

〈综述与评论〉

透明物体面形偏振成像测量技术综述

刘敬, 金伟其, 王霞, 王亚慧, 夏润秋

(北京理工大学 光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 无偏漫射光被物体反射后变为部分偏振光, 菲涅尔定律阐明了入射角和反射光偏振度的定量关系。入射面的方位角和反射光的偏振角存在 90° 的方位差, 由此可以获得入射面的方位角。综述了透明物体面形偏振成像测量的研究进展, 首先介绍了Lawrence B Wolff提出的反射模型及透明物体反射光类型; 进一步介绍了基于镜面反射光偏振特性的透明物体面形偏振成像测量原理, 并针对测量中存在的入射角和入射面方位角歧义问题, 综述了目前国内外消除入射角和消除入射面方位角歧义的方法。鉴于已有算法均假定反射光线平行于偏振成像系统的光轴, 但实际应用中常常不能满足这个假设, 为此简单介绍了作者提出的基于向量运算的透明物体面形偏振成像测量方法; 最后分析了透明物体面形偏振成像测量进一步的研究方向。

关键词: 透明物体; 偏振面形测量; 入射角歧义; 方位角歧义

中图分类号: O436.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2014)09-0681-07

Review of Shape from Polarization for Transparent Object

LIU Jing, JIN Wei-qi, WANG Xia, WANG Ya-hui, XIA Run-qiu

(MOE Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A nonpolarized light, after being reflected by an object, becomes partially linearly polarized. Given the refractive index, Fresnel's law gives the quantitative relation between degree of polarization and incident angle. The polarization angle of secularily reflected light is 90° from the azimuth angle of the incident plane. In this paper, we review the theory basis and algorithm of shape from polarization for transparent object. Firstly, the reflection model proposed by Lawrence B Wolff is introduced, which illustrates the reflection feature of transparent object. Then is the algorithm of shape from polarization for transparent object based on polarization of specularly reflected light. Since the azimuth angle ambiguity and zenith angle ambiguity are inherent to shape from polarization algorithm, techniques for disambiguation are reviewed respectively. Existing algorithm of shape from polarization were established on the assumption that the reflected light is parallel to the optical axis of the polarimetry, which is not always satisfied in actual application. To devote this problem, the vector based algorithm by the author is briefly introduced. Finally, the future research direction is pointed out.

Key words: transparent object, shape from polarization, zenith angle ambiguity, azimuth angle ambiguity

0 引言

三维面形测量技术一直是人们关注并投入许多精力的研究领域, 三维面形测量主要分为机械式接触测量方法和光电式非接触测量方法。机械式接触测量

方法(如接触式表面轮廓仪)通过仪器的触针与被测表面的滑移进行测量, 测量速度较慢, 且接触式触针容易划伤被测表面^[1]。光电式非接触测量方法是目前广泛使用的方法, 通过分析被测物体的二维图像获得三维面形信息, 可实现快速、非接触测量。典型的非

收稿日期: 2014-08-29; 修订日期: 2014-09-15。

作者简介: 刘敬(1986-), 女, 河北人, 博士生, 主要从事偏振成像、图像处理方面的研究。E-mail: 10904005@bit.edu.cn。

通讯作者: 金伟其(1961-), 男, 上海, 教授、博导, 主要从事光电图像处理、夜视与红外技术、光电检测与仪器等方面的研究。E-mail: jinwq@bit.edu.cn。

基金项目: 863计划项目, 编号: 2013AA7031068B; 国家自然科学基金重点项目, 编号: 61231014。

接触测量方法有相干测量和结构光测量^[2]。干涉测量速度快、测量精度高，但是对照明光源的相干性具有很高的要求；结构光测量技术同样具有高测量精度，但是需要对相机和结构光源进行定标，且对结构光光源要求较高^[3]。

在光学元件面形三维检测^[1]、海面波纹测量^[4]等领域，存在对透明物体的三维面形测量问题。首先，由于透明物体的反射信息受面形影响较大；其次，光学元件的检测对测量精度和速度有较高的要求，因此接触损伤不仅影响测量结果而且损伤被测元件。为了避免接触损伤，要求采用非接触式测量方式；由于海面波纹是动态目标，对测量方法的快速性和实时性有非常高的要求，同时被测目标的空间范围也比较大。因此，传统的光电三维测量方法难以用于光学元件在线检测和海面波纹测量等场合。

目前国内外已发展了一系列基于 X 的三维面形重构技术 (shape from X: shading, motion, texture, stereo, polarization, etc.)^[5]，其中大部分方法都是通过分析被测物体的体反射光实现面形测量，只有基于偏振成像的面形重构技术 (shape from polarization) 通过分析被测物体面反射光偏振信息来实现面形测量^[6]。鉴于透明物体的反射光主要是面反射光，因此，基于偏振成像的面形重构成为一种可行的透明物体面形测量技术。本文将从透明物体面形偏振成像测量的原理出发，针对测量中存在的歧义解及其剔除方法，综述国内外的典型研究进展。

1 Shape from polarization 的原理

1979 年日本的 K. Koshikawa 首次提出用偏振方法探测光滑表面的形状^[7]。1987 年美国的 Lawrence B Wolff 提出了利用镜面反射光的偏振特性测量光滑曲面面形^[8-10]，并在 1991 年针对偏振成像面形测量技术，对物体表面的反射光进行了分类^[11]。在此研究基础上，各国陆续进行了透明物体面形偏振成像测量的研究。

1.1 表面偏振反射模型

通常，物体的表面不是绝对光滑的，可看成由无数光滑的微面元构成。1991 年 Lawrence B Wolff 研究提出：从物体表面反射的光可归纳为 4 类（如图 1^[11] 所示）：

- 1) 被远大于入射光波长的微面元一次反射，即镜面反射；
- 2) 被远大于入射光波长的多个微面元的多次反射（至少 2 次反射），即漫射光；
- 3) 光进入物体内部，在物体内部颗粒间散射后，最终折射入空气，即体反射；

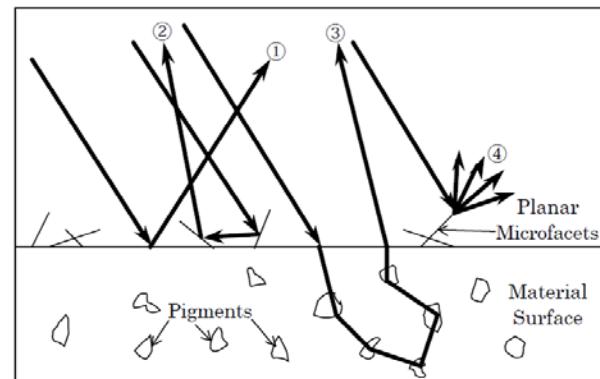


图 1 物体表面反射光分类

Fig.1 Reflection of light from a material surface

4) 衍射光。

在这 4 种反射中，发生第 4 种衍射光的情况非常少，只在物体具有光波长尺寸的结构处才会发生，其余情况下可忽略第 4 种衍射光。

第 3 种体反射反应了光在物体中发生的散射和吸收；第 1 种和第 2 种统称为高光。对于透明的被测物体，理想情况下可以认为：物体表面的反射成分只存在第 1 种镜面反射的情况。

镜面反射光偏振度是入射角的非单调函数：

$$\rho_s = \frac{2 \sin^2 \theta_i \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i - n^2 \sin^2 \theta_i - \sin^4 \theta_i}}{n^2 - \sin^2 \theta_i - n^2 \sin^2 \theta_i - 2 \sin^4 \theta_i} \quad (1)$$

任何小于 1 的偏振度都对应 2 个可能的入射角，其分别位于布儒斯特角的两侧，如图 2^[12] 所示。

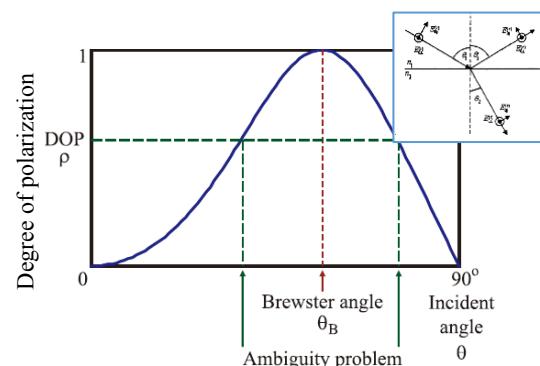


图 2 镜面反射光的偏振度和入射角的关系

Fig. 2 Relationship between θ and DoP for specular reflection

漫反射光的偏振度是入射角的单调增函数：

$$\rho_d = \frac{\left(n - \frac{1}{n}\right)^2 \sin^2 \theta_i}{2 - 2n^2 - \left(n + \frac{1}{n}\right)^2 \sin^2 \theta_i + 4 \cos \theta_i \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}} \quad (2)$$

偏振度和入射角存在一一对应关系,如图3^[13]所示。

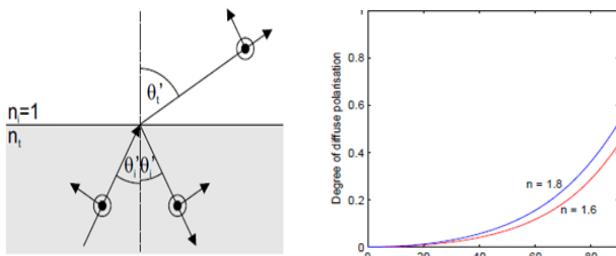


图3 漫反射光的偏振度和入射角的关系

Fig.3 Relationship between θ and DoP for diffuse reflection

1.2 Shape from polarization 的原理

图4^[12,19]为透明物体面形偏振成像测量的示意图,光源照射到被测目标上一点,镜面反射光线被偏振成像系统接收。定义照明光线、观测方向和曲面法向量所在的平面为入射面。如图5^[1]所示,对于透明物体,反射光主要为面反射光,体反射光可以忽略,因此入射角等于反射角。建立成像系统坐标系,曲面的法向量可以表示为入射角 θ 和入射面方位角 Φ 的函数。曲面的法向量的球坐标表达式为^[9-11,14-18]:

$$\vec{n} = [\tan \theta \cos \Phi, \tan \theta \sin \Phi, 1] \quad (3)$$

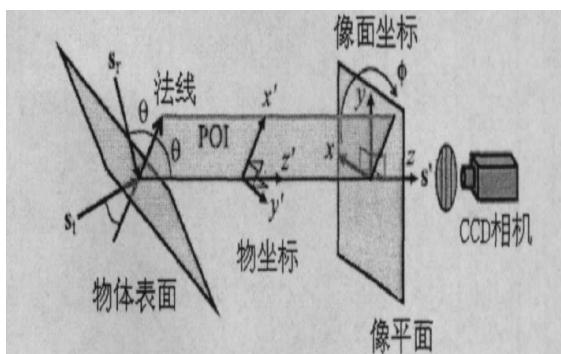
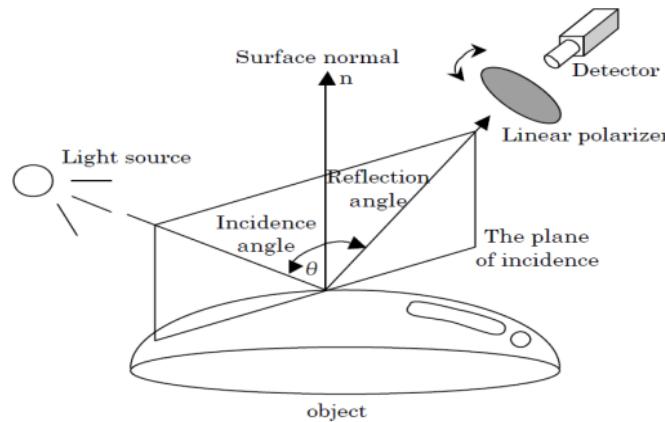


图4 透明物体面形偏振成像测量示意图

Fig.4 Diagram of shape from polarization

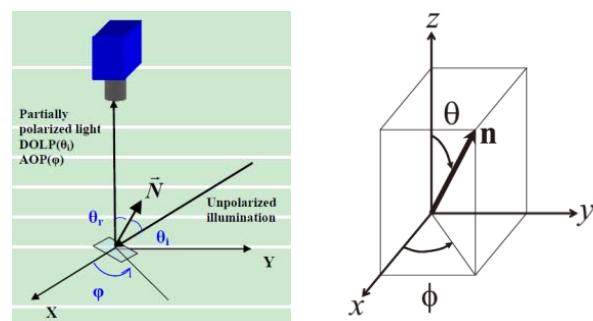


图5 球坐标系中的曲面法向量

Fig.5 Surface normal in spherical coordinate

如图4所示的偏振成像系统,在普通光电成像探测器前端加可旋转线偏振片实现偏振成像。在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围,每隔 5° 旋转一次偏振片,并采集对应的偏振图像。定义反射光偏振方向与线偏振片透光方向的夹角为 θ_{pol} ,探测器接收的光强关于 $2\theta_{\text{pol}}$ 按正弦规律变化。对上述每隔 5° 采集的偏振图像进行数据拟合,得到 I_{\min} ,此时对应的线偏振片方向与反射光线偏振方向垂直,由此可以获得反射光线偏振方向 φ ,如图6^[20]所示。

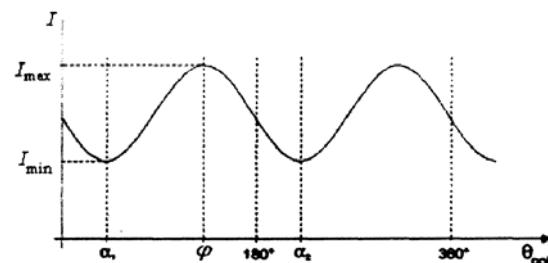


图6 偏振片旋转角度和图像强度的对应关系

Fig.6 Relationship between image intensity and polarizer angle

对于镜面反射,反射光的偏振方向主要由S光决定,因此反射光的偏振方向 φ 与入射面的方位角 Φ 存在 90° 的夹角,即:

$$\Phi = \varphi \pm 90^\circ \quad (4)$$

由式(4)可知,镜面反射光的偏振方向 φ 、入射面的方位角 Φ 存在2个可能的取值。

由菲涅尔定律,反射光的偏振度是关于入射角 θ 和介质折射率 n 的函数:

$$\rho_s = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2 \sin \theta \tan \theta \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 - \sin^2 \theta + \sin^2 \theta \tan^2 \theta} \quad (5)$$

由图2可知,除 $\rho_s=1$ 外,每个 $\rho_s < 1$ 对应2个可能的入射角 θ_1 和 θ_2 ,即入射角也存在不确定性。

算法步骤:

- 1) 旋转线偏振片, 测量 I_{\max} 和 I_{\min} 。
- 2) 获得与探测器接收 I_{\min} 对应的线偏振方位角 φ , 利用式(4)得到入射面的方位角 Φ 。

3) 利用 I_{\max} 和 I_{\min} , 由式(5)计算反射光的偏振度 ρ_s 。

4) 已知被测物体的折射率 n , 由式(5)得到入射角 θ 。

5) 根据式(3)得到曲面法向量的球坐标表达式。

近年来研究提出的同时偏振成像系统, 不需要旋转偏振片, 一次曝光即可获得反射光的全部偏振信息, 通过斯托克斯矢量表示反射光的偏振度和偏振角^[1,21]。

1.3 入射角不确定性的消除

图2中所示的入射角的不确定性, 会引起被测曲面法向量的不确定性, 国内外已陆续提出了几种消除入射角不确定性的方法。

对于每个 $\rho_s < 1$, 由于 θ_1 和 θ_2 分别位于布儒斯特角 θ_B 的两侧, 只要确定入射角 θ 相对于布儒斯特角 θ_B 的大小, 即可获得唯一确定的入射角 θ 。

1.3.1 旋转测量法

日本东京大学的 Daisuke Miyazaki 通过分析被测曲面反射光偏振度的一阶微分, 来确定入射角 θ 相对于布儒斯特角 θ_B 的大小^[5,6,12,19,22]。如图7所示, 分别采集旋转前后被测物体的偏振图像, 获得两组偏振度数据, 计算这两组偏振度数据的差值。由图8所示的偏振度及其一阶微分的关系可知, 当入射角小于布儒斯特角时, 偏振度的一阶微分大于0, 当入射角大于布儒斯特角时, 偏振度的一阶微分小于0。因此, 可以根据旋转前后两组偏振度数据的差值确定入射角相对于布儒斯特角的大小, 进而获得唯一确定的入射角。国内长春理工大学也开展了这方面的研究^[23-32]。

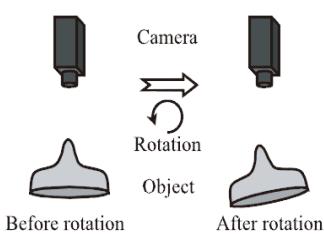


图7 偏振测量曲面形示意图 (旋转前、旋转后)

Fig.7 Object rotated at a small angle

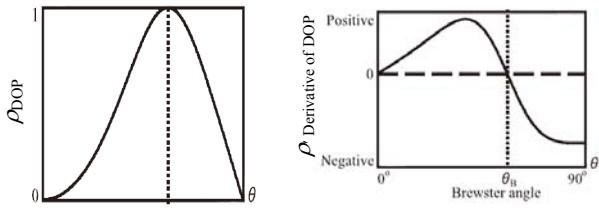


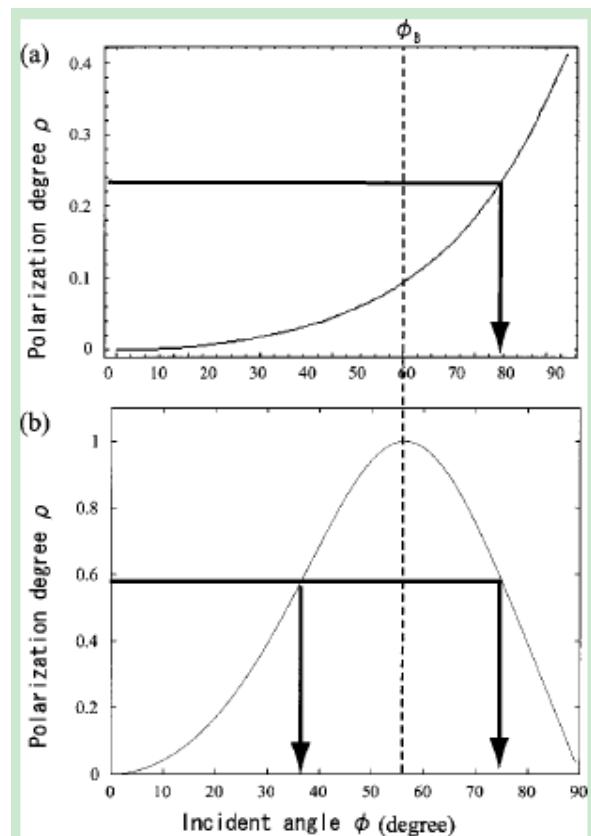
图8 偏振度及其一阶微分示意图, $n=1.5$

Fig.8 Degree of polarization and derivative of DoLP, $n=1.5$

1.3.2 可见光、红外双波段测量方法

英国的 Mike Partridge^[33]和日本东京大学的 Daisuke Miyazaki^[19]分别于 1995 年和 2002 年提出在

可见光波段和红外波段分别采集被测物体的偏振图像, 来获得唯一确定的入射角。可见光波段偏振度和入射角的关系、红外波段偏振度和入射角的关系如图9^[19]所示。在红外波段, 偏振度和入射角存在一一对应关系。因此, 综合分析可见光波段的偏振数据和红外波段的偏振数据, 可以获得唯一确定的入射角。测量装置如图10^[19]所示。红外偏振探测通过红外探测器前端加装可旋转红外金属线栅偏振片构成, 用吹风机加热被测物体, 以获得较强的红外辐射。



(a) IR $3 \sim 5 \mu\text{m}, n=1.5$ (b) Vis., $n=1.5$

图9 偏振度和入射角的关系图

Fig.9 DoP for infrared and visible light respectively

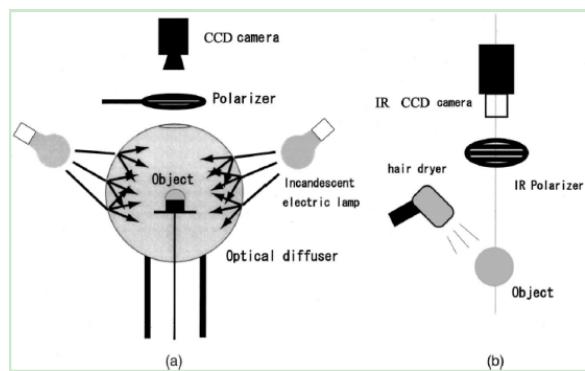


图10 可见光与红外偏振测量示意图

Fig.10 Experimental setup of visible light and infrared polarization

1.3.3 漫反射入射角歧义消除方法

英国于2004年^[13,17,20,34]、美国于2012年^[35]分别提出利用漫反射光来消除入射角的歧义值的方法。如图3所示,漫反射光的偏振度和入射角是一一对应的关系。首先,利用镜面反射的偏振数据获得2个可能的入射角,然后利用漫反射光的偏振度剔除歧义值,获得唯一确定的入射角。这种方法尚存在镜面反射和漫反射成分的分离问题,以及漫反射能量非常弱的问题。

1.3.4 可见光双波段方法

2012年法国提出测量不同可见光波段的偏振度数据,通过分析偏振度关于波长的微分,消除入射角的歧义值^[36]。此原理与双波段测温的原理类似。如图11^[36]所示,测量两个波段的偏振度 $\rho_{\lambda 1}$ 和 $\rho_{\lambda 2}$,其中 $\lambda_1 > \lambda_2$;计算偏振度关于波长的差分 $\Delta\rho = \rho_{\lambda 1} - \rho_{\lambda 2}$;如果 $\Delta\rho > 0$,取 $\theta = \theta_1 < \theta_B$,否则取 $\theta = \theta_2 > \theta_B$ 。

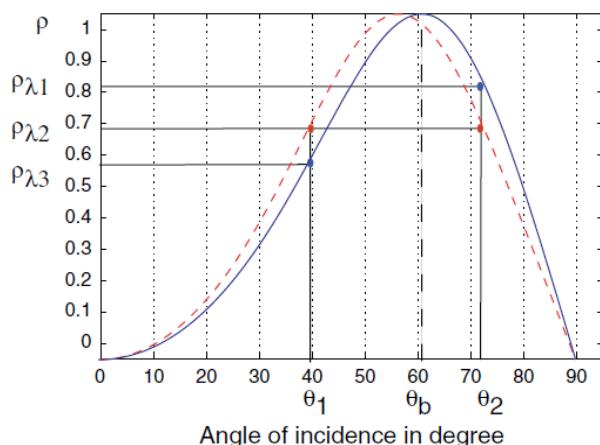


图11 偏振度、入射角、波长的关系, $\lambda_1=655\text{ nm}$, $\lambda_2=472\text{ nm}$

Fig.11 Two DoP curves simulated for two wavelengths

1.4 入射面方位角不确定性的消除

由式(4)可知,当镜面反射光的偏振角确定后,存在两个可能的入射面方位角,且这两个可能的入射面方位角相差 180° 。法国提出采用主动照明的方法消除入射面方位角的歧义^[18,37,38]。

主动照明光源由环形光源和漫射半球穹顶构成,环形光源由LED阵列构成,可分别控制4个象限的亮暗(如图12^[37])。照明光线四象限的分割和定义的探测器坐标系存在夹角 $\beta \in [0, \pi/2]$ 。

将偏振角 φ 和入射面方位角 Φ 的关系式(4)改为:

$$\Phi = \varphi - \frac{\pi}{2} + \begin{cases} 0 & \text{当法向量指向南侧} \\ \pi & \text{当法向量指向北侧} \end{cases} \quad (6)$$

为消除入射面方位角的歧义,定义参量 I_{quad} ,其

获取方法(如图13^[37]所示):二值图像 I_{bin1} 区分法向量的东、西指向,通过比较东侧光照明和西侧光照明获得的两组图像的差值得到;同理,二值图像 I_{bin2} 区分法向量的南、北指向,通过比较南侧光照明和北侧光照明获得的两组图像的差值得到。 I_{quad} 区分法向量在西北、东北、西南、东南4个方向的指向,表达式为:

$$I_{\text{quad}} = 2I_{\text{bin1}} + I_{\text{bin2}} \quad (7)$$

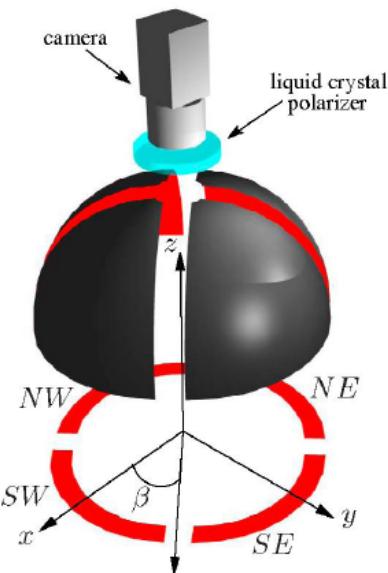


图12 active lighting system 的部件分解图

Fig.12 Exploded view of the active lighting system

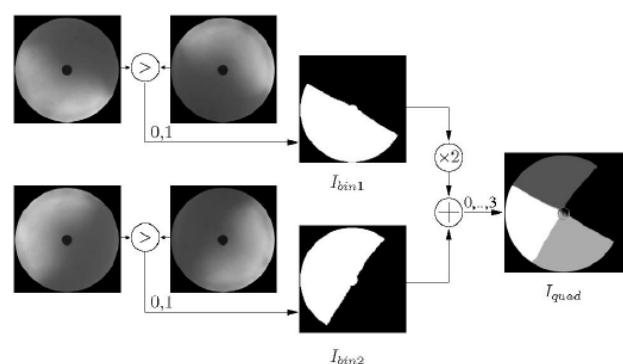


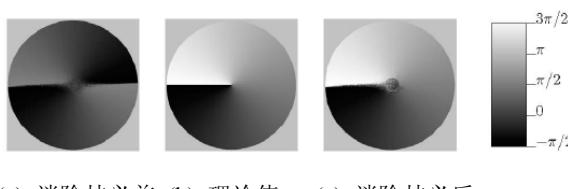
图13 I_{quad} 的计算方法

Fig.13 Acquisition principle of the segmented image I_{quad}

当法向量指向南侧时,取:

$$\Phi = \begin{cases} \varphi - \frac{\pi}{2} & \text{当法向量指向南侧} \\ \varphi + \frac{\pi}{2} & \text{当法向量指向北侧} \end{cases}$$

进而可消除入射面方位角取值的歧义。消除歧义前后的入射面方位角图像如图14所示。



(a) 消除歧义前 (b) 理论值 (c) 消除歧义后
图 14 入射面方位角图像

Fig.14 Disambiguation of the azimuth angle

2 改进的 shape from polarization 方法

目前国内外已有研究大多假定反射光方向平行于探测器光轴，其仅在近轴条件下成立，限制了相关的应用。我们提出一种基于向量运算的透明物体面形偏振成像测量方法^[39]，通过分析反射光、反射面的法向量、反射面和像面的交线 3 个向量与微面元的法向量的几何关系，运用向量运算反演微面元的法向量，对反射光是否平行于探测器光轴没有要求。为验证方法设计了一套能够同时获得 4 种不同偏振态图像的高分辨率偏振成像系统，如图 15^[40-42]，图中给出了 $\lambda=532\text{ nm}$ 的双分离渥拉斯顿棱镜同时偏振成像实验系统。对 K9 玻璃楔角进行了测量实验，取得了较好的实验结果。



图 15 双分离渥拉斯顿棱镜同时偏振成像实验系统
Fig.15 Diagram and prototype of simultaneous imaging polarimetry

3 结束语

本文首先介绍了 Lawrence B Wolff 提出的反射模型，并基于此简介了透明物体面形偏振成像测量的理论基础，指出测量中存在的入射角和入射面方位角歧义问题；进而综述了已有的消除入射角及入射面方位角歧义的方法；通过多波段成像或者通过旋转被测物体多次成像消除歧义，均不能通过一次偏振测量获得无歧义的被测物体表面的法向量；通过漫射光消除入射角歧义也存在信号微弱和信号分离问题。因此，仍然需要进一步研究消除入射角或入射面方位角歧义的方法。

透明物体面形的非接触测量属于较为特殊的测量，随着诸如在光学零件在线面形测量、机载水下目标探测等应用对高精度快速测量的需要，相关测量技术必将得到快速的发展。

参考文献：

- [1] Vedel M, Lechocinski N, Breugnot S. 3D shape reconstruction of optical element using polarization[C]//Proc. of SPIE, 2010, **7672**: 767203-1-767203-13.
- [2] Ruo Zhang, Ping-Sing Tsai, James Edwin Cryer, et al. Shape from shading a survey[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, **21**(8): 690-706.
- [3] Pablo d' Angelo, Christian Wohler. 3D surface reconstruction based on combined analysis of reflectance and polarization properties: a local approach[C]//Proc. of SPIE, 2005, **5856**(1): 491-502.
- [4] Christopher J Zappa, Michael L Banner, Howard Schultz, et al. Retrieval of short ocean wave slope using polarimetric imaging[J]. Measurement Science and Technology, 2008, **19**(5): 1-13.
- [5] Daisuke Miyazaki, Masataka Kagesawa, Katsushi Ikeuchi. Transparent surface model from a pair of polarization images[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, **26**(1): 73-82.
- [6] Daisuke Miyazaki, Masataka Kagesawa, Katsushi Ikeuchi. Polarization-based transparent surface modeling from two views[C]//Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Computer Vision, 2003, **2**: 1381-1386.
- [7] K Koshikawa. A polarimetric approach to shape understanding of glossy objects[C]//Proceedings of IJCAI. 1979: 493-495.
- [8] Lawrence B. Wolff. Spectral and polarization stereo methods using a single light source[C]. Proceedings of ICCV. 1987: 708-715.
- [9] Lawrence B Wolff. Surface orientation from polarization images[C]//Proc. of SPIE, Optics, Illumination and Image Sensing for Machine Vision II, 1987, **850**: 110-121.
- [10] Lawrence B Wolff. Shape from polarization images[C]//Proceedings of the IEEE Computer Society Workshop on Computer Vision, 1987: 79-85.
- [11] Lawrence B Wolff, Terrance E Boult. Constraining object features using a polarization reflectance model[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, **13**(7): 635-657.
- [12] Daisuke Miyazaki. Shape estimation of transparent objects by using polarization analysis[D]. Japan: The University of Tokyo, 2004.
- [13] Gary A Atkinson, Edwin R Hancock. Shape from diffuse polarization[C]//Proceedings of British Machine Vision Conference, 2004: 1-10.
- [14] Megumi Saito, Yoichi Sato, Katsushi Ikeuchi, et al. Measurement of surface orientations of transparent objects using polarization in highlight[C]//Systems and Computers in Japan, 2001, **32**(5): 64-71.
- [15] Megumi Saito, Yoichi Sato, Katsushi Ikeuchi, et al. Measurement of

- surface orientations of transparent objects using polarization in highlight[C]//Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1999, **1**: 381-386.
- [16] Megumi Saito, Yoichi Sato, Katsushi Ikeuchi, et al. Measurement of surface orientations of transparent objects by use of polarization in highlight[J]. *Journal of the Optical Society of America A*. 1999, **16**(9): 2286-2293.
- [17] Gary A. Atkinson. Surface shape and reflectance analysis using polarisation[D]. England: The University of York, 2007.
- [18] Olivier Morel, Fabrice Meriaudeau, Christophe Stoltz, et al. Polarization imaging applied to 3D reconstruction of specular metallic surfaces[C]//Proc. of SPIE, 2005, **5679**(1): 178-186.
- [19] Daisuke Miyazaki, Masataka Kagesawa, Katsushi Ikeuchi. Determining shapes of transparent objects from two polarization images[C]//IAPR Workshop on Machine Vision Applications, 2002: 26-31.
- [20] Gary A Atkinson, Edwin R Hancock. Recovery of surface orientation from diffuse polarization[J]. *IEEE Transactions on Imaging Processing*, 2006, **15**(6): 1653-1664.
- [21] Larry J Pezzaniti, David Chenuant, Mike Roche, et al. Wave slope measurement using imaging polarimetry[C]//Proc. of SPIE, 2009, **7317**: 73170B1-73170B13.
- [22] Daisuke Miyazaki. Calculation of surface orientations of transparent objects by little rotation using polarization[D]. Japan: The University of Tokyo, 2000.
- [23] 顾国璋, 岳春敏, 李志宏, 等. 透明物体三维重现技术研究[J]. 长春理工大学学报, 2008, **31**(1): 39, 40-42.
- [24] 顾国璋. 基于偏振分析的透明物体的三维重建[D]. 长春: 长春理工大学, 2008.
- [25] 李群, 李志宏, 杨进华. 基于松弛迭代法实现物体三维结构的重建[J]. 长春理工大学学报, 2008, **31**(2): 7-10.
- [26] 武因风. 基于反射偏振的透明物体形状检测技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- [27] 胥万幸. 基于反射偏振分析物体三维重构[D]. 长春: 长春理工大学, 2006.
- [28] 杨进华, 邸旭, 岳春敏, 等. 反射光偏振特性分析与物体形状的测量[J]. 光学学报, 2008, **28**(11): 2115-2119.
- [29] 于昕平. 基于反射偏振的光滑物体形状检测[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- [30] 岳春敏, 韩福利, 李志宏, 等. 基于面反射偏振解析的物体表面形状测定[J]. 长春理工大学学报, 2007, **30**(4): 27-30.
- [31] 岳春敏, 杨进华, 李志宏, 等. 一种基于偏振解析的三维表面重建方法[J]. 应用光学, 2008, **29**(6): 844-848.
- [32] 岳春敏. 基于偏振分析的物体表面形状恢复方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2007.
- [33] Mike Partridge, R C Saull. Three-dimensional surface reconstruction using emission polarization[C]//Proc. of SPIE, 1995, **2579**: 92-103.
- [34] Gary A Atkinson, Edwin Hancock. Multi-view surface reconstruction using polarization[C]//Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Computer Vision, 2005, **1**: 309-316.
- [35] Ali H Mahmoud, Moumen T El-Melegy, Aly A Farag. Direct method for shape recovery from polarization and shading[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, 2012: 1769-1772.
- [36] Christophe Stoltz, Mathias Ferraton, Fabrice Meriaudeau. Shape from polarization: a method for solving zenithal angle ambiguity[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(20): 4218-4220.
- [37] Olivier Morel, Christophe Stoltz, Fabrice Meriaudeau, et al. Active lighting applied to shape from polarization[C]//Proceedings of International Conference on Image Processing, 2006: 2181-2184.
- [38] Olivier Morel, Christophe Stoltz, Fabrice Meriaudeau, et al. Active lighting applied to three-dimensional reconstruction of specular metallic surfaces by polarization imaging[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(17): 4062-4068.
- [39] 北京理工大学. 基于可见光偏振成像的实时非接触水面波纹测量方法: 中国, CN201310309050.3[P]. 2013-11-13.
- [40] Lan Du, Jing Liu, Xia Wang, et al. DualCCD complete stokes simultaneously imaging polarimeter and experimental data analysis[J]. *Key Engineering Materials*, 2013, **552**: 305-312.
- [41] 北京理工大学. 双分离渥拉斯顿棱镜高分辨力同时偏振成像系统: 中国, CN201210227934.X[P]. 2012-10-03.
- [42] 刘敬, 夏润秋, 金伟其, 等. 基于斯托克斯矢量的偏振成像仪器及其进展[J]. 光学技术, 2013, **39**(1): 56-62.