特茅斯大学的Fabio Pellacini教授，感谢我的所有科研合作者，没有你们的帮助，将不会有我今天的成绩。

感谢清华大学计算机系的胡事民教授，在我博士研究期间，胡老师无私的给予我大量的帮助。同时，胡老师热心的组织海内外在计算机图形学界的清华校友一起交流，为我们创造了良好的学术氛围。感谢清华大学高等研究院，高研院为我创造了理想的生活环境，并让能有机会和真正的潜心学术的大师们一起共同度过五年时光，可以说高研院时刻以其学院派的气质熏陶着我。感谢吴念乐老师，感谢徐湛老师，是他们用默默的辛勤工作才为我们营造这样一个良好的生活和工作的环境。感谢姜久红老师，感谢李丽老师，感谢你们用细致的工作帮我处理学校的各项事务。

最后，谨以此文献给我的父母，没有他们的默默支持，将没有我的今天。为了论文和科研工作，我对父母的关心和孝顺少了许多，因此我希望这本论文能够作为最好的回报来献给他们，祝他们身体健康！

声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名： _____ 日 期： _____

个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果

个人简历

1984年3月6日出生于北京市。

2002年9月考入清华大学自动化系自动化专业，2006年7月本科毕业并获得工学学士学位。

2006年9月免试进入清华大学高等研究院攻读工学博士学位至今。

发表的学术论文

- [1] Dong Y, Lefebvre S, Tong X, Drettakis G. Lazy Solid Texture Synthesis. *Computer Graphics Forum*, 2008, 27(4):1165–1174, (SCI:334LP)
- [2] Dong Y, Wang J P, Tong X, Snyder J, Lan Y X, Moshe B E, Guo B N. Manifold Bootstrapping for SVBRDF Capture. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(4):1-10 (SCI:624GZ)
- [3] Dong Y, Wang J P, Pellacini F, Tong X, Guo B N. Fabricating Spatially-Varying Subsurface Scattering. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(4):1-10 (SCI:624GZ)
- [4] Wang J P, Dong Y, Tong X, Lin Z C, Guo B N. Kernel Nyström method for light transport. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(3):1-10, August 2009. (SCI:487MF)
- [5] Lan Y X, Dong Y, Wang J P, Tong X, Guo B N. Condenser-Based Instant Reflectometry. *Computer Graphics Forum*, 2010, 29(7):2091–2098 (SCI:666YQ)
- [6] Wang J P, Zhao S, Tong X, Lin S, Lin Z C, Dong Y, Guo B N, Shum H Y. Modeling and Rendering Heterogeneous Translucent Materials using Diffusion Equation. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(1):1-9(SCI:290KI)