

# 基于计算机视觉的非朗伯表面三维重构<sup>\*</sup>

朱红军, 高 潮, 郭永彩

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘 要:** 基于计算机视觉的三维重构方法已经广泛应用在各行各业中。目前的三维重构研究主要针对不透明的朗伯表面, 且已经比较成熟, 但对非朗伯表面仍然面临诸多问题。而实际场景中的物体表面大多是非朗伯表面, 因而, 随着实际应用的推广, 非朗伯表面的三维重构问题在计算机视觉领域越来越受到关注。虽然本现状研究不能完全涵盖针对非朗伯表面三维重构的所有方法, 但它包涵了三维重构每个步骤中的各种典型方法。文中按照图像获取过程中的**照明方式**和**重构原理**对现有方法进行了分类, 并逐类进行了介绍。由于不存在公共测试网络平台和带有标准视差的非朗伯表面立体图像集, 因而, **很难对各种算法的计算效率和匹配质量进行比较**, 文中主要对非朗伯表面的现有三维重构方法的原理、特点、适用范围和最新研究方向进行了介绍, 对非朗伯表面三维重构的现有问题和发展前景进行了讨论。

**关键词:** 三维重构; 非朗伯表面; 高光去除; 计算机视觉; 机器人视觉

**中图分类号:** TP391.4 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB201426.019001

基于计算机视觉的三维重构方法无需直接接触, 对被测物体完全无损伤, 已经广泛应用于工业、农业、军事、医疗、交通、影视、考古等行业中。随着社会现代化的发展, 三维重构显得越来越重要, 并已成为计算机视觉中最活跃的研究领域, 但三维重构本身是一个极其复杂的问题, 物体表面特征也多种多样。按反射机理的不同物体表面可分为漫反射表面、镜面反射表面和混合表面三种类型<sup>[1-2]</sup>。其中, **镜面反射表面和混合表面不能用朗伯模型描述, 因而, 称之为非朗伯表面。**

对漫反射而言, 入射光被均匀地反射到各个方向, 物体**表面成像的 RGB 值由其对应表面块的光谱反射率决定**, 反射光的强度仅与**单位面积上入射光的强度有关**, 而与光源的方向无关; 在镜面反射现象中, 我们看不到反射物体自身, 只能看到其周围物体在其表面形成的像, 这个像常常是变形的, 还会随观察角度的变化而变化。另外, 镜面反射还会导致在图像中形成**高光, 这种高光区域包含纹理信息极少**, 其颜色往往与物体表面本色不同<sup>[3]</sup>。显然, 漫反射和镜面反射成像规律差别很大, 针对漫反射的重构方法不能直接应用到非朗伯表面, 即使是在 Middlebury 平台测试中性能最好的方法, 对非朗伯表面的重构结果也可能非常差<sup>[4]</sup>。然而, 实际场景大多是非朗伯表面<sup>[5-7]</sup>, 特别是在工农业生产中广泛采用的**金属表面**, 镜面反射现象更为严重, 实验表明, 在成像过程中只有不足 2% 的光线来自漫反射<sup>[8]</sup>, 为此, 针对非朗伯表面的三维重构越来越受到关注。

由于非朗伯表面三维重构研究缺乏带有标准视差图的数据和可用的公共测试平台, 因而, 不能像用于朗伯表面的三维重构那样准确地讨论匹配准确性和匹配速度问题。本文主要侧重于方法和适用范围的介绍。目前, 针对非朗伯表面的三维重构方法不断涌现, 根据采用的光源不同, 这些方法可以分为**主动照明型**和**被动照明型**。针对朗伯表面重构方法的介绍, 可以参阅文献[9-11]。

## 1 被动照明重构法

研究表明人类通过镜面反射图形的亮度和镜面反射图形的运动两种视觉信息感知镜面反射<sup>[12]</sup>。因此, 被动照明重构法主要有基于**亮度的立体匹配法**和基于**光流的由镜面反射流到形状法**。

### 1.1 基于立体匹配的重构方法

立体匹配法比明暗获取深度法更直接准确, 比主动测距法应用范围更广泛, 因而, 这种方法被广泛关注。现有立体匹配方法一般都将**亮度和颜色相似度作为匹配判据**, 而非朗伯表面在不同视角下, 特别是当物体相对相机或光源的位置发生大的改变时, 采集到的图像亮度和**颜色差别极大**, 这将直接导致朗伯表面的匹配结果错

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2013-05-17; 修订日期: 2013-09-06

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研项目(20090191110026)

作者简介: 朱红军(1973—), 男, 博士研究生, 主要从事计算机视觉研究; redreda@qq.com。

通信作者: 高 潮(1959—), 男, 教授, 博导, 主要从事信号处理技术和计算机视觉研究; gaoc@cqu.edu.cn。

误。为此,大量学者针对非朗伯表面提出了高光区域去除法和镜面反射分量去除法。

### 1.1.1 高光区域去除法

实验证明图像除去镜面反射引起的高光区域后基本符合朗伯表面成像规律<sup>[13]</sup>。为此,许多学者提出了基于高光去除的立体匹配方法,其关键步骤是高光区域检测。

Brelstaff 和 Blake<sup>[14]</sup>提出利用高光区域比朗伯表面的亮度变化快的特性来检测高光区域,该方法只适用于简单照明且结构简单的情況(如圆柱表面)。与此类似,利用对应高光区域之间的归一化互相关系数小且高光区域往往不遵守秩约束和邻域约束的特点,Ching 等<sup>[15]</sup>提出基于区域匹配的高光区域检测方法。这种方法能同时检测和分类遮挡区域和高光区域,但其计算量较大。

Gershon 等<sup>[5]</sup>研究发现高光往往伴随着物体颜色向光源颜色偏移现象,利用此规律提出了针对彩色图像的高光检测方法。其先对彩图进行区域分割,然后将其从 RGB 空间线性变换到 C 空间,最后用最小二乘法拟合出一条空间直线并根据此线的特征来判断目标区域是否为高光区域。该方法适用于物体表面同时存在界面反射和体反射的情况,但当光源与物体颜色相同时或体反射不明显时该方法失效。

Tan 等<sup>[16]</sup>引入针对纹理表面的图像修复技术,发现镜面反射的边缘一般比漫反射边缘平滑,利用此特点可以在去除高光的同时保留纹理信息。该方法仅需单幅图像,但其需要预先进行区域分割,然而,目前的图像分割技术都缺乏准确性,特别是对高纹理表面和复杂场景问题更为突出<sup>[17]</sup>。

Bhat 和 Nayar<sup>[18]</sup>利用镜面反射的单方向性,提出了针对三目立体视觉系统的匹配方案。其基本思想是:高光不可能在多个视角中出现,因而,在三目立体视觉系统中一般存在无高光的图像对用以立体匹配。以此类似, Lee 和 Bajcsy<sup>[19]</sup>提出用于彩色图像的光谱差分法检测高光区域。后来, Lin 等<sup>[20]</sup>又在 Lee-Bajcsy 方法的基础上提出一种极线约束下彩色直方图差分检测高光区域的方法。该方法不需要任何几何信息,也不需要预先分割,然而,其对双目立体匹配系统不适用。

卢思军等<sup>[21]</sup>利用高光区域灰度大但最大色度小的特点提出了融合灰度和色度信息的高光检测方法,该方法中灰度与色度的大小相差几个数量级,所以其效果几乎与基于灰度阈值分割相同,且其检测结果完全依赖于人工给定的阈值。该方法对自然图像的检测结果如图 1 所示,其中图(a)为原图,图(b)为阈值  $T=\exp(400)$  时的检测结果,图(c)为阈值  $T=\exp(600)$  时的检测结果。

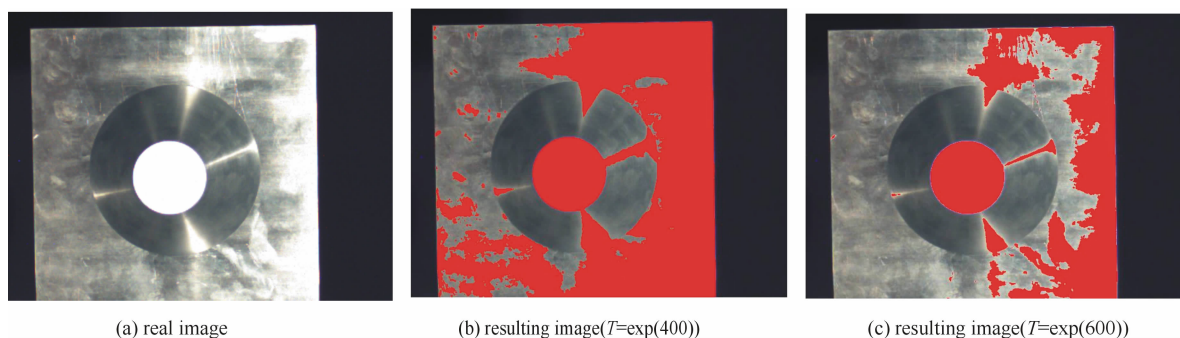


Fig. 1 Result of specular detector

图 1 检测高光结果

### 1.1.2 镜面反射分量去除法

根据 Torrance-Sparrow<sup>[22]</sup>假设,图像包含的漫反射和镜面反射是可以分离的,去除镜面反射分量后的图像遵循漫反射模型。为此, Barrow 和 Tenenbaum<sup>[23]</sup>提出从图像中去除镜面反射分量后再立体匹配的构想,其关键是实现漫反射分量和镜面反射分量分离的问题。目前,消除镜面反射分量主要采用基于偏振特点的方法和基于彩色信息的方法。

#### (1) 基于偏振特点的方法

基于偏振特点方法的基本思想是:相对镜面反射光而言,漫反射光在大部分入射角内不太容易被极化<sup>[24]</sup>。Wolff 和 Boul<sup>[25]</sup>提出菲涅耳反射模型,并基于此模型首次利用偏振滤波器实现了黑白图像中的镜面反射分量和漫反射分量的分离。该方法假定高光区域内的材料类型、表面法线方向和漫反射分量都相同,然而,这些假设在实际情况中常常不成立。为此, Nayar 等<sup>[26]</sup>在 Wolff-Boul 方法的基础上另外考虑彩色信息,提出利用彩色偏振光消除镜面反射的方法,该方法可用于漫反射特性和材料性能平滑变化的高纹理表面,但它采用了迭代

技术,因而,计算速度相对较慢。同时,当入射光的颜色与材料的颜色相同时,此方法失效。上述两方法仅在入射角为布儒斯特角时取得较好的效果,为此,Umeyama 和 Godin<sup>[27]</sup>基于独立成分分析法提出利用旋转偏振片得到的多幅灰度图像实现反射分量的分离,该方法计算速度快,可以用于实时系统。

## (2) 基于彩色信息的方法

基于偏振特点的镜面反射消除方法需要在光路中额外加装偏振片,使该方法的硬件系统相对复杂。另外,对大多数金属而言,极化不改变其镜面反射分量,因而,该方法对金属不适用。为此,立体匹配方法更倾向于采用基于彩色信息的镜面反射消除。

Shafer<sup>[3]</sup>认为非导体的漫反射光和镜面反射光具有不同的光谱分布,其中,镜面反射的光谱与光源相似,而漫反射与表面材料有关。Shafer<sup>[3]</sup>以此为理论基础提出双色反射模型,并基于此模型首次利用单幅彩色图像在 RGB 空间的分布消除了镜面反射分量。

基于双色反射模型,Gershon<sup>[5]</sup>和 Klinker<sup>[28-29]</sup>,分别发现彩色矢量投影到双色平面后成斜“T”形,其两个分支分别代表了漫反射分量和镜面反射分量。为了便于从双色平面中区分漫反射和镜面反射分支,该方法要求镜面反射光只存在于一个相对表面曲率而言很小的夹角内,另外,该方法还要求双色表面均匀且无图像噪声。但实际表面常常大量存在纹理,不满足表面均匀性假设,同时图像噪声也不可避免,因而双色平面中的“T”形常常很难被提取出来<sup>[24, 30]</sup>。

Bajcsy 等<sup>[31]</sup>提出了一种由三正交基构成的彩色空间(称为 S 空间),在灰度化的 S 空间中,镜面反射不会改变色调,但会降低饱和度,利用此特性即可分离镜面反射和漫反射分量。该方法考虑了多次反射情况,因而,表面的粗糙度不会影响结果精度,但它只适用于单色光源且物体表面颜色均匀的情况。

与 Bajcsy 方法类似,Tan 等<sup>[32]</sup>利用镜面反射和漫反射在最大色度一亮度二维空间的分布特点,提出了基于色度的镜面反射和漫反射分离方法。该方法不受表面粗糙度和光源方向的限制,由于其考虑了相机噪声的影响,因而,鲁棒性较高,但它需要已知光源的色度。

以上方法都假设物体表面的漫反射分量均匀,当表面漫反射颜色不一致时,需要事先进行颜色分割,因而对复杂场景而言,镜面反射消除的效果要受到分割技术的影响,为此,许多学者提出了免分割的镜面反射消除方法。

Tan 和 Ikeuchi<sup>[24]</sup>提出一种基于邻域像素色度比较法,该方法通过对输入图像和其漫反射图像灰度的对数差分进行迭代比较从单一图像中剔除镜面反射分量。它不需要任何几何信息,但只适用于重复纹理或低纹理的情况。Tan 和 Ikeuchi<sup>[33]</sup>还提出利用图像的颜色在彩色空间的分布求取漫反射彩色信号,但这种方法易受到复杂背景色彩的干扰。

Mallick 等<sup>[34]</sup>提出一种可以同时适用于图像和视频的镜面反射消除方法,该方法基于形态学微分产生了一组偏微分方程,通过此方程迭代地腐蚀镜面反射分量实现了镜面反射消除。该方法适用于镜面反射颜色和漫反射颜色明显不同的双色表面,仅需要局部的表面颜色信息,但它必须已知光源的方向。

Shen 等<sup>[35]</sup>提出先基于色度分析估计每个像素的漫反射颜色,利用双色反射模型通过最小二乘法求解镜面反射分量,该方法简单有效但需要根据经验人工设置色度阈值。

以上方法都是基于像素的,因而,不需要表面颜色一致性假设,但都采用迭代方法而比较费时。针对上述问题,Chung 等<sup>[36]</sup>提出一种分类模糊积分法,该方法先将边缘分为镜面反射边缘和漫反射边缘两类,然后通过模糊积分分解反射分量。

上述方法都将镜面反射区域或镜面反射分量当成噪声预先消除,但镜面反射本身是携带信息的,Yang 等<sup>[37]</sup>基于双色反射模型利用光源色度不变性提出一种基于投票方式的立体匹配方法,该方法不需要预先去除图像中的高亮区域,但该方法不适用于光源与物体表面颜色相同的情况。另外,立体匹配方法不能直接确定物体表面上每点的法向量,因而,Wöhler 和 d'Angelo<sup>[38]</sup>在传统立体匹配方法的基础上融合了光度学信息和偏振信息,通过迭代的方法计算得到稠密的三维表面梯度。

## 1.2 由镜面反射流到形状法

当镜面物体相对环境运动时就在像平面上形成运动场或镜面反射流。镜面反射流是由镜面反射引起的虚拟特征流,其与漫反射表面引起的真实特征流的运动视差不同<sup>[39]</sup>。利用此规律,许多学者提出各种由镜面反射流到形状法。



Roth 和 Black<sup>[40]</sup>认为移动摄像机采集的图像运动是包含漫反射流和镜面反射流的光流。他们讨论了在远光照明和已知运动参数的摄像机缓慢运动条件下镜面反射流与空间结构的对应关系,并给出了其数学表达式。利用此式可以计算稠密的光流,然后通过最大期望算法确定物体的三维形状。

与 Roth 和 Black 的装置不同,Adato 等<sup>[41]</sup>的成像装置保持摄像机与被研究对象的相对位置不变,仅允许环境运动。他们指出该装置的镜面反射流与物体形状之间存在非线性的偏微分关系,这种关系只与环境的相对运动有关,而与景物类型无关。利用这种关系,通过求解二阶非线性偏微分方程组可以确定光面物体的深度信息。其重构效果如图 2 所示。

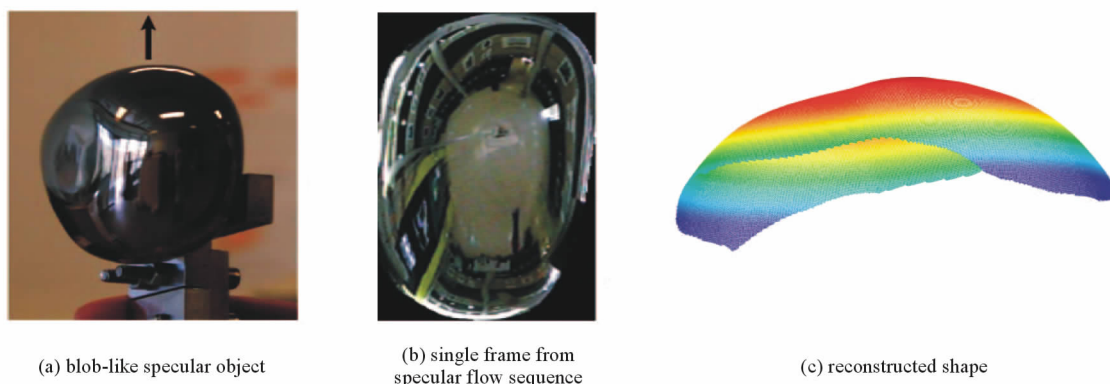


Fig. 2 Reconstruction of a real specular object by Adato et al.

图 2 镜面实物的重构

由于利用镜面反射流与镜面形状之间关系方程求解的结果依赖于特定的初始条件或特定的运动。Canas 等<sup>[42]</sup>通过选取适当的参数将光流与镜面形状关系方程线性化,这使得形状重构问题大大简化,即使没有初始条件也可以利用两幅镜面反射流图估算出运动情况和物体形状。其重构效果如图 3 所示。



Fig. 3 Reconstruction of a real specular object by Canas et al.

图 3 镜面实物的重构

利用偏微分方程可以表达表面参数与镜面反射流的关系,但它不适用于运行目标大位移情况,且光面物体常常难以形成稠密的光流用以估计表面深度。为此,Sankaranarayanan 等<sup>[43]</sup>提出先用 SIFT 检测特征点得到稀疏的镜面反射匹配点,然后将这些点作为约束条件实现光面的重构,该方法可用于有限位移运动情况。

### 1.3 小 结

综上所述,基于被动照明的方法对不同表面的重构效果不同。基于立体匹配方法主要用于局部镜面或包含大量漫反射分量的混合表面三维重构,它不需要已知光源和表面反射率,但它需要预先对相机的内参和外参进行标定。由镜面反射流到形状法只适用于镜面反射表面,且需要知道被反射物体、反射物体和摄像机的相对运动参数,但光流有效地增加了图像中各点的局部信息,因而镜面反射流方法比纯粹的立体匹配法更容易逐点求取场景点的深度。

## 2 主动照明重构法

主动照明重构法通过采用特殊光源对研究对象照明或者用投射器投影特定的图案到物体表面,形成具有特殊性质的图像以实现三维重构。主动照明重构法主要有光度立体视觉法、由形变到形状法和 Helmholtz 立体匹配法。

## 2.1 光度立体视觉法

光度立体视觉法保持图像传感器和被研究对象的位置不变,通过改变光照来获取同一表面块在不同照明条件下的系列图像,将这一系列图像的值代入由照明装置、表面反射率和表面方向决定的图像亮度关系式中构成一个光度方程组,计算此方程组即可确定表面各点的方向<sup>[44-45]</sup>。针对非朗伯表面的光度立体视觉法可以分为三类:基于表面反射率信息的方法、去除高光区域法和去除镜面反射分量法。

### 2.1.1 基于表面反射率信息的方法

Ikeuchi<sup>[8]</sup>假定物体的位置已知,扩展光源发出的光线在物体表面发生理想的镜面反射,采用远距离的分布式照明,利用亮度和位置关系可得镜面物体表面的方向。为了提高计算速度,Ikeuchi 采用了基于反射率图的查表技术,但它只能取得有限的值。

Tagare 和 Defigueiredo<sup>[46]</sup>基于三支反射模型提出了利用点光源照明条件下的非朗伯表面重构方法。Hertzmann 和 Seitz<sup>[47]</sup>利用参考对象先计算物体的表面反射率,在光度学立体重构中引入方向一致性约束。该方法对不同材料的表面重构时需要预先按材料进行分割,且比较费时,其重构效果如图 4 所示。

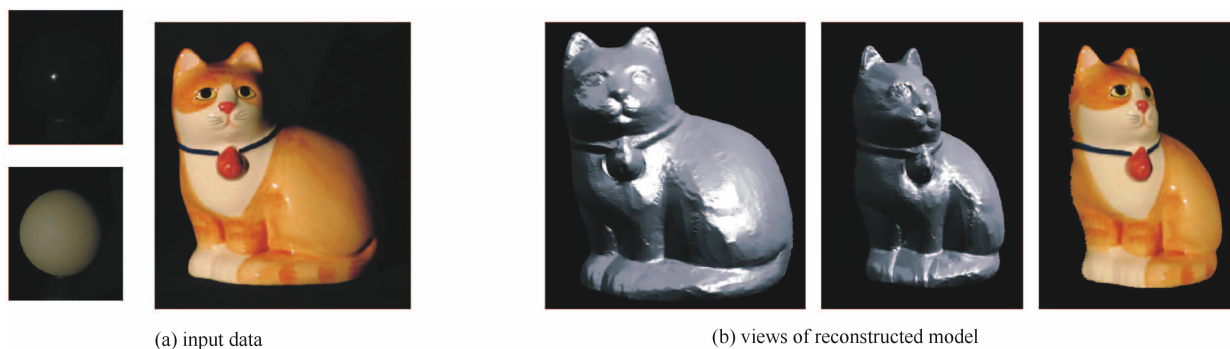


Fig. 4 Reconstruction of cat model

图 4 模型猫的重构

基于 Ward 反射模型,Zheng 等<sup>[48]</sup>用一系列代表不同表面粗糙度的基函数表示不同的表面反射率,这种方法能适用于各种类型表面的光度学立体匹配,且重构效果比传统光度学方法好(如图 5 所示),但同样计算量大耗时。

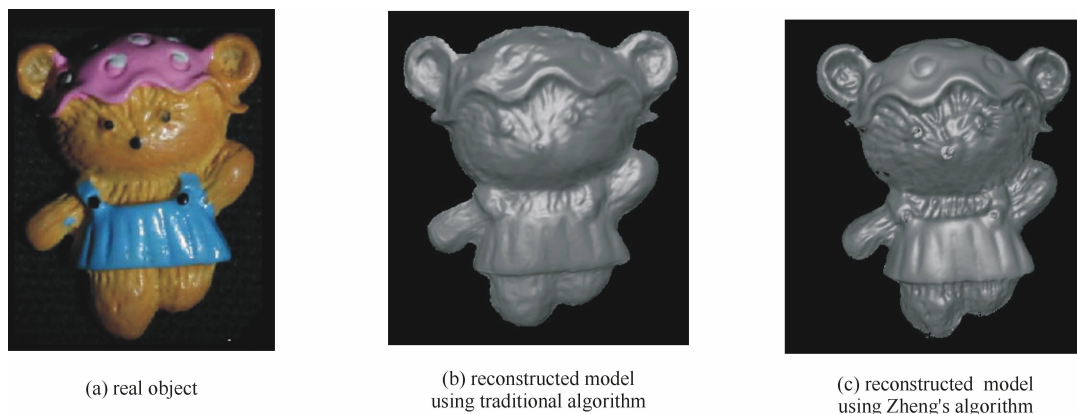


Fig. 5 Reconstruction of bear model

图 5 模型熊的重构

综合上述内容可以看出基于表面反射率信息的方法主要用于混合表面的三维重构,它不需要已知摄像机和光源的信息,可采用包括太阳光在内的任何光源,但这种方法计算量大,比较耗时,一般需要已知表面反射率或者由与重构对象材料相同的参考物体获取表面反射率,并且要求景物表面连续可微。

### 2.1.2 去除高光区域法

去除高光区域后利用漫反射表面的光度立体视觉技术的关键也是高光区域的检测。Coleman 和 Jain<sup>[49]</sup>提出采用四个光源的光度立体视觉法。该方法假设空间点的四幅图像中,有三幅没有受到镜面反射的影响,利用无镜面反射影响的三点求取表面梯度。该方法不需要预先对系统进行校准,但它只适用无阴影的情况,然而,实际情况下表面往往存在着遮挡和阴影。为此,Solomon 和 Ikeuchi<sup>[50]</sup>提出了考虑阴影影响的四光源改进

方案。他们将表面分为三种不同的光照情况,对不同的情况采用不同的高光检测和形状恢复方法。然而,该方法需要检测阴影,这就有可能引入新的误差源,对于反射率不均匀表面的阴影检测更加困难<sup>[45]</sup>。另外,它容易将投射阴影当成自阴影从而产生错误的梯度值。

Barsky 和 Petrou<sup>[45]</sup>在 Coleman-Jain 的四光源光度立体视觉法的基础上提出通过局部光谱差分检测高光区域,它不需要专门对镜面反射分量和漫反射分量进行分割,用于反射率非均匀分布的任意粗糙平面。然而,当表面颜色与光照颜色相近时该方法不适用,为此,他们又提出通过比较镜面反射方向和表面法线方向来检测高光,然而,此方法不如光谱差分法可靠,并且,当有两个以上图像中的对应像点受到阴影影响时,此方法无效。

### 2.1.3 去除镜面反射分量法

类似于 Klinker 等<sup>[28]</sup>提出的方法,Schlüns 和 Wittig<sup>[51]</sup>针对同质的双色表面,提出先将彩色图像从 RGB 空间变换到球形色度空间,利用彩色直方图分析法去除镜面反射分量,然后采用光度立体视觉法实现三维重构。然而,噪声和实际表面颜色变化使得彩色直方图极少构成一个平面,从而导致分离结果的不可靠。

Sato 和 Ikeuchi<sup>[52]</sup>研究了图像颜色在四维空间(时间颜色空间)中随光源运动的变化曲线,在此基础上,他们进一步提出采用曲线拟合的方法分解镜面反射和漫反射分量。该方法不需要表面同质假设,但它不适用于存在相互反射和多光源的情况。

上述两种方法必须预先进行分割,为此,Lin 和 Shum<sup>[53]</sup>在保持摄像机位置不变的情况下,通过改变光源的方向获取两幅彩色图,当两幅图像中至少有一对对应点是由漫反射形成时,镜面反射分量可以基于灰色表面反射模型得以去除。这种方法只需要少量不同照明方向的图像(至少两幅),且不需要任何相邻像素间的假设,因而,它不需要预先分割图像,也不需要已知光源的空间分布,但需要已知光源的色度(如果未知可以通过 Tan 等<sup>[54]</sup>提出的方法预先估计)。

基于 Shafer 的双色反射模型,Mallick 等<sup>[55]</sup>提出利用已知的光源颜色将 RGB 彩色矢量通过线性变换到 SUV 彩色空间,其中 UV 通道表示物体的漫反射成像,然后利用标准的光度立体视觉法得到物体表面的法线,其重构效果如图 6 所示。该方法对有无纹理的表面都适用,且不需要参考物,但要求物体表面各处照明颜色相同。

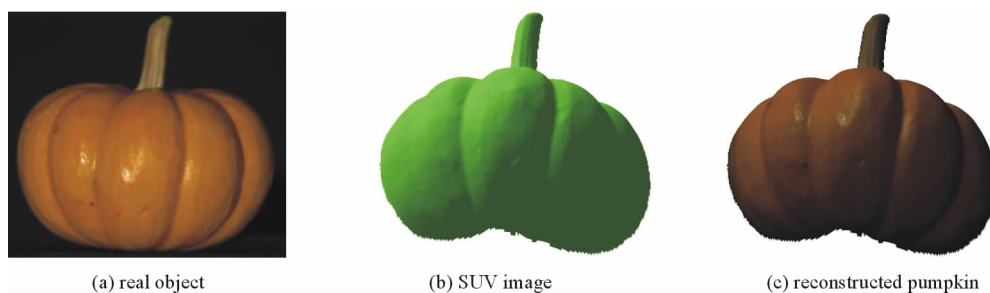


Fig. 6 Reconstruction of pumpkin

图 6 南瓜重构图

Liu 和 Han<sup>[56]</sup>保持摄像机和研究对象不动,将光源绕摄像机的光轴旋转,此时,图像中的漫反射分量按正弦规律变化,然后通过 Hough 变换得到表面法线和反射率的值,其效果如图 7 所示。这种方法有效地克服了大面积遮挡和高光问题,但它需要在  $360^\circ$  范围内从不同角度拍摄的大量图像参与计算,计算复杂度较高。

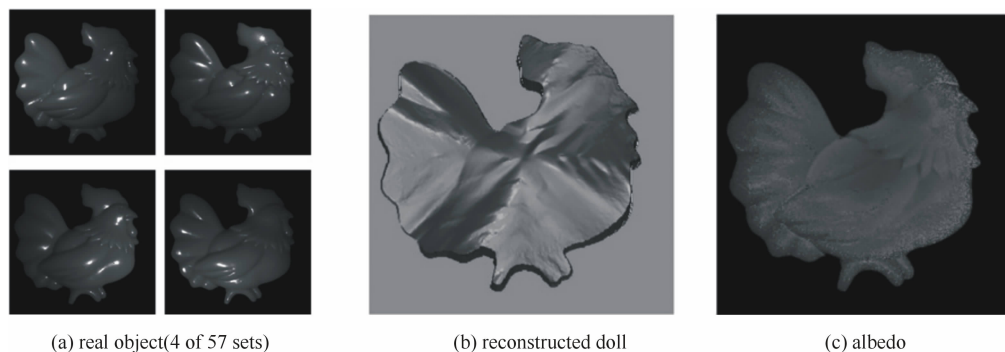


Fig. 7 Reconstruction of doll

图 7 玩具的重构



Yang 和 Ahuja<sup>[17]</sup> 提出利用表面色度作为匹配不变量分解镜面反射与漫反射分量的方法,通过求解图像颜色与表面法线的线性方程求得表面法线。该方法适用于所有非均匀绝缘介质表面,不需要光源校准,但它需要计算光源的色度,并要求任何像素至少在某一幅图中无镜面反射分量。

光度立体视觉法与传统的立体视觉法测量结果和适用范围不同:前者主要测量物体表面各点的梯度,后者主要测量物体表面各点的深度;前者更适用于表面均匀的情况,而后者更适用于表面有纹理的情况。与传统的立体视觉法相比光度立体视觉法存在许多优势:由于多幅图像中各点的灰度值不受观察方向的影响,消除了匹配难度;不存在标定和匹配过程中引入的量化噪声;不需要表面光滑假设。但光度学方法直接根据图像的灰度值计算物体的深度信息,因而,对图像噪声敏感,只有在暗室成像才能获取精确的方向信息,且容易产生低频失真。

## 2.2 由形变到形状法

由形变到形状法将一个空间位置关系已知的图形放在被反射表面的附近<sup>[6, 57]</sup>,根据被反射图案与观测到的变形图案之间的对应关系计算研究对象的深度<sup>[58-60]</sup>,其流程图如图 8 所示。

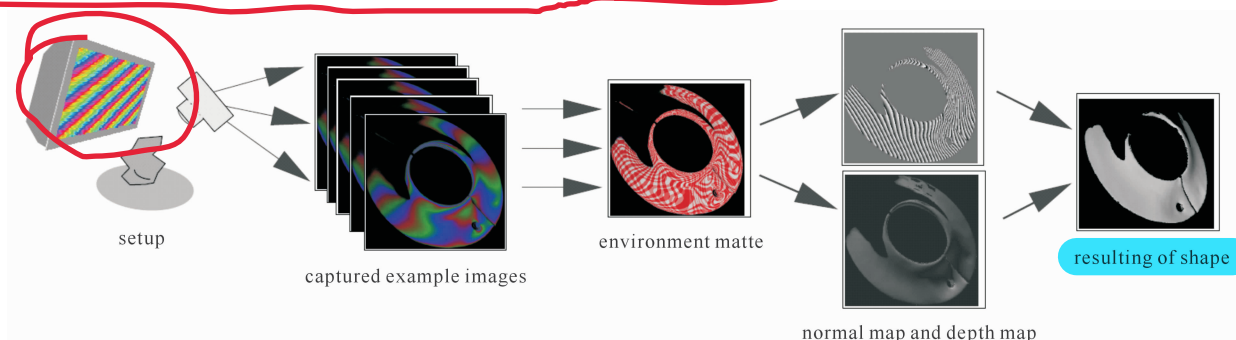


Fig. 8 Flow diagram of shape from distortion

图 8 由形变到形状流程图

由形变到形状法最早由 Schultz<sup>[2]</sup> 提出,他利用表面形状传播法解决自然光照下的光面重构,但这种方法只适用于已知光源能量分布和种子点深度条件下的重构。

Oren 和 Nayar<sup>[39]</sup> 将图像中的特征分为真实特征和虚拟特征,当观察者在三维空间中运动时,真实特征相对表面静止,而虚拟特征相对表面运动。为此,他们提出利用摄像机运动的图像特征轨迹区别两种特征,并在此基础上提出通过移动摄像机跟踪实际边界的虚像运动获取三维的表面轮廓。该方法只适合单个特征情况,当图像中有多个特征时难以识别和跟踪。

Tarini 等<sup>[59]</sup> 提出利用显示器产生多幅条形图案照射目标物体,用固定摄像机观测被目标物体反射后的图像,利用传播和迭代技术获得较高的测量精度。与此类似,Guo 等<sup>[61]</sup> 利用液晶显示器产生正弦条纹,利用摄像机获取变形图案后计算各处的相位。然后,利用最小二乘法从相位信息中获得各像素对应的入射点位置。Huang 和 Asundi<sup>[62]</sup> 使用窗口傅里叶脊来实现条纹检波,从而实现了动态反射表面的三维感知。窗口傅里叶脊的引入可以在一定程度上提高信号瞬时频率的估算精度。

目前采用投影仪照明对漫反射表面重构效果更好,而显示器照明对镜面反射表面更好,但它们都只适用于理想的镜面反射或漫反射,而不适用于混合表面情况,为此,Yamazaki<sup>[63]</sup> 提出同时利用投影仪和显示器的双摄像机方法实现混合表面的三维重构。

最近,由形变到形状法衍生出偏折计法,其基本原理与 Sanderson<sup>[64]</sup> 提出的结构高光法类似。该方法要求被反射物和摄像机必须相互校准,对包括光源、投射屏和摄像机在内的整个设备的校准可以参阅 Horbach 和 Dang<sup>[65]</sup> 提出的方法。

Zisserman 等<sup>[66]</sup> 认为当光源和被研究物体固定不动时,通过摄像机连续运动观测光源成像的运动可以确定物体表面所在的曲线族,但曲线不能唯一确定。Lellmann 和 Balzer<sup>[6]</sup> 提出联合使用光流法和镜面反射法提供更多的约束以确定镜面物体表面的形状。

图案发生器的大小限制了图案成像的大小,特别是当物体表面是凹面时,图案成像更小,这种现象称为束传播。为此,Balzer 等<sup>[67]</sup> 提出利用基于表面法线和双目视差平滑性假设的迭代技术以实现镜面三维重构,其重构效果如图 9 所示。

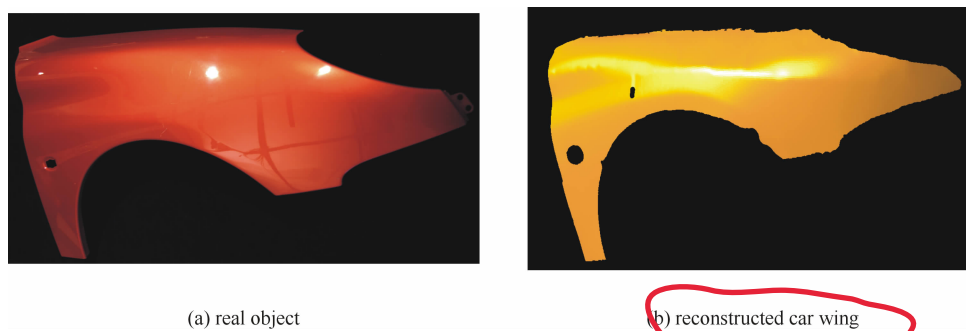


Fig. 9 Reconstruction of car wing

图 9 汽车翼子板重构

因为摄像机不能同时记录物体表面自身和周围场景在其上的像,因而,场景只能采用对模糊不敏感的低频图案,这就要求物体表面是静止的。为了突破这种局限性,Wedowski 等<sup>[68]</sup>利用动态偏折计设计出在线重构镜面物体的硬件设备。

综上所述,由形变到形状法为镜面重构提供了一条有效途径,但该方法假设光线遵循反射原理,因而它只适用于镜面物体的三维重构,而对混合表面效果不佳。

### 2.3 Helmholtz 立体匹配法

Helmholtz 立体匹配法是基于光路可逆原理的三维重构法,它通过交换光源与摄像机的位置获取图像对。该方法需要特殊的点光源主动照明,所以,其硬件相对复杂。为实现这种方法,Zickler 等<sup>[69]</sup>设计了相关硬件,其利用秩约束实现图像匹配,并利用三对可逆图像实现对各种类型表面的三维重构。

陈正华和章毓晋<sup>[70]</sup>基于 Zickler 方法提出一种迭代动态规划方法建立匹配获取视差图,从而恢复出高光物体表面结构的方案。该方法首先交换摄像机和光源的位置获取 Helmholtz 图像并对其进行图像校正,然后确定扫描线端点,最后计算表面结构。

### 2.4 小 结

综上所述,三类基于主动照明的重构法各有特色。光度立体视觉法不需要表面光滑假设,不存在匹配困难,但它对图像噪声敏感,容易产生低频失真,主要用于纹理较少的非朗伯表面。由形变到形状法的重构精度较高,但设备相对复杂,它主要适用于镜面的重构。这两种方法对金属表面的重构效果都不好。Helmholtz 立体匹配法不需要参考物体,不要求远光照明,也不需要特定的反射模型,它能计算任何类型表面的深度和方向<sup>[71]</sup>。但是,该方法的硬件设备复杂,对摄像机和光源的位置和运动都要精确校准,对镜面物体重构时需要大量图像。

## 3 结 论

针对非朗伯表面的三维重构方法可以分为基于被动照明的方法和基于主动照明的方法,这两类方法都存在立体匹配问题。目前的立体匹配方法仅实用于特定的场景,通用和鲁棒的立体匹配算法有待进一步研究。被动照明重构法设备简单,适用范围广,但不适合无纹理表面和完全镜面反射表面的三维重构。主动照明重构法是非朗伯表面重构的主要方法,其测量精度高,但该方法需要特定的照明条件,只适用于特定的环境,特别是由形变到形状法,其只适合镜面物体的三维重构,并且计算复杂度高<sup>[72]</sup>。综上所述,各种方法各有优缺点,但目前这些方法的局限性正在不断缩小,借助信息融合技术三维重构正朝着硬件设备小、重构结果精、重构速度快、实用范围广、智能程度高的方向发展。

**致 谢:** 感谢 Rochester 大学计算机系 Christopher M. Brown 教授和麻省理工学院电气工程和计算机系 Berthold K. P. Horn 教授的讨论。

### 参考文献:

- [1] Nayar S K, Ikeuchi K, Kanade T. Extracting shape and reflectance of hybrid surfaces by photometric sampling[C]//Proceedings of Image Understanding Workshop. 1989: 563-583.
- [2] Schultz H. Retrieving shape information from multiple images of a specular surface[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine In-*



- telligence*, 1994, **16**(2): 195-201.
- [3] Shafer S A. Using color to separate reflection components[J]. *Color Research and Application*, 1985, **10**(4): 210-218.
  - [4] Tang L, Garvin M, Lee K, et al. Robust multi-scale stereo matching from fundus images with radiometric differences[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, **33**(11): 2245-2258.
  - [5] Gershon R, Jepson A D, Tsotsos J K. The use of color in highlight identification[C]//The 10<sup>th</sup> International Joint Conference on Artificial Intelligence. 1987: 752-754.
  - [6] Lellmann J, Balzer J, Rieder A, et al. Shape from specular reflection and optical flow[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2008, **80**(2): 226-241.
  - [7] Dana K J, Van Ginneken B, Nayar S K, et al. Reflectance and texture of real-world surfaces[J]. *ACM Trans on Graphics*, 1999, **18**(1): 1-34.
  - [8] Ikeuchi K. Determining surface orientations of specular surfaces by using the photometric stereo method[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1981, **3**(6): 661-669.
  - [9] Dhond U R, Aggarwal I K. Structure from stereo—A review[J]. *IEEE Trans on Systems Man and Cybernetics Part B-cybernetics*, 1989, **19**(6): 1489-1510.
  - [10] Szeliski R. Computer vision: Algorithms and applications[M]. New York: Springer, 2010: 537-570.
  - [11] Lazaros N, Sirakoulis G C, Gasteratos A. Review of stereo vision algorithms: From software to hardware[J]. *International Journal of Optomechatronics*, 2008, **2**(4): 435-462.
  - [12] Zheng J Y, Murata A. Acquiring a complete 3D model from specular motion under the illumination of circular-shaped light sources[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(8): 913-920.
  - [13] Pentland A P. Local shading analysis[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1984, **6**(2): 170-187.
  - [14] Brestaff G, Blake A. Detecting specular reflections using Lambertian constraints[C]//International Conference on Computer Vision. 1988: 297-302.
  - [15] Ching W S, Toh P S, Er M H. Robust vergence with concurrent identification of occlusion and specular highlights[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1995, **62**(3): 298-308.
  - [16] Tan P, Lin S, Quan L, et al. Highlight removal by illumination-constrained inpainting[C]//IEEE International Conference on Computer Vision. 2003: 164-169.
  - [17] Yang Q, Ahuja N. Surface reflectance and normal estimation from photometric stereo[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2012, **116**(7): 793-802.
  - [18] Bhat D N, Nayar S K. Stereo and specular reflection[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1998, **26**(2): 91-106.
  - [19] Lee S W, Bajcsy R. Detection of specularity using colour and multiple views[J]. *Image and Vision Computing*, 1992, **10**(10): 643-653.
  - [20] Lin S, Li Y, Kang S, et al. Diffuse-specular separation and depth recovery from image sequences[C]//European Conference on Computer Vision. 2002: 89-103.
  - [21] Lu S, Tang Z, Guo L, et al. A algorithm for binocular stereo matching in the presence of specular reflections[J]. *Engineering Sciences*, 2010, **12**(1): 56-60.
  - [22] Torrance K E, Sparrow E M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, **57**(9): 1105-1112.
  - [23] Barrow H G, Tenenbaum J M. Recovering intrinsic scene characteristics from images[M]. New York: Academic Press, 1978: 1-23.
  - [24] Tan R T, Ikeuchi K. Separating reflection components of textured surfaces using a single image[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, **27**(2): 178-193.
  - [25] Wolff L B, Boulton T E. Constraining object features using a polarization reflectance model[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13**(7): 635-657.
  - [26] Nayar S K, Fang X S, Boulton T. Separation of reflection components using color and polarization[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, **21**(3): 163-186.
  - [27] Umeyama S, Godin G. Separation of diffuse and specular components of surface reflection by use of polarization and statistical analysis of images[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, **26**(5): 639-647.
  - [28] Klinker G J, Shafer S A, Kanade T. The measurement of highlights in color images[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1988, **2**(1): 7-32.
  - [29] Klinker G J, Shafer S A, Kanade T. A physical approach to color image understanding[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1990, **4**(1): 7-38.
  - [30] Nayar S K, Fang X S, Boulton T. Removal of specularities using color and polarization[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 1993: 583-590.
  - [31] Bajcsy R, Lee S W, Leonardis A. Detection of diffuse and specular interface reflections and inter-reflections by color image segmentation [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1996, **17**(3): 241-272.

- [32] Tan R T, Nishino K, Ikeuchi K. Separating reflection components based on chromaticity and noise analysis[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, **26**(10): 1373-1379.
- [33] Tan R T, Ikeuchi K. Reflection components decomposition of textured surfaces using linear basis functions[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2005: 125-131.
- [34] Mallick S, Zickler T, Belhumeur P, et al. Specularity removal in images and videos: A PDE approach[C]//European Conference on Computer Vision. 2006: 550-563.
- [35] Shen H L, Zhang H G, Shao S J, et al. Chromaticity-based separation of reflection components in a single image[J]. *Pattern Recognition*, 2008, **41**(8): 2461-2469.
- [36] Chung Y C, Chang S L, Cherng S, et al. Dichromatic reflection separation from a single image[C]//International Conference on Energy Minimization Methods in Computer Vision and Pattern Recognition. 2007: 225-241.
- [37] Yang Q, Wang S, Ahuja N, et al. A uniform framework for estimating illumination chromaticity, correspondence, and specular reflection[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2011, **20**(1): 53-63.
- [38] Wöhler C, d'Angelo P. Stereo image analysis of non-Lambertian surfaces[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, **81**(2): 172-190.
- [39] Oren M, Nayar S K. A theory of specular surface geometry[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1996, **24**(2): 105-124.
- [40] Roth S, Black M J. Specular flow and the recovery of surface structure[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2006: 1869-1876.
- [41] Adato Y, Vasilyev Y, Zickler T, et al. Shape from specular flow[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, **32**(11): 2054-2070.
- [42] Canas G D, Vasilyev Y, Adato Y, et al. A linear formulation of shape from specular flow[C]//IEEE International Conference on Computer Vision. 2009: 191-198.
- [43] Sankaranarayanan A C, Veeraraghavan A, Tuzel O, et al. Specular surface reconstruction from sparse reflection correspondences[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2010: 1245-1252.
- [44] Woodham R J. Photometric method for determining surface orientation from multiple images[J]. *Optical Engineering*, 1980, **19**(1): 139-144.
- [45] Barsky S, Petrou M. The 4-source photometric stereo technique for three-dimensional surfaces in the presence of highlights and shadows[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, **25**(10): 1239-1252.
- [46] Tagare H D, Defigueiredo R J P. A theory of photometric stereo for a class of diffuse non-lambertian surfaces[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13**(2): 133-152.
- [47] Hertzmann A, Seitz S M. Example-based photometric stereo: Shape reconstruction with general, varying brdfs[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, **27**(8): 1254-1264.
- [48] Zheng Z, Ma L, Li Z, et al. An extended photometric stereo algorithm for recovering specular object shape and its reflectance properties[J]. *Computer Science and Information Systems*, 2010, **7**(1): 1-12.
- [49] Coleman E, Jain R. Obtaining 3-dimensional shape of textured and specular surfaces using four-source photometry[J]. *Graphical Models*, 1982, **18**(4): 309-328.
- [50] Solomon F, Ikeuchi K. Extracting the shape and roughness of specular lobe objects using four light photometric stereo[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, **18**(4): 449-454.
- [51] Schlüns K, Wittig O. Photometric stereo for non-Lambertian surfaces using color information[C]//Computer Analysis of Images and Patterns. 1993: 444-451.
- [52] Sato Y, Ikeuchi K. Temporal-color space analysis of reflection[J]. *Journal of The Optical Society of America A—optics Image Science and Vision*, 1994, **11**(11): 2990-3002.
- [53] Lin S, Shum H Y. Separation of diffuse and specular reflection in color images[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2001: 341-346.
- [54] Tan T, Nishino K, Ikeuchi K. Illumination chromaticity estimation using inverse-intensity chromaticity space[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2003: 673-680.
- [55] Mallick S P, Zickler T E, Kriegman D J, et al. Beyond lambert: Reconstructing specular surfaces using color[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2005: 619-626.
- [56] Liu R, Han J. Recovering surface normal of specular object by Hough transform method[J]. *IET Computer Vision*, 2010, **4**(2): 129-137.
- [57] Kutulakos K N, Steger E. A theory of refractive and specular 3D shape by light-path triangulation[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2008, **76**(1): 13-29.
- [58] Ihrke I, Kutulakos K N, Lensch H, et al. Transparent and specular object reconstruction[J]. *Computer Graphics Forum*, 2010, **29**(8): 2400-2426.

- [59] Tarini M, Lensch H, Goesele M, et al. 3D acquisition of mirroring objects using striped patterns[J]. *Graphical Models*, 2005, **67**(4): 233-259.
- [60] Wang Y, Liu K, Hao Q, et al. Robust active stereo vision using Kullback-Leibler divergence[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, **34**(3): 548-563.
- [61] Guo H, Feng P, Tao T. Specular surface measurement by using least squares light tracking technique[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, **48**(2): 166-171.
- [62] Huang L, Ng C S, Asundi A K. Dynamic three-dimensional sensing for specular surface with monoscopic fringe reflectometry[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(13): 12809-12814.
- [63] Yamazaki M, Xu G. 3D reconstruction of glossy surfaces using stereo cameras and projector-display[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2010: 1213-1220.
- [64] Sanderson A C, Weiss L E, Nayar S K. Structured highlight inspection of specular surfaces[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1988, **10**(1): 44-55.
- [65] Horbach J W, Dang T. 3D reconstruction of specular surfaces using a calibrated projector-camera setup[J]. *Machine Vision and Applications*, 2010, **21**(3): 331-340.
- [66] Zisserman A, Giblin P, Blake A. The information available to a moving observer from specularities[J]. *Image and Vision Computing*, 1989, **7**(1): 38-42.
- [67] Balzer J, Hofer S, Beyerer J. Multiview specular stereo reconstruction of large mirror surfaces[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2011: 2537-2544.
- [68] Wedowski R D, Atkinson G A, Smith M L, et al. Dynamic deflectometry: A novel approach for the on-line reconstruction of specular free-form surfaces[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, **50**(12): 1765-1778.
- [69] Zickler T E, Belhumeur P N, Kriegman D J. Helmholtz stereopsis: Exploiting reciprocity for surface reconstruction[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, **49**(2): 215-227.
- [70] Chen Z, Zhang Y. A binocular helmholtz stereo method for measuring objects with highlights[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2010, **15**(3): 429-434.
- [71] Zickler T E, Ho J, Kriegman D J, et al. Binocular helmholtz stereopsis[C]//IEEE International Conference on Computer Vision. 2003: 1411-1417.
- [72] Zhu J, Wang L, Yang R, et al. Reliability fusion of time-of-flight depth and stereo geometry for high quality depth maps[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, **33**(7): 1400-1414.

## 3D reconstruction of non-Lambertian surfaces based on computer vision

Zhu Hongjun, Gao Chao, Guo Yongcai

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of the Education Ministry  
of China, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** 3D reconstruction method based on computer vision is widely used in various industries. Though the 3D reconstruction of opaque surfaces with Lambertian reflectance on which the current research is mainly concentrated is a well-studied issue, the non-Lambertian surfaces pose challenging problems for the 3D reconstruction. Unfortunately, most surfaces of the objects in the actual scene are non-Lambertian, therefore, a growing body of recent work has concentrated on the real-world problems, and has been concerned primarily with non-Lambertian surfaces reconstruction from images in the field of computer vision. Although this state of the art report does not cover exhaustively the generic methods of 3D reconstruction for non-Lambertian surfaces, it does contain examples of all the significantly different approaches to the steps in this field. The works discussed in the survey are categorized and reviewed in order. The main categories of classification are defined in terms of the illumination used for capturing the image and the principle based on. Due to lack of the common test bench available on the web and stereo data sets of non-Lambertian surfaces with ground truth, it is difficult to compare the computational efficiency and matching quality of the various schemes. In that case, here we are concerned with only the principle and characteristics of the existing methods, the scope of application and the latest trends in the research. We conclude the survey by discussing open problems and future perspectives and hope to provide an entry point to this existing field.

**Key words:** 3D reconstruction; non-Lambertian surfaces; highlight removal; computer vision; robot vision

**PACS:** 42.30.Wb; 42.30.Tz