

# 反射光偏振特性分析与物体形状测量

杨进华 邸 旭 岳春敏 李志宏 顾国璋

(长春理工大学光电工程学院, 长春 130022)

**摘要** 基于反射光偏振特性,提出了利用图像处理技术测量透明物体三维形状的理论和方法。分析了物体表面反射光的偏振特性,表明自然光在经透明物体表面反射后,反射率随光的振动方向不同而不同,即反射光表现出部分偏振光的特性。研究了强度反射率与入射角以及光强与偏振片方向之间的函数关系,得到了光强大小与入射面方向的关系;根据偏振度概念并结合菲涅耳公式和折射定律,建立了偏振度和入射角之间的表达式,可求得物体表面法线方向,进而得到透明物体的形状。研制了光学实验平台,获得了物体反射光的偏振图像,经过图像处理,获得了被测物体的三维形状。实验结果表明,这种方法对透明物体形状测量是有效和实用的。

**关键词** 光学测量;偏振;图像处理;三维面形测量;反射

中图分类号 TN247;TP183

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20082811.2115

## Polarization Analysis on Reflected Light and Three-Dimensional Measurement of Object Shape

Yang Jinhua Di Xu Yue Chunmin Li Zhihong Gu Guozhang

(College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract** A new method was studied for measuring the shape of transparent objects by image processing based on polarization analysis on reflected light from the object surface. Polarization characteristic of reflected light from transparent object surface was studied and it shows that reflectivity varies with direction of reflected light while natural light is reflected via transparent surface object, i. e., the reflection will exhibit characteristic of partly polarized light. The relations of intensity reflectivity and incident angle and intensity and polarizer direction were studied, and the relation between reflected intensity and incident plane orientation was deduced. The relation of polarization degree of reflected light and incident angle was established based on definition of polarization degree, considering Fresnel equation and reflection law. Thus the surface normal direction can be determined and the shape of transparent object is obtained. Polarization images were taken experimentally and three-dimensional shape of object was reconstructed by image processing. Experimental results show that the proposed method is effective and valid for shape reconstruction of transparent object.

**Key words** optical measurement; polarization; image processing; three-dimensional shape measurement; reflection

## 1 引 言

物体的形状和其表面的反射特性是描述一个物体的两个重要方面,也是基于机器视觉的工业过程检测、物体识别与跟踪、计算机图形学中合成物体的真实描述的重要依据<sup>[1]</sup>。已经有很多种测量物体形状的方法。在光学工程领域有光学三角测量法、双目交汇测量法、光切测量法、相位测量法等。光学三

角测量基于传统的三角测量距离原理,是一种简单而方便的测量方法;双目交汇测量<sup>[2]</sup>根据立体视觉原理,利用左右两台摄像机获得被测物体的深度信息,可广泛用于大型结构、大型机械零部件的几何尺寸测量及安装定位和结构变形测量等;光切法<sup>[3]</sup>是以激光逐点扫描法为基础,用激光光源经柱面镜产生平面光照射在被测物上,在被测物表面产生一

收稿日期:2007-11-26;收到修改稿日期:2008-03-17

基金项目:国家自然科学基金(60405006)资助课题。

作者简介:杨进华(1969—),男,教授,主要从事光电测试及机器视觉方面的研究。E-mail: yangjh@cust.edu.cn

条明亮的光带,通过 CCD 摄像机采集获得数字图像,经图像处理即可得到物体在该光切面上的二维轮廓信息,进一步沿第三维步进测量,就可得到物体的三维轮廓全貌;相位测量法<sup>[4]</sup>是采用光栅图像投影到被测物体表面,物体表面的深度信息将对条纹的振幅和位相进行调制,采用一定的算法将携带物体深度信息的相位变化解调出来,从而得到物体的三维信息。常用的相位测量法包括莫尔等高法、时域相位测量技术和空域相位测量技术。

物体形状的测量也是计算机视觉的一项经典研究课题,其目的是从一幅或多幅二维图像中获得三维世界的描述。计算机视觉中把形状恢复的技术统称为由 X 恢复形状技术,这里的 X 可以是 shading(明暗), stereo(立体), motion(运动), texture(纹理)等等。由明暗恢复形状<sup>[5]</sup>根据物体灰度图像中表面的亮度变化来计算物体的三维形状。图像中每个像素的灰度等级取决于光源方向和表面法线,在假设表面一定的反射模型和已知光源方向的条件下,通过分析图像中像素的灰度值变化可重现物体的形状;人类用双眼观察世界,两只眼睛会对同一场景产生视差,从而可以感知物体的深度信息,由立体恢复形状<sup>[6]</sup>基于此原理,通过分析两个或多个不同拍摄位置相机拍摄的图像来确定物体或场景的结构。由纹理恢复形状<sup>[7]</sup>认为纹理是探测物体形状的一条重要的视觉线索,在对物体表面纹理有一定的先验知识的前提下,通过分析纹理的变形有可能估计出物体的三维结构。由运动恢复形状<sup>[8]</sup>研究相机和场景之间的相对运动,通过图像序列中时空的变化提取物体、场景的几何结构。以上方法都存在着测量精度与计算量之间的矛盾,对此邱志强等<sup>[9]</sup>提出一种基于仿射近似的算法,利用仿射三线性张量合成序列图像中的缺失图像点,重建图像测量矩阵,然后用仿射矩阵分解从图像特征直接获得目标三维结构的初始值并进行优化。

以上测量物体形状的方法都仅能测得非透明物体的三维形状,无法应用于透明物体的形状测量。Miyazaki 等采用偏振光迹法分析了光的反射、折射和透射,对透明物体的形状测量进行了建模研究<sup>[10]</sup>。刘元坤等<sup>[11]</sup>提出一种新的相位物体波前测量方法,采用主动条纹偏折和相移技术,可精确测量透明相位物体引起的偏折角及其波前分布。本文从透明物体反射光的偏振状态分析着手,研究偏振特性与物体形状之间的关系,结合光学测量和图像处理技术,提出可以通过对反射光偏振图像的分析重

建透明物体形状。

## 2 透明物体表面反射光偏振特性分析

从物体表面反射的光可分为两部分:镜面反射光和漫反射光<sup>[12]</sup>。当一束光照射到物体表面上时,一部分光在物体表面发生直接反射,这部分反射光称为镜面反射光,另一部分光透射到物体内部,在内部经多次反射后被散射到入射空间,这部分光称为漫反射光。对于透明物体而言,从物体表面反射的光只有镜面反射光。

自然光是非偏振光,它在与光的传播方向垂直的平面内沿各个方向具有相同的振动。当自然光通过偏振片或在物体表面发生反射时,会变成部分偏振光。

如图 1 所示,折射率分别为  $n_1$  和  $n_2$  的两种介质 1、2 的分界面为  $x-y$  平面(垂直于纸面的平面)。一束平面光在入射面  $x-z$  面内从介质 1 入射到介质 2 上。此时,光一部分在分界面处发生折射透射入介质 2,另一部分在分界面反射。 $E_{ap}$ 、 $E_{rp}$ 、 $E_{tp}$  分别为入射光、反射光、折射光的平行入射面的分量,而  $E_{as}$ 、 $E_{rs}$ 、 $E_{ts}$  分别为入射光、反射光、折射光垂直于入射面的分量。若介质 2 是透明的绝缘体,则入射到其中的光将形成透射光,不会再返回入射空间,因此对透明物体而言反射光中不包含漫反射成分。由菲涅耳反射公式及光强的定义式,可得平行于入射面的反射分量  $E_{rp}$ 、垂直于入射面的反射分量  $E_{rs}$  的强度反射率  $F_p$  和  $F_s$  分别为

$$F_p = \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad F_s = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)}, \quad (1)$$

其中,  $\theta_1$  为入射角,  $\theta_2$  为折射角。

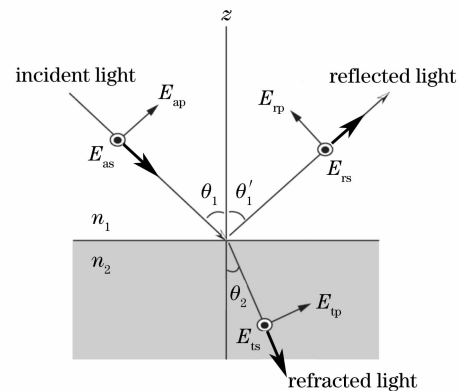


图 1 菲涅耳反射

Fig. 1 Fresnel reflection

强度反射率与入射角  $\theta_1$  的函数关系如图 2 所示。由图可知,自然光经透明物体反射后,反射率随

光的振动方向不同而不同,即反射光表现出部分偏振光的特性。故将反射光通过偏振片,旋转偏振片时亮度会发生变化。垂直于入射面的反射光强最大,平行于入射面的反射光强最小。旋转偏振片观察亮度变化,会得到如图 3 所示的以上述两个反射光强为最大最小值的正弦波形。最大最小光强值分别为  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$ 。

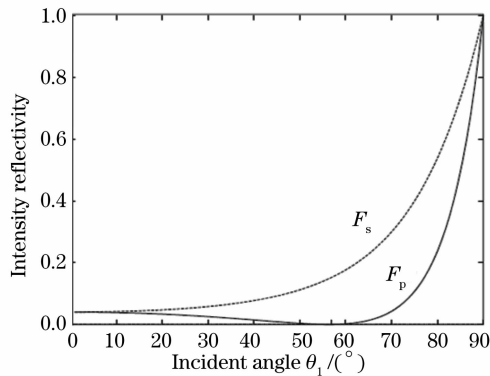


图 2 强度反射率与入射角之间的关系

Fig. 2 Relationship between intensity reflectivity and incident angle

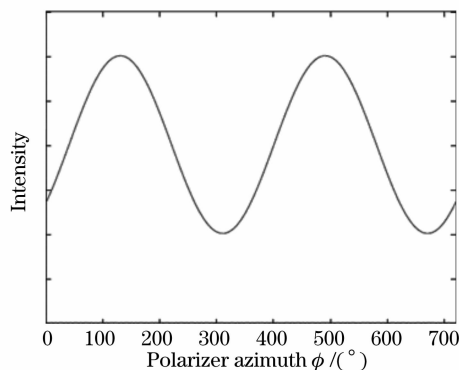


图 3 光强与偏振片方向的函数关系

Fig. 3 Relationship between intensity and polarizer azimuth

由于得到最小光强值  $I_{\min}$  时的偏振片的方位角对应于平行于入射面的反射成分  $E_{\text{rp}}$ , 所以此时的偏振片方位角即为入射面的方位角  $\phi$ , 据此可确定入射面的方向。

偏振度  $\rho$  定义为

$$\rho = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (2)$$

根据菲涅耳公式和折射定律可导出偏振度  $\rho$  的另一个表达式

$$\rho = \frac{2 \sin \theta \tan \theta \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 - \sin^2 \theta + \sin^2 \theta \tan^2 \theta}, \quad (3)$$

式中,  $n$  为被测物体的折射率,  $\theta$  为入射角。这样, 偏

振度  $\rho$  即为  $n$  和  $\theta$  的函数, 反过来若已知偏振度和折射率也可求出入射角  $\theta$ 。

假定测定对象的折射率是已知的, 偏振度  $\rho$  可根据公式(2), 由改变偏振片方向时观察到的  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$  求得。这样, 将折射率和偏振度代入上式即可确定入射角  $\theta$ 。综上所述, 求出入射面方向和入射角后即可求得法线方向, 进而获得透明物体的表面形状, 这是基于反射偏振分析测量物体形状的基本思想。

### 3 实验原理与结果分析

#### 3.1 实验设置

为获得较理想的实验结果, 做以下假设: 1) 被测物体的折射率是已知的; 2) 物体表面是光滑的, 因此只有镜面反射; 3) 物体表面不存在自遮挡, 即消除了自身相互反射的影响。

为使被测物体得到全方位均匀光照射, 实验中采用一个光扩散体。光扩散体为白色磨砂中空玻璃球, 直径为 35 cm。在这个光扩散体周围均匀放置 8 只功率为 100 W 的白炽灯, 从而在光扩散体内部形成全空间各个方向一致的均匀光照。将被测物体放在球中心, 在这个球状光扩散体上方开一圆孔, 放置 CCD 照相机, 在相机镜头前放置一偏振片, 则可一次性全面测定被测透明物体的表面形状。实验装置如图 4 所示。

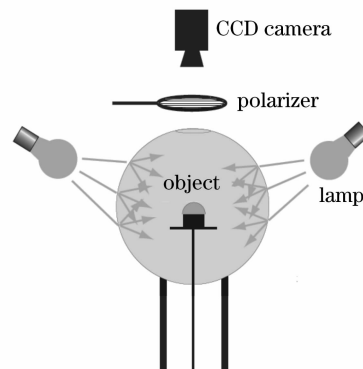


图 4 实验装置原理图

Fig. 4 Diagram of experimental setup

#### 3.2 实验方法与精度分析

被测物体为由折射率为 1.516 的 K9 玻璃制成的直径为 5 cm 的半球体。利用自行研制实验装置拍摄被测物体的偏振灰度图像。测定过程中, 偏振片的偏振角从  $0^\circ$  到  $180^\circ$  之间每  $5^\circ$  拍一次照, 则得到 36 枚图像。这里采用 MATLAB 软件对拍得的图像进行处理, 为减少由噪声影响, 采用了中值滤波方法。若将图像上每一像素的法线方向都表示出来,

则法线分布过于密集,处理的数据量也过大,为此,将拍摄到的图片进行分格处理,这里每 25 pixel 取一点作图,以每个网格内 25 pixel 的平均灰度值作为每个网格的灰度值进行处理。

从这些经预处理后的图像中测定各像素的光强变化,即可得到每个像素的光强的最大值和最小值  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$ 。这里的数据是由偏振片转动每隔  $5^\circ$  测定一次得到的,因采样间隔大,故得到的数据的最大值和最小值和真值未必一致。这里将由 36 幅图像得到的数据绘制成正弦波形用非线性最小二乘法拟合,求得其振幅的最大值  $I_{\max}$  和最小值  $I_{\min}$ 。基于前面已叙述过的测定原理,可求得每个像素点的入射面方向  $\phi$  和入射角  $\theta$  的大小。

为确定物体的形状,可以假设物体表面是一个笛卡尔曲面  $z = f(x, y)$ , 则物体上某点法线  $\mathbf{n}$  为

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p = \tan \theta \cos \phi \\ q = \tan \theta \sin \phi \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

求出  $\mathbf{n}$  后通过求积分便可确定表面  $z = f(x, y)$ 。为了保证图像的连续性,这里应用了基于泰勒估计的松弛迭代法。经过上述处理过程后,透明物体的表面形状得以复现。

实验中对半球状玻璃体进行了表面形状的测量,图 5 给出了被测物体图像、其中的一幅偏振图像及测量得到的物体三维形状图。

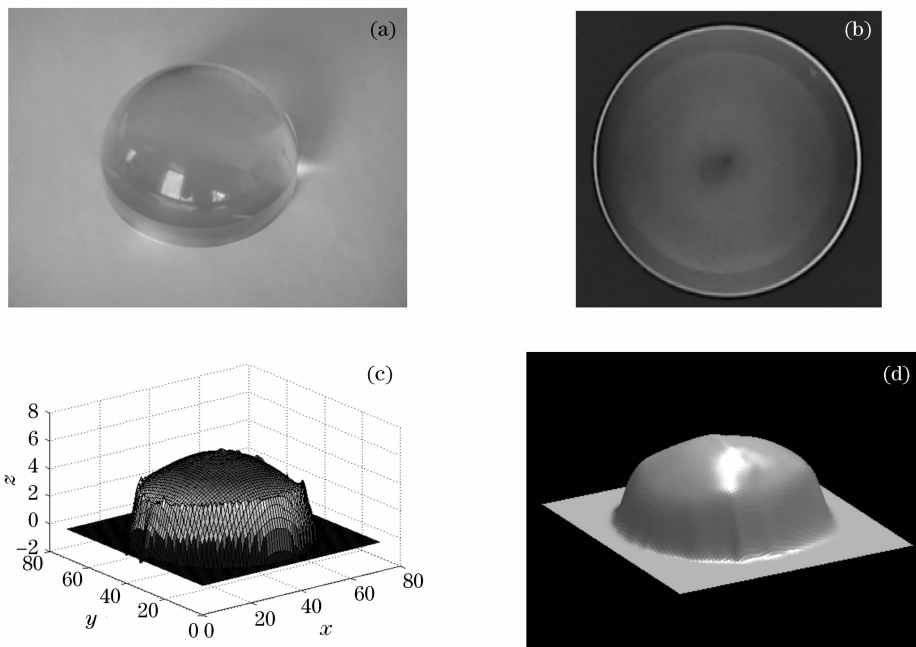


图 5 (a) 半球状玻璃体实物图;(b) 偏振图像;(c) 恢复后的物体三维图;(d) 计算机模拟图

Fig. 5 Semispherical glass (a) object to be measured; (b) polarized images; (c) resumed three-dimensional image; (d) simulated image

从图中可以看出,恢复出的半球状透明物体形状与实际被测物体的形状已能很好地吻合,表明这种方法是正确和可行的。但从图中也可看出测量结果与被测物体之间存在一定的误差。这里取过半球顶点的半圆做精度分析,通过求得半圆上各像素点高度的实验值与真值之差得到误差曲线如图 6 所示,由图 6 可知,在物体顶部即入射角较小的部分以及边缘部分误差较大,其余部分误差较小。分析原因如下:

1) 为拍摄偏振图像,需要在光散射体的顶部开一个圆孔来放置偏振检测器和 CCD 相机,该圆孔成

像在被测透明物体顶部,导致计算误差。减小圆孔尺寸,同时保证圆孔处光反射均匀,可以提高测量精度。

2) 光散射体内部光照分布难以保证绝对均匀。在光散射体周围设置的 8 个白炽灯位置分布不够均匀,每个白炽灯功率均匀性也难保持一致,同时光散射体透过率不均匀,这些都导致照射到物体表面的光照不够均匀,导致偏振度计算、入射角计算误差。从而使测量得到的物体形状出现偏差。精确计算各光源位置,并增加光源数量,同时保证各光源一致性,使其在空间分布更加均匀,可以减小由光源引起

的误差。

3) 光散射体内表面漫反射性不够理想,使被测物体和内壁间存在相互反射,导致光照不均匀,影响测量精度。此外,由于拍摄图像噪声影响,也降低了测量精度。采用的光散射体为磨砂玻璃空心球,其厚度均匀性也不够理想,因此需要一个内外面均为朗伯面,厚度均匀的散射体,以保证内部环境光照均匀。同时在图像处理过程中研究新的算法,分析噪声特性,减少噪声影响,提高测量精度。

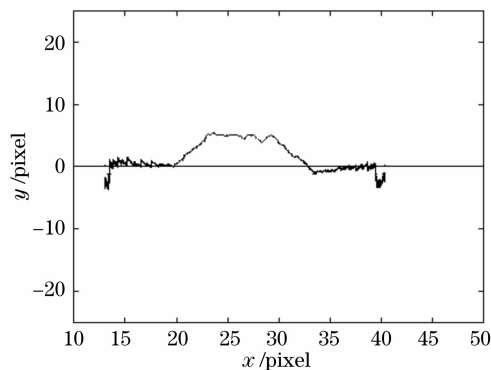


图 6 误差曲线

Fig. 6 Error curve

## 4 结论

提出了依据反射光的偏振特性测量透明物体形状的原理和方法,并通过自行设计、研制的实验平台及构建的算法完成了实际透明物体形状的测量。实验结果证明了该方法的有效性。

### 参 考 文 献

- 1 Y. Sato, M. D. Wheeler, K. Ikeuchi. Object shape and reflectance modeling from observation[C]. Proceedings of ACM SIGGRAPH 97, in Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series 1997, ACM SIGGRAPH, 379~387
- 2 Sui Jing, Jin Weiqi. Realization and development of binocular stereo vision technology [J]. *Application of Electronic Technique*, 2004, **10**: 4~6
- 隋 婧, 金伟其. 双目立体视觉技术的实现及其进展[J]. *电子技术应用*, 2004, **10**: 4~6
- 3 R. Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses [J]. *IEEE Journal of Automation*, 1987, **3** (4): 323~334
- 4 Tang Yan, Chen Wenjing. Neural network applied to three-dimensional measurement of complex objects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1433~1439 (in Chinese)
- 唐 燕, 陈文静. 应用神经网络的复杂物体三维测量[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1433~1439
- 5 E. Prados, O. Faugeras. Perspective shape from shading and viscosity solutions [C]. In *ICCV*, 2003, **2**: 826~831
- 6 S. Peleg, M. Ben-Ezra. Stereo panorama with a single camera [C]. *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition Conf.*, 1999, 395~401
- 7 M. Clerc, S. Mallat. The texture gradient equation for recovering shape from texture [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*, 2002, **24**(4): 536~549
- 8 Tao Xiang, Loong-Fah Cheong. Understanding the behavior of SFM algorithms: a geometric approach [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2003, **51**(2): 111~137
- 9 Qiu Zhiqiang, Liang Yonghui, Yu Qifeng. Three-dimensional structure reconstruction from image sequence based on affine approximation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1004~1010 (in Chinese)
- 邱志强, 梁永辉, 于起峰. 基于仿射近似从序列图像重建目标三维结构[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1004~1010
- 10 Daisuke Miyazaki, Masataka Kagesawa, Katsushi Ikeuchi. Transparent surface modeling from a pair of polarization images [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*, 2004, **26**(1): 73~82
- 11 Liu Yuankun, Su Xianyu, Wu Qingyang. Wavefront measurement for transparent object by active deflectometry [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(4): 515~518
- 刘元坤, 苏显渝, 吴庆阳. 基于主动条纹偏折术的透明相位物体波前测量方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 515~518
- 12 Han W. B., Yang J. H. *et al.*. Researches on estimating surface reflection properties from images [C]. *ISTM*, 2007, **2**: 1322~1324