

指导教师： 杨涛

提交时间： 2015.3.29

The task of  
**D**igital Image Processing

数字图像处理

School of Computer Science

No: 第一次作业

姓名： 喻铭文

学号： 2012302469

班号： 10011204



# 自然光照的多视点形状和反射

Geoffrey Oxholm 和 Ko Nishino (著)

美国费城卓克索大学计算机系 (邮编 19104)

[{gao25,kon}@drexel.edu](mailto:{gao25,kon}@drexel.edu)

## 摘要

这个世界充满了复杂的反射物体，处在复杂的光照环境中。然而之前在全 3D 几何恢复方面的工作已经尝试了将其构建为简单的模型反射（朗伯体，镜像，或弥漫性+镜面）或照明（一个或多个点光源）来处理。虽然，最近在直接利用这种复杂性回收单视图几何方面有一些进展，但我们依然不清楚这种单一视图的方法怎样才能扩展重建完整的几何。为此，我们推导出一个将蕴含丰富信息的信号嵌入到复杂外观中的几何概率估计方法。虽然每个观测只提供了部分的和不可靠的信息，我们还是展示了对于不同的外观估计的反射率是怎样的，并结合嵌入在每个观察中的定向线索来重建基础几何。我们已证明了我们的方法对于合成的物体以及真实世界的物体的效用。结果表明，我们的方法能够准确地展示很大范围的现实环境以及介于极端之间的反射率，这是我们之前工作的焦点和重心。

## 1. 简介

我们这个世界的漂亮来自于复杂反射率和丰富的光照环境的部分相互作用。过去在全 3D 的几何估计上的工作主要集中在

压缩这一复杂性来适应简单模型。反射率经常被假定为朗伯体，镜像，或漫加镜面；照明被认为是简单的，通常是一个点光源。最近人们在直接利用单视图几何估计[ 16 ]恢复复杂的现实世界外观方面取得了一些进展。然而，目前尚不清楚怎样用这种单一视图方法来扩展重建完整的几何。

多视点立体的基础是光度的概念一致性。对于朗伯对象，例如，多观察使我们瓜分对象的每个体素空间试验与观测图像的一致性[ 20 ]。即，由于视点独立的外观朗伯材料，真正包含的体素表面必须具有相同的外观时，投射到每个图像。如果对象有一个更复杂的反射，通过控制照明我们可以推断每个像素的方向（表面法线）的每个观测。我们可以把一个类似的取向一致性度量[ 5 ]。虽然已经有许多其他的表达一致性的概念的方法（其中一些下面讨论）是通过一个简单的使每个模型的光照或反射，排除许多现实世界中的设置。

在本文中，我们介绍的方法，采用我们可以直接（或被动）获得（12 校准图像的对象和一个照明环境的全景图）估计我们不能（反射特性物体的全三维几何）。本文的主要贡献这项工作是一个概率的三维几何反射系数的估计方法，充分利用的复杂性非平凡的和不平凡的光反射率。我们使用的三角网格模型链接的观察，因此，嵌入在每个观察方向的线索可限制每个端面的位置。在图像中的像素的外观提供多式联运可能的取向分布，形状这取决于环境照度和反射对象的属性。这些像素的反射独特的场景组

件（如太阳）提供更强的约束，而那些反映描述性成分少（如天空或树）提供了较弱的约束。这样的弱约束，然而，变得强大的时候，多观察取向分布，证实了一个严格的方位。我们的整体方法是共同保持一固定的反射率和形状优化当其他的优化。我们使用的反射率模型定向统计 BRDF 模型[ 12, 14 ]。我们使用的轮廓交叉口作为起点。

我们测试我们的方法在合成数据和现实世界中的对象。综合实验表明，该方法在广泛的现实世界的照明性能良好环境和广泛的现实世界反射率。进行定量的真实评价，我们引入一个新的数据集包含四个对象我们已获得地面真实几何和图像在三个不同的室内和室外的位置。

## 2.相关工作

多视图几何估计领域得到了多年来[ 19 ]的关注。在这里，我们将只关注这些方法有一些重要的相似性我们的方法。

光度一致性概念（讨论以上）起到了许多方法[ 10, 22 ] 20 个角色。脑桥等人。[ 17 ]扩展使用基于块的比较的概念而不是一个简单的单体素强度的比较提供灵活性的变化在辐射。金等人。[ 6, 7 ]超越了朗伯反射率的概念扩散加上镜面模型通过测量辐射等级张量场在许多（40）图片。在这项工作中我们通过复杂的自然光照下的工作更进一步，与一般 dsbrdf 反射模型[ 12, 14 ]，以一个更稀疏（12）图像集。

埃尔南德斯等人。[5]利用光度立体转换每一个观察到一个可靠的几何位置的观察在一个表面的正常场的形式通过几个一个移动的点光源下的图片。特里尔等人【21】允许任意物体，但假设反射通过观察一个球体的外观被称同一材料的。通过比较在外观上的变化每个对象上的点，每个点上球，他们也得出一个可靠的表面正常场每个观察位置。然后估计方法三维几何图形，与新创建的一致几何观测。虽然我们的总体思路是还可以使用从观测方向的线索，我们这么做没有控制照明，并没有这样的限制关于对象的反射特性的假设。为了提取这一设定方向的线索，我们把最近的工作在从明暗恢复形状。

在体情况下，已取得由观察到的自然光照来充分表示近似球形的参数谐波上的重大进展。约翰逊和阿德尔森的作品[8]利用这一推断表面取向，和反照率一个对象。巴伦和马利克[2, 3]进一步表明光照参数和物体的镜面集锦也可以估计。复杂的反射，但，没有这样的近似的照明可以。例如镜像反射，极端的情况下，直接反映固有的非参数化环境周围的物体。

在阿达托镜像反射的情况下，等。【1】观察反射，流量未知，照明一个已知的相对运动的环境推导出物体的形状。为了有效地旋转的环境，然而，这种方法需要这之间的关系，相机和对象固定，并能够在一起。

对非朗伯体的情况下，在最近的工作中我们发现怎样的对象上的点的出现只能多模态的非参数分布，可能的方向[16]。较强

的先验知识就可以实施以降低歧义，估计单视图几何。我们的在这项工作中的主要贡献是一个典型的结合方式这些复杂的分布，从不同的观察提取几何（和反射）的对象。

### 3. 贝叶斯形状和反射率的估计

一个物体的外观是由于光照，观测条件下，物体的形状，和它的反射。我们假设是已知的但不可控制的自然光照光照我，客体材料具有各向同性的反射功能，它已被分割的背景。我们还假设我们有多组图像  $I = \{I^1, \dots, I^n\}$  从经校准的相机。这些假设可以满足使用现有的工作（SFM 可如果周围的环境是足够丰富的功能）。

我们的主要贡献是一个概率框架其余部件的几何估计  $G$ ，和反射  $\Psi$ 。我们制定为最大后验概率（MAP）的后验分布估计

$$p(G, \Psi | I) \propto p(I | G, \Psi) p(G) p(\Psi), \quad (1)$$

其中的可能性  $p(I | G; \Psi)$  几何和反射与观测，并先验概率  $P(G)$  和  $P(\Psi)$  编码的实际限制。

为了找到优化的几何形状和反射后，我们采用一个迭代的方法，保持一个固定在估计其他。在接下来的章节我们描述了如何我们所代表的几何  $G$ ，和反射  $\Psi$  和我们的估计，我们讨论了整体优化策略及实施注意事项。

#### 3.1 形状和反射

首先我们将描述我们的估算方法基于对象的图像对象的形

状，照明环境，与目前的反射率 $\Psi$ 作为输入。

### 3.1.1 每个图像告诉我们什么

让我们从现在开始，在一个单一的形象 $I \in I$ 单像素 $I_x$ 例如，考虑图 1C 像素用橙色。该像素的外观是由于反射 $\Psi$ ，光照环境，和基本取向  $N_x$  的对应的表面点，再加上一点均方差的高斯噪声，

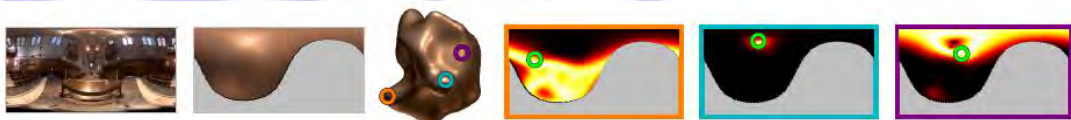
$$I_x = E(\Psi, L, N_x) + \mathcal{N}(0, \sigma^2). \quad (2)$$

可能因此以高斯形式为中心预测的辐射出这里我们使用日志强度以及集锦保持微妙的细节敏感，

$$p(I_x | N_x) = \mathcal{N}(\ln(I_x) | \ln(E_x), \sigma^2). \quad (3)$$

定位  $N_x$  (唯一的自由参数) 确定什么半球的光线会被反射调制综合形成的外观。如图所示图 1b 中，由于预测的辐照度的函数  $N_x$  (它本身可在二维球面坐标表示我们可以想象为一个二维球面全景。请注意，只有图像对应的一半面对半球摄像机填满，而自我封闭的一半是亮灰色。

可能会显示类似，通过计算公式 3 为每个方向的球面全景图。三例在图 1D 亮度值显示对应于较高的概率方向。注意的例子 1 和 3 没有明确的最低；真正的方向底层的表面上的点 (这是一个绿色的圆圈) 很少能直接推断出外观。



a.照明      b. 反射图      c.观察      d.彩色编码的例子 (亮像素可能更大)  
 图 1。定位似然球形全景照明 (一) 和反射相结合, 形成一个复杂的反射图 (b)。这是与所观察到的外观在观察像素比较 (C), 我们到达了一个非参数分布方向 (D)。绿色的圆圈表示对应的像素的真实取向 (排序从左到右, 和颜色编码)。

### 3.1.2 一个统一的坐标系

在单一图像 (SFS) 的情况下, 下一步将确定每个像素的最有可能的方向。暖昧分布如图 1d 的使这个问题在约束。添加一个平滑约束 [16] 能帮助, 但将失败时, 整个地区有暖昧的表现。了解表面曲率 [3] 地址约束这一点, 但无法解释的深度不连续性。正是在这里, 多观察成为必不可少的由于每个观测是在单独的约束可能的取向分布。为了比较观察不同的图像, 但是, 我们必须首先将来自不同图像的区域来提供一个方法同一物体表面上的位置。

图 2 说明了一个单一的几何模型可以用于协调观测。在库中我们看到真实物体受到粗几何估计。如果我们把一个点  $P$ , 和项目为每个观察图像我 2 我我们然后可以计算的似然密度点作为单独的观察产品。

$$p(\mathcal{I}_P | N_P) = \prod_{m \in \Omega_P} p(I_P^m | N_P), \quad (4)$$

在我来的地方  $P$  是图像的投影点  $P$  的外观  $M$ , 和  $P$  是图像, 可以查看点集。注意,  $P$  (IMP Beach) 是方程 3 相同, 但对背投影表面点。

两个例子示于图 2。在案例研究左 (一), 成像点  $P$  是非常接近真正的几何。一个直接的结果是, 实际拍摄外观是在  $I_1$  相



同的表面点 I4。这两个观测方向的分布因此，重叠好，和由此产生的分布关键是集中，一个小区域（明亮）。

对例子的网格的右侧，我们看到的投影一点 Q，远离真实的表面除去。这样做的后果是，两成像表现由于这一点实际上是不同的真正的对象的点。由于成像几何图像 i5 是面向上，和成像几何 i7 向下取向，取向分布不重叠。在这种情况下，我们可以看到，导致分布具有点问：没有明确的方向。

### 3.13 曲面片

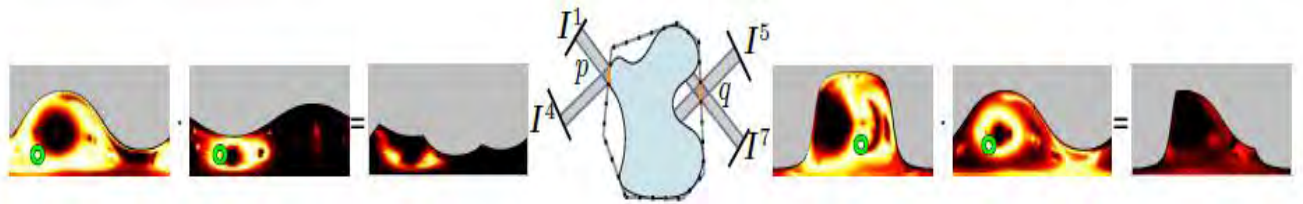
现在我们已经看到如何将多个观测得到更严格的取向分布，我们会最后把我们的注意力，恢复一个完整的三维模型。通过聚焦对模型的 F 2 G 方面，我们提供了一种方法使用定向线索推断出完整的三维几何。的目标便是变形的网格点，使面取向的意见是一致的。

为了充分利用高分辨率的观测图像，我们以 J 均匀分布的样品从一个方面平均一下（在我们的情况下，J = 6），

$$p(I_f^m | N_f) = c \sum_{j=1}^J w_j \cdot p(I_{f,j}^m | N_f), \quad (5)$$

其中权重 WJ (PWJ = 1) 较高样品附近的小中心，和 C 是保证分布集成了一个。这是由分工完成采样重心的参数化方面，和权重设置为等于最小的重心坐标值。在这里，IMF; J 表示一个特定的像素在小 F 个样本观察点面最终可能是那么每幅图像分布的产品（如公式 4），

$$p(\mathcal{I}|N_f) = \prod_{m \in \Omega_f} p(I_f^m | N_f). \quad (6)$$



(a)观察一致 (b)网格，真正的对象，并观察 (c)观察不一致

图 2。非参数方向的一致性，当一个点在网格(虚线)是准确的，观测会同意(一)，导致在一个清晰的峰密集取向分布(亮区)。当点不一致，意见不同意(C)，导致在一个平坦的，接近于零的分布。

### 3.1.4 形状的概率估计

现在，我们已经描述了如何形成的可能性一方面，我们可以表达公式 1 的可能性，在所有方面的产品，

$$p(\mathcal{I}|G) = \prod_{f \in G} p(\mathcal{I}|N_f). \quad (7)$$

最后，我们将三先验网格本身， $P(G) = P_C(G) P_A(G) P_E(G)$ 。  
 第一优先的灵感来自最近的在极小曲面的约束[3]工作。传播准确的区域形状的那些远离真正的删除表面(图 2C)，我们鼓励当地的曲率是恒定的。这是近似的角度的变化每个面与面之间的正常一定的距离

$$p_c(G) \propto \prod_{f \in G} \exp \{ \beta_c \text{Var} [\arccos(N_f \cdot N_{f,n})] \}, \quad (8)$$

C 控制现有的力量。法线的设置股骨颈骨折; ng, 方差的计算包含这些方面是从面本身有一定的距离。对现有的只在附近, 例如, 方面共享一个共同点 F 可以用。对现有的多方面的全局, 躺在周

围的 F 环可用于后续的。在 4 节，我们描述使用此之前。

剩下的两个先验是由于我们隐含的假设那些组成的三角形网格。我们的地区现有的 PA (G) 有助于确保所有具有大致三角形同样大小的比较它们的面积 (F) 为初始均值和方差

$$p_a(G) = \prod_{f \in G} \mathcal{N}(A(f) | a, \beta_a \sigma_a^2), \quad (9)$$

在控制现有的力量。我们的最终现有 PE (G) 另外有助于确保三角形大致等边使每个三角形内的样本可能被认为是对实际表面相对较近的，

$$p_e(G) \propto \prod_{f \in G} \exp \{ \beta_e \text{Var}[f_e] \}, \quad (10)$$

而  $f_e$  是一个边缘的 E 面长度，然后 E 控制现有的力量。

### 3.15 参数的分布

由于小的似然性 P (如果 JNF) 是非参数因为他们依靠固有的非参数照明环境。正因为如此，直接优化是顽固性 (图 2 中的可视化本身的离散近似)。为了优化不进行彻底的搜索，我们需要一个方法参数化的分布，同时提供忠实一种避免局部极小。

这样做，我们首先选择一组有限的 L 方向  $f_{nl}$  通过均匀采样单位球面。我们再编码分布的冯米塞斯 Fisher 分布的混合围绕这些方向。浓度 (扩散) 每个分布的 L 是概率比例相应的取向 NL 的公式 6 计算 (在我们的情况下， $L = 200 P(NF)$ ),

$$p_{\text{approx}}(\mathcal{I}_f | N_f) \propto \sum_{l=1}^L C(\kappa_l) \exp \{ \kappa_l N^l \cdot N_f \} \quad (11)$$

其中  $C(L)$  是一个归一化常数。

这一提法有几个好处。原始分布可以以相同的概率有大面积由于无纹理区域的照明环境导致模糊的梯度。分布参数模型，另一方面，只会有一零个梯度在当地的最大值和最小值。此外， $L$  值可以调整，以避免局部最大值。在我们的例子中我们设置  $L = 1024$  和增加 128 的每一次迭代。

### 3.2 定向统计 BRDF 模型

模型的反射函数，我们采用定向双向反射分布函数的统计 (dsbrf) 模型，由西 [14] 和后来的介绍，15 扩展 Lombardi 和西 [12] 估计的反射在自然光照。该模型提供了一个紧凑的各向同性 BRDFs 表示和自然搭配一个简单的，数据驱动的前。

采用线性摄像机，照度

$$E_x = \int \varrho(t(\omega_i, \omega_o); \Psi) \mathbf{L}(\omega_i) \max(0, \mathbf{N}_x \cdot \omega_i) d\omega_i, \quad (12)$$

其中  $T$  是一个函数，将输入的！我和外向的！ $O$  角到备用的 BRDF 参数变量  $D$  和  $H$  反射函数表示为一个裂片

$$\varrho^{(\lambda)}(\theta_d, \theta_h; \kappa^{(\lambda)}, \gamma^{(\lambda)}) = \sum_r \exp \left\{ \kappa^{(r, \lambda)}(\theta_d) \cos \gamma^{(r, \lambda)}(\theta_d)(\theta_h) \right\} - 1, \quad (13)$$

在中间向量参数化半矢量和差矢量) [18] 使用。() 和 () 函数编码分别在反射，大小和尖锐的，沿跨度的  $R$  叶为一个特定的颜

色通道。这些曲线被建模为对数线性组合数据驱动的基础功能

$$\begin{aligned}\kappa^{(r,\lambda)}(\theta_d) &= \exp \left\{ b_\mu(\theta_d; \kappa, r, \lambda) + \sum_i \psi_i b_i(\theta_d; \kappa, r, \lambda) \right\}, \\ \gamma^{(r,\lambda)}(\theta_d) &= \exp \left\{ b_\mu(\theta_d; \gamma, r, \lambda) + \sum_i \psi_i b_i(\theta_d; \gamma, r, \lambda) \right\},\end{aligned}$$

其中  $B$  是指基础功能，二是与基础功能，我是 dsbrdf 系数。我们可以从一组测量的反射率计算这些基础功能使用功能的主成分的功能分析 (FPCA)。

### 3.2.2 估计概率反射

为了估计参数我们继续公式 1 的概率公式。在这里，可能是同上，虽然几何，因此表面 NF- $\kappa$  B 的面方向，保持固定

$$p(\mathcal{I}|\Psi) = \prod_{f \in \mathcal{G}} \prod_{m \in \Omega_f} \mathcal{N}(\ln(I_f^m) | \ln(E_f^m), \sigma^2), \quad (14)$$

在哪儿  $F$  又是图像组在这方面出现  $F$ ，和 IMF 是指在中心出现在图像  $M$  面，和 EMF 是指其预测的辐照度。

我们利用现有朗伯体 [12]，这鼓励了我 2 的本征函数的系数在被观察到的反射率的分布，

$$p(\Psi) \sim \mathcal{N}(0, \beta_\Psi \Sigma_\Psi), \quad (15)$$

在协方差的计算从梅尔数据库 [13]，和标量控制现有的力量。

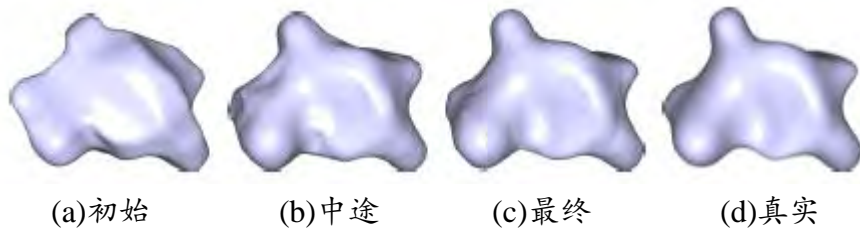


图 3。形状优化迭

#### 4.优化与实现

我们的整体优化方案之间交替计算高斯噪声，并估计的最大后验概率（MAP）估计的反射参数及其几何  $G$ 。这呢优化框架迭代直到收敛，通常在 6 次迭代。找到地图的估计反射参数和几何我们最小化利用梯度下降法相应的对数后验概率。所以这一组先验权重可以使用，所有的图片调整后的常数因子，这样的平均强度照明环境 1。

引导过程中，第一步是提取为对象的几何形状的粗略估计。像许多其他作者所做的一切，我们假设对象被分割从背景，使我们能够利用视觉劳伦蒂尼[ 11 ]的船体工作初始化我们的几何估计。然后重新三角化网格使用泊松重建[ 9 ]，和小三角形的崩溃有助于规范的三角形的面积。这样做的结果步骤是在图 3a 所示。与初始几何估计在的地方，然后执行第一反射率估计迭代。现有的权重设置为 23。

精制时采用一个额外的几何节省时间的逼近。我们假设每个摄像机是远远不够的，平均收视对象方向是足够接近实际像素浏览方向（即，正交相机）。这个假设让我们预先计算为一个单一的反射图摄像机姿态，适用于图像中的每一点，加速公式 3 的计

算。

几何估计迭代遵循粗 to fine 方法：基于曲率的平滑尺度事先定义的方程 8 中的迭代减少采摘组方面，方差的计算。

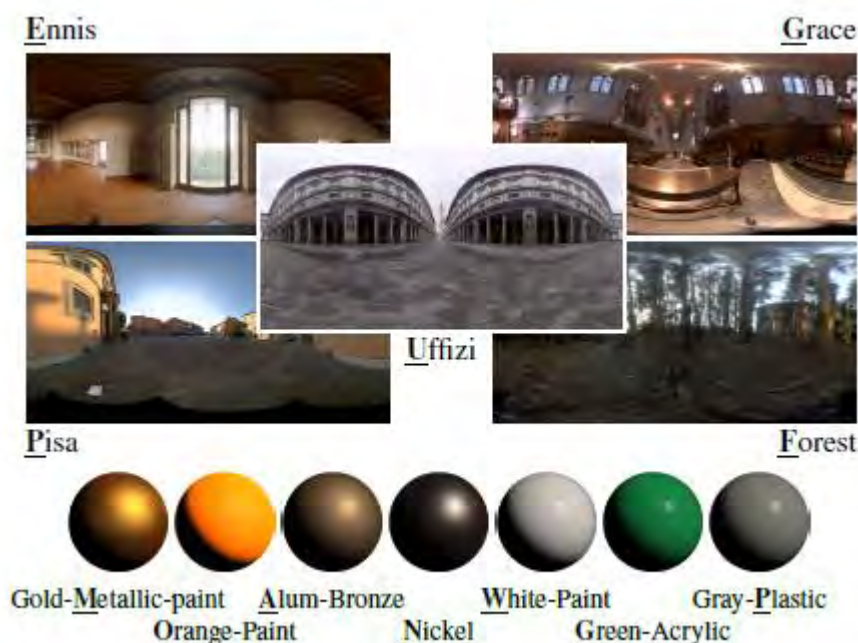


图 4。合成数据。我们的合成数据是由渲染 10 形状 [8] 7 真实世界的物体 (下) [13] 下 5 个真实的自然光照环境 (上) [4]。

设定选择包含有距离方面 3 个三角形的了。在随后的迭代，这个号码下降，直到一个共同点三角形的局部曲率约束的影响。现有权重被设置为  $C = 2$ ,  $= 1$ ,  $E = 0$  点 05。

在整个优化过程中考虑当计算图像遮挡 F 包含一方面。我们不这样做，然而，任何全球光传输模型阴影或相互反射。此外，样品是在放牧的角度观察，(一角大于 75 的观看方向) 被丢弃。这个阈值选择避免过度约束的可能性在几何细化的情况下的分布，误导和掠角反射特性的的反射率的估计情况。最后，为了保持体积和中心附近的常数，我们中心和调整在每次迭代的结果。

## 5 实验评价

我们评估我们的定量的两个数据库的方法：一种人工合成的数据库，和一个新的现实世界的数据集地面真实几何。因为没有其他方法全三维形状恢复自然任意反射率照明，我们不能有任何直接比较。

量化的几何精度估计我们在估计各点的距离来计算几何对真实对象。然后我们计算均方根误差 (RMS) 的边界的百分比框对角线长度的地面真理的对象。如果，例如，真正适合的对象在一个盒子里有米的对角线，一 1 % 的错误表示的均方根误差为 1cm。

### 5.1 合成数据的评估

在理想的光照环境下的估计一个朗伯对象几何是一个数，不同的表 1。合成的结果显示平均每个细胞的总结均方根误差几何或反射率在 10 个斑点的照明（行）和反射（列）的组合。标题对应于图 4 中的黑体字。快速检验，低误差给出一个明亮的背景色。最后行和列的手段。9 的图像中使用的每一个场景。



|              |      | Reflectances |       |       |       |       |              |              |       |
|--------------|------|--------------|-------|-------|-------|-------|--------------|--------------|-------|
|              |      | M            | O     | A     | N     | W     | G            | P            | mean  |
| Environments | P    | 0.44%        | 0.46% | 0.53% | 0.59% | 0.52% | 0.47%        | 0.49%        | 0.50% |
|              | G    | 0.49%        | 0.51% | 0.57% | 0.53% | 0.67% | 0.57%        | 0.52%        | 0.55% |
|              | F    | 0.50%        | 0.51% | 0.61% | 0.59% | 0.60% | 0.59%        | 0.59%        | 0.58% |
|              | E    | 0.52%        | 0.60% | 0.57% | 0.56% | 0.60% | <b>0.98%</b> | 0.68%        | 0.64% |
|              | U    | 0.65%        | 0.53% | 0.68% | 0.85% | 0.74% | 0.71%        | <b>0.95%</b> | 0.70% |
|              | mean | 0.52%        | 0.54% | 0.59% | 0.58% | 0.63% | 0.68%        | 0.64%        | 0.60% |

(a) Geometry errors

|              |      | Reflectances |      |             |             |      |      |      |      |
|--------------|------|--------------|------|-------------|-------------|------|------|------|------|
|              |      | M            | O    | A           | N           | W    | G    | P    | mean |
| Environments | P    | 0.90         | 0.27 | 0.61        | 0.92        | 0.56 | 0.21 | 0.37 | 0.56 |
|              | G    | 0.57         | 0.22 | <b>1.20</b> | <b>1.08</b> | 0.55 | 0.24 | 0.32 | 0.55 |
|              | F    | 0.67         | 0.26 | 0.75        | <b>1.19</b> | 0.50 | 0.20 | 0.32 | 0.50 |
|              | E    | 0.82         | 0.22 | <b>1.17</b> | <b>1.13</b> | 0.47 | 0.26 | 0.48 | 0.48 |
|              | U    | 0.75         | 0.25 | <b>1.72</b> | 0.92        | 0.60 | 0.23 | 0.36 | 0.55 |
|              | mean | 0.75         | 0.25 | <b>1.17</b> | <b>1.08</b> | 0.55 | 0.23 | 0.36 | 0.55 |

(b) Reflectance errors

表 1。合成的结果显示平均每个细胞的总结均方根误差几何或反射率在 10 个斑点的照明（行）和反射（列）的组合。标题对应于图 4 中的黑体字。快速检验，低误差给出一个明亮的背景色。最后行和列的手段。9 的图像中使用的每一个场景。

蕴涵的彩色点光源。由此产生的外观将仅取决于之间的相对角度表面点的方向和灯。这种照明环境，然而，提供一个无望的对于镜像对象集稀疏方向的线索，如只有几个点上的对象将反映在任何光。对于镜像对象，另一方面，最理想的光源环境是一个取向反映了独特的照明值。朗伯反射，在这的情况下，将无望的模糊的细节。现实世界的启示和反射率，然而，在于在这极端的。为了测试反射和光照的作用在形状估计，我们已经进行了数百具有广泛的实际环境的实验和 BRDFs。

图 4 给出了我们的综合数据的概述。注意黑体字，它们如表 1 中的指标。每个这 10 个斑点从 blobby 形状数据库 [ 8 ] 呈现 5

公开可用的光照环境[ 4 ]7 种不同的测量物体从 MERL 数据库 [ 13 ]。在训练前的反射模型，地面 BRDF 是略以确保一个公正的评价

表 1 给出了我们的几何和反射概述估计在 9 的图像被用于。我们在左边分析的 35 个不同的照明几何误差和反射的组合（平均超过 10 形状）。每行和列对应的光照环境和反射率，如图 4 所示，分别。最后一行，列显示平均相应的照明或反射。

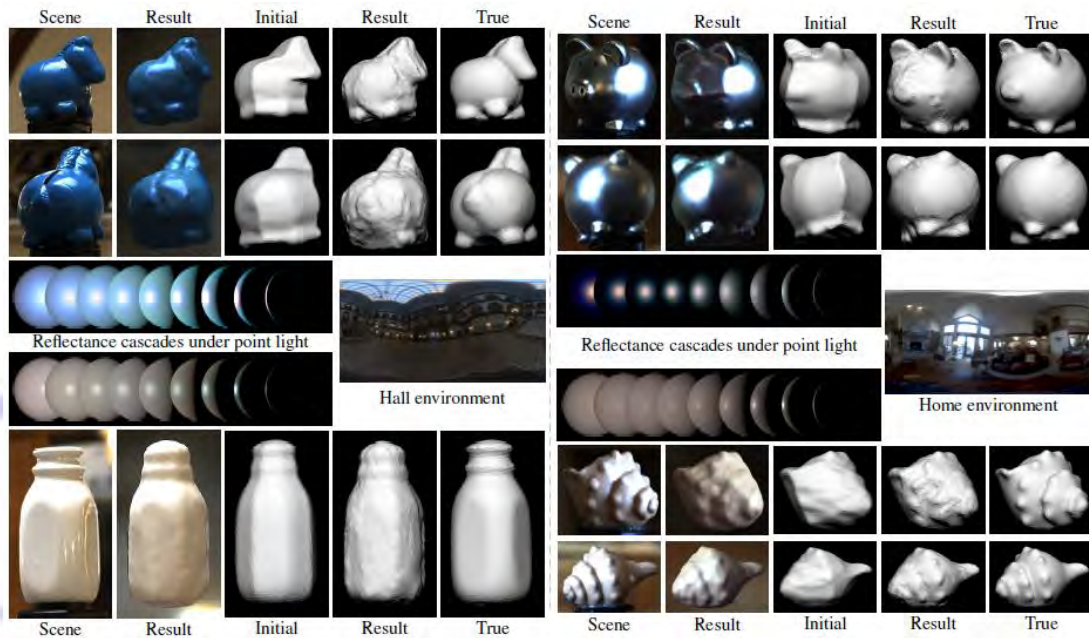


图 5。现实世界的小说观的结果在每段前两列比较完整的外观，而最后三呈现一个扩散模型强调几何差异与初始估计和真实。中心图像显示捕获的光照环境和回收的反射率与移动点光源领域呈现。

在每一个列的表结果的一致性 1B 清楚地表明，一定的反射率很难准确估计比别人。最值得注意的是，两金属铝青铜（一）和镍（N）显示了最高的错误。这些材料表现出一些不同寻常的掠角反射性能是很难恢复。另外，反射率如橙色（O）和绿色（G）丙烯酸，然而，更准确的估计是一致的。

表 1A 显示几何结果。作为一个基线，这些数字应该是平均初始相比 19 % 的均方根误差，所以即使在最坏情况下的误差是明显减少。最糟糕的几何估计结果，用均方根误差 0:98 %，来自绿色丙烯酸 (G) 在 Ennis 反射 (E) 照明环境。这可能是由于缺乏绿色在现场，使外观主要是由于该光从门口的中心。由于对不同，与平滑变化的颜色，强度，和纹理在现场，比萨 (P) 的光照环境了最佳的综合性能，平均 RMS 0:50 %。只有一个反射是在这样的环境下的挑战—镍 (n)，只有微弱的漫反射部分。的最好的反射，金金属漆 (M)，是最好的两个世界强大的弥漫性，中度反射分量。这使得外观捕捉低频和照明的高频细节。

## 5.2 现实世界数据评估

定量评价我们对真实世界的对象的方法我们引入一个新的数据集的数据集包含 1。四物体成像在三个不同的室内和室外从多个角度 (约 18) 使用环境在两个不同高度的三角架。随着高动态范围范围 (HDR) 图像，数据集包含的 HDR 光照图的多个图像采集采用钢球，和真实的物体的三维模型获取使用激光条纹测距仪和手动完成。

图 5 显示了几个结果。对于每一个结果的一个或两个小说观效果图显示，(即观点不在估计过程中使用)。弥漫性效果图最初的，最后的，和真实的几何形状包括视觉比较。注意物体的底面没有相机由于支持结构可见。这作为一个直接后果，复杂的基础对象在更高的误差结果。还请注意，成像照明在一个低通滤波器

的环境的必然结果真实的光照环境的精细压缩为粗像素。这具有降低的影响在呈现的结果锐度集锦。回忆第 4 节，我们忽略了观测放牧角角由于不规则的反射特性，和潜在的不准确的对象分割。因此，该反射在这样的角度表现出一定的误差估计。总体估计的反射率是相当合理的，可以看到在瀑布和渲染的结果。

第一照明环境，一个大厅，有一个从山顶到适量的自然光现场，但主要是被几灯放置均匀地分布在环境。牛奶瓶，虽然一个相当简单的形状，最有挑战性的反射由于其高度反光釉。因为在最高的光的场景是相当的低频，这是效果不在向上的面对对象的部分显性。它的初始的均方根误差 0:92 % 和最终误差 0:76 %，一 17% 减少。在玩具马的例子，它是明确的，大区域包括在原来的视觉船体已很好的雕刻了。尤其要注意的细节鬃毛和鼻子。它的初始误差 1:66 %，最后是 20 %，减少 28%。

第二环境是在一个家。虽然窗户提供了光的主要来源，在家里有几个额外的光源。许多山峰壳的几何形状是结果显示，尽管自投影（和一些相互反射）降低清晰度有点。在较低的观点错误的带状注材料雕刻在右手边。它的初始误差 0:77 % 和最终是 0:73 %，减少 5%。尽管其复杂的外观，扑满反射率几乎是一个理想的滤波器；它没有颜色是不漫过，也不太高。虽然它经常表现出全局光照效果（阴影和相关屈曲），13 个观点给予足够的语境来突出耳朵和脚。它的初始误差为 1:60 %，最后是 0:81 %，减少 49%。

## 6 结论

在本文中，我们引入了一个完整的方法来恢复全三维几何和处在复杂自然光照中的非朗伯体反射。我们展示了如何充分地利用这种复杂性而不是通过将反射和光照构建成简单的模型。虽然每个观测只提供了不可靠和不完整的信息，但通过仔细地结合它们，我们能够准确地恢复现实世界物体的几何形状（和反射）。由于这种方法不需要任何昂贵的设备，它很好地填补了一直以来在运动结构和多视点立体工作上的空缺。

## 致谢

这项工作由美国国家科学基金会奖项 IIS-0746717，IIS-1353235 和 IIS-0964420 以及海军研究办公室 N00014-11-1-0099 和 N00014-14-1-0316 资助。

## 参考著作

- [1] Y. Adato, Y. Vasilyev, T. Zickler, and O. Ben-Shahar. Shape from specular flow. TPAMI, 32(11):2054 - 70, Nov. 2010. 2
- [2] J. Barron and J. Malik. Color Constancy, Intrinsic Images, and Shape Estimation. In ECCV, 2012. 2
- [3] J. Barron and J. Malik. Shape, Albedo, and Illumination from a

Single Image of an Unknown Object. In CVPR, pages 334 - 341, 2012. 2, 3, 4

[4] P. Debevec. Light Probe Image Gallery. <http://www.pauldebevec.com/Probes/>, 2012. 6

[5] C. Hernandez, G. Vogiatzis, and R. Cipolla. Multiview Photometric Stereo. TPAMI, 30(3):548 - 554, 2008. 1, 2

[6] H. Jin, D. Cremers, A. Yezzi, and S. Soatto. Shedding Light on Stereoscopic Segmentation. In CVPR, pages 36 - 42, 2004. 2

[7] H. Jin, S. Soatto, and A. Yezzi. Multi-View Stereo Reconstruction of Dense Shape and Complex Appearance. IJCV, 63(3):175 - 189, Apr. 2005. 2

[8] M. Johnson and E. Adelson. Shape Estimation in Natural Illumination. In CVPR, pages 1 - 8, 2011. 2, 6

[9] M. Kazhdan, M. Bolitho, and H. Hoppe. Poisson Surface Reconstruction. In Eurographics Symposium on Geometry Processing, pages 61 - 70, 2006. 5

[10] K. Kutulakos and S. Seitz. A Theory of Shape by Space Carving. IJCV, 38(3):199 - 218, 2000. 2

[11] A. Laurentini. The Visual Hull Concept for Silhouette-Based Image Understanding. TPAMI, 16(2), 1994. 5

[12] S. Lombardi and K. Nishino. Reflectance and Natural Illumination from a Single Image. In ECCV, pages 582 - 595, Oct.

2012. 1, 2, 5

[13] W. Matusik, H. Pfister, M. Brand, and L. McMillan. A data-driven reflectance model. *ACM Trans. on Graphics*, 22(3):759 - 769, July 2003. 5, 6

[14] K. Nishino. Directional Statistics BRDF Model. In *ICCV*, pages 476 - 483, 2009. 1, 2, 5

[15] K. Nishino and S. Lombardi. Directional Statistics-based Reflectance Model for Isotropic Bidirectional Reflectance Distribution Functions. *JOSA*, 28(1):8 - 18, Jan. 2011. 5

[16] G. Oxholm and K. Nishino. Shape and Reflectance from Natural Illumination. In *ECCV*, pages 528 - 5414, Oct. 2012. 1, 2, 3

[17] J. Pons, R. Keriven, and O. Faugeras. Multi-view Stereo Reconstruction and Scene Flow Estimation with a Global Image-Based Matching Score. *IJCV*, pages 1 - 24, 2007. 2

[18] S. Rusinkiewicz. A New Change of Variables for Efficient BRDF Representation. In *Eurographics Workshop on Rendering*, pages 11 - 22, 1998. 5

[19] S. Seitz, J. Diebel, D. Scharstein, R. Szeliski, and B. Curless. A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms. In *CVPR*, pages 1 - 8, 2006. 2

[20] S. Seitz and C. Dyer. Photorealistic Scene Reconstruction by Voxel Coloring. In *CVPR*, pages 1067 - 1073, 1997. 1, 2

- [21] A. Treuille, A. Hertzmann, and S. Seitz. Example-Based Stereo with General BRDFs. In ECCV, pages 457 - 469, 2004. 2
- [22] G. Vogiatzis, P. Torr, and R. Cipolla. Multi-View Stereo via Volumetric Graph-Cuts. In CVPR, pages 391 - 398, 2005. 2

