

基于偏振光成像的材质分类研究

刘 喆¹ 郭 俊²

¹长春理工大学光电信息学院光电工程分院, 吉林 长春 130012

²95899 部队, 北京 100085

摘要 为了降低偏振光成像技术的使用要求,提出了一种环境光照条件下研究材质分类的方法。根据菲涅耳反射定律,目标表面的反射光带有偏振成份,采用偏振成像探测偏振角得到探测器与反射面的方位角,对偏振片的4个方向强度进行补偿得到被测表面对应的水平与垂直偏振度,通过测量反射光的反射偏振度与反射率比可以分类出目标材质。对橡胶板和金属铝板两种不同材质目标的反射偏振度与反射率比进行了仿真模拟与实验研究,研究表明金属与非金属在一定观测角度范围内存在明显的反射率比差异,采用菲涅耳反射率比作为衡量依据可以更有效区分金属与非金属目标。

关键词 成像系统; 偏振成像; 材质分类; 偏振度; 反射率; 偏振角

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1011002

Study on Material Classification Based on the Polarized Imaging

Liu Zhe¹ Guo Jun²

¹Photoelectric Engineering Branch College of Optical and Electronical Information,
Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130012, China

²95899 Troops, Beijing 100085, China

Abstract In order to reduce the requirement of the application of polarization imaging technology, a method of material classification under ambient lighting condition is proposed. According to the Fresnel law of reflection, there are some polarization components with the reflected light on target surface. The azimuth angle between detector and reflector is obtained by detecting the polarization angle, horizontal and vertical polarization degree of the detected surface is obtained by compensating the four directions of the polarizer. The target material can be sorted out by measuring degree of polarization of reflected light and reflectivity ratio. The reflection polarization degree and reflectivity ratio of rubber plate and metal plate are simulated and experimental researched, the results show that there is obvious difference of reflectivity ratio between metal and nonmetal in a certain observation angle range, and the metal and nonmetal targets can be distinguished effectively by using Fresnel reflectivity ratio as a discriminated parameter.

Key words imaging systems; polarization imaging; material classification; degree of polarization; reflectivity; polarization angle

OCIS codes 110.5405; 260.5430; 290.5855; 310.5448

1 引 言

偏振光成像是继光谱成像之后,对光波矢量属性加以利用的一种新型成像技术。光波与介质相互作用产生的光中包含由介质自身特性所决定的偏振信息,而这样的偏振信息与平时所探测到的光谱、光强以及相位等信息不同^[1-4]。光波在介质表面反射或折射产生偏振态的变化,偏振态又与目标材质、折射率、粗糙度及成像角度相关,因此利用先验知识、变换测量参数或是多次测量等方法,使得偏振光成像在材质分类和三维成像中得到了广泛应用^[5-7]。偏振成像系统主要包括对被测目标光波的偏振态分解、扫描以及角度编码三个部分,从而获取被测目标的光波偏振信息。随后,对获取的图像进行一系列的处理、增强或融合,形成所需要

收稿日期: 2016-03-25; **收到修改稿日期:** 2016-05-23

作者简介: 刘 喆(1984—),女,硕士,讲师,主要从事光电技术应用方面的研究。E-mail: liuzhecust@163.com

的可视化偏振图像。最终,从图像中可得到需要了解的被测目标的信息^[8-9]。从多对一的关系中寻找到的、一般的规律是偏振成像应用的出路。在材料分类应用中,Tominaga等^[10]最早开展了偏振光材料分类的研究,证明了采用偏振光成像可以区分金属和非金属,其后 Thilak等^[11]又研究了利用相位延迟检测金属的方法。Thilak等^[12]研究了多角度偏振成像解算材料的复折射率方法,该技术能够计算出成像目标的复折射率,但需要变换成像观测角度。

本文研究了在环境光照条件下偏振成像用于材质分类的方法和条件,对于扩展偏振光成像的应用领域、降低使用条件有重要意义。模拟了偏振成像用于材料分类的一般方法,介绍了表面粗糙度和成像空间几何关系对成像探测的影响,给出了偏振角修正反射率比的方法,通过实验验证了橡胶板和金属板区分的成像结果。

2 基本原理

2.1 折射率与偏振度的关系

如图1所示的反射光路图中,菲涅耳反射定律中折射率决定了反射偏振态的变化,垂直偏振与水平偏振的反射率公式为

$$R_s(\theta) = \frac{a^2 + b^2 - 2a \cos \theta + \cos^2 \theta}{a^2 + b^2 + 2a \cos \theta + \cos^2 \theta}, \quad (1)$$

$$R_p(\theta) = \frac{a^2 + b^2 - 2a \sin \theta \tan \theta + \sin^2 \theta \tan^2 \theta}{a^2 + b^2 + 2a \sin \theta \tan \theta + \sin^2 \theta \tan^2 \theta} R_s(\theta), \quad (2)$$

式中 $R_s(\theta)$ 和 $R_p(\theta)$ 分别为垂直与水平偏振反射率, θ 为成像反射角, a 和 b 分别定义为

$$2a^2 = \sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2 \theta) + 4n^2 k^2} + (n^2 - k^2 - \sin^2 \theta), \quad (3)$$

$$2b^2 = \sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2 \theta) + 4n^2 k^2} - (n^2 - k^2 - \sin^2 \theta), \quad (4)$$

式中 n 和 k 分别为折射率实部与虚部。

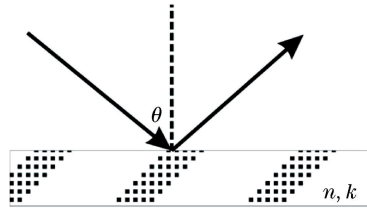


图1 反射几何关系

Fig. 1 Reflective geometry relationship

定义偏振度(DOLP)和菲涅耳反射率比分别为

$$D_{\text{DOLP}} = \frac{|R_s - R_p|}{R_s + R_p}, \quad (5)$$

$$\delta = \frac{R_s}{R_p}. \quad (6)$$

根据菲涅耳反射公式计算两种材质的反射率比和偏振度,选择金属材料的复折射率为 $3.5 + 12i$,非金属材料的折射率为 3.4 ,计算结果如图2和图3所示。从偏振度曲线中可以看出,金属材质的偏振度在观测角 $0^\circ \sim 80^\circ$ 范围内均小于 0.2 ,而非金属材质的偏振度在观测角 $40^\circ \sim 80^\circ$ 范围内高于 0.2 。当采用偏振度作为评价指标时,需要考虑观测角度因素;当采用反射率比作为标准时,观测角从 $30^\circ \sim 80^\circ$,金属的反射率比均小于 2 ,而非金属则远远高于 2 。

2.2 表面粗糙度影响

镜面反射时菲涅耳公式可以描述偏振态与观测角和折射率之间的变化规律,由图2可知,偏振度和反射率比都可以用于区分金属和非金属材料。但当表面粗糙时,漫反射的影响将会降低偏振度,这时偏振度的值

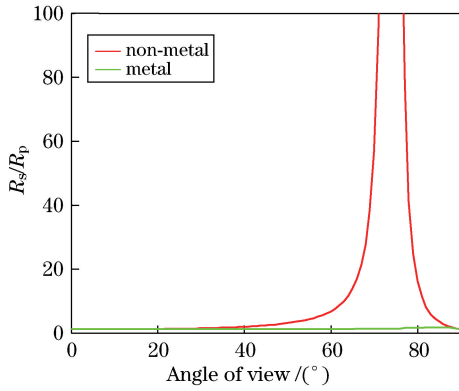


图 2 反射率比曲线

Fig. 2 Curve of reflectivity ratio

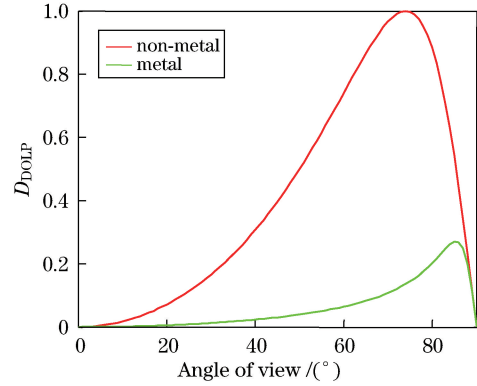


图 3 偏振度曲线

Fig. 3 Curve of DOLP

将不能用于表示材料折射率。光线经表面反射后反射光经过角度为 θ 偏振片的强度可表示为

$$I(\theta) = \frac{1}{2}I_d + \frac{R_p \cos^2\theta + R_s \sin^2\theta}{R_s + R_p}I_r, \quad (7)$$

式中 I_d 为漫反射强度信号, I_r 为镜面反射信号。通过探测器 4 个方向强度求取的偏振度表示为

$$D_{\text{DOLP}} = \frac{\sqrt{[I(0^\circ) - I(90^\circ)]^2 + [I(45^\circ) - I(135^\circ)]^2}}{I(0^\circ) + I(90^\circ)}. \quad (8)$$

分析(7)和(8)式,直接采用探测的 4 个偏振方向强度计算偏振度会受到漫反射信号 I_d 的影响,导致偏振度降低,从而不能反映材料属性。

本文采用的方法是分离出漫反射信号,利用(8)式计算出偏振度,可求出漫反射信号为

$$I_d = [I(0^\circ) + I(90^\circ)] \times (1 - D_{\text{DOLP}}). \quad (9)$$

将 I_d 的值代入(7)式中,可求出镜面反射部分不同偏振方向的强度值 $I(\theta)$,再代入(6)式求出菲涅耳反射率比值。菲涅耳反射率比值利用了偏振度来测算漫反射信号,并且可以反映出目标表面反射的真实特征。

2.3 成像关系与补偿算法

采用菲涅耳反射率比作为判别依据除了需要考虑观测角度的因素还需评估成像几何关系的影响。如图 4 所示的成像关系,观测角 θ 表示了成像几何关系中的入射角和观测角,而菲涅耳反射率是以观测表面本身坐标系 XYZ 作为参照的,成像探测时偏振片的角度是以探测器坐标 xy 为参照的,偏振片的光轴沿 x 方向,要考虑偏振片的光轴与 P 之间的夹角 Φ ,如果只探测偏振片 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 方向的图像,由于方位角 Φ 的不确定性,不确定能探测到反映表面偏振反射信息的最大最小值。本文采用的是偏振角补偿方法,通过探测偏振角得到方位角 Φ ,根据偏振角和 4 个方向的探测强度补偿得到探测表面对应的水平与垂直偏振强度并求取菲涅耳反射率比值,此种方法效率高,适合于快速测量。补偿方法如下:

- 1) 获取 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 4 个偏振方向的强度值;
- 2) 利用(8)式求得偏振度并且计算出漫反射信号的值,对 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 4 个偏振方向的强度值进行修正;
- 3) 利用修正后的 4 幅图像计算偏振角;
- 4) 利用偏振角补偿得到反映探测表面坐标系下的水平偏振与垂直偏振方向的强度值;
- 5) 求出反射率比。

3 实验研究及结果

实验装置如图 5 所示,采用分时旋转偏振片的方法,CCD 相机分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 960 \text{ pixel}$,像元大小为 $4.65 \mu\text{m}$,偏振片为 Thorlab 公司的可见光偏振片,电控旋转偏振片至 4 个角度并控制相机拍摄图像。被测物为金属铝板和橡胶板,被测物可旋转几个角度对不同测量几何关系进行观测。方位角 Φ 任意,在 θ 为 $30^\circ \sim 80^\circ$ 范围内的任意位置分别对两种样板进行成像观测,得到的实验结果如图 6 和 7 所示。修正和未修正的反射率比曲线如图 8 所示。

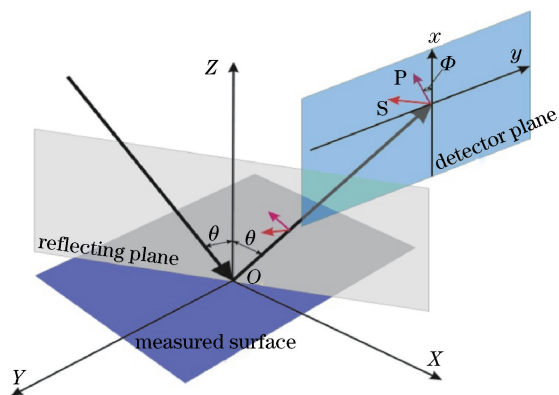


图 4 成像几何关系方位角示意图

Fig. 4 Schematic diagram of azimuth angle about imaging geometric relationship

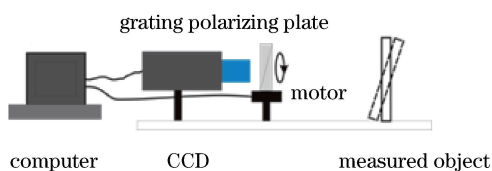


图 5 实验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

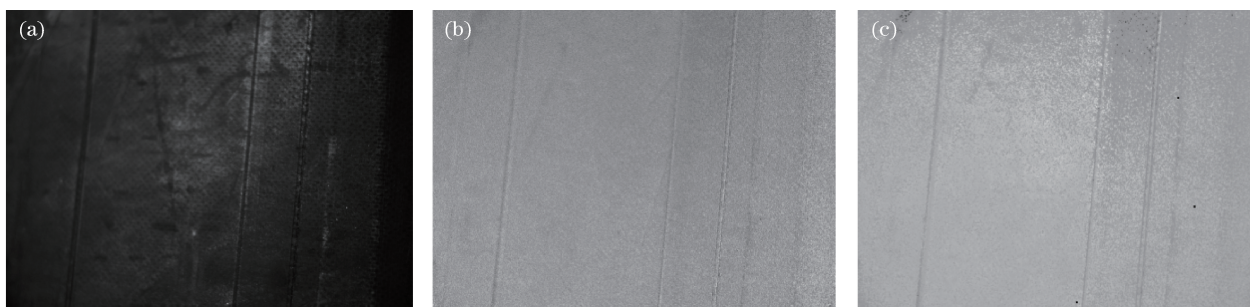


图 6 橡胶板实验结果。(a)强度图;(b)未修正反射率比;(c)修正后的反射率比

Fig. 6 Experimental results of rubber plate. (a) Intensity image; (b) uncorrected reflectivity ratio; (c) corrected reflectivity ratio



图 7 金属铝板实验结果。(a)强度图;(b)未修正反射率比;(c)修正后的反射率比

Fig. 7 Experimental results of metal plate. (a) Intensity image; (b) uncorrected reflectivity ratio; (c) corrected reflectivity ratio

通过对比修正和未修正的反射率比曲线可以发现,未修正的成像结果无法准确区分金属和橡胶两种材料,修正后的曲线符合仿真分析结果,金属材质的反射率比均小于 2,而橡胶材质的反射率均大于 2。

同时对两种材质进行成像,成像图像与修正结果如图 9 所示,左为橡胶板,右为金属板,通过修正反射率比图像得到的橡胶板灰度值远高于金属板,符合预期。在不同观测方位角和俯仰角下随机成像,得到 3 组成

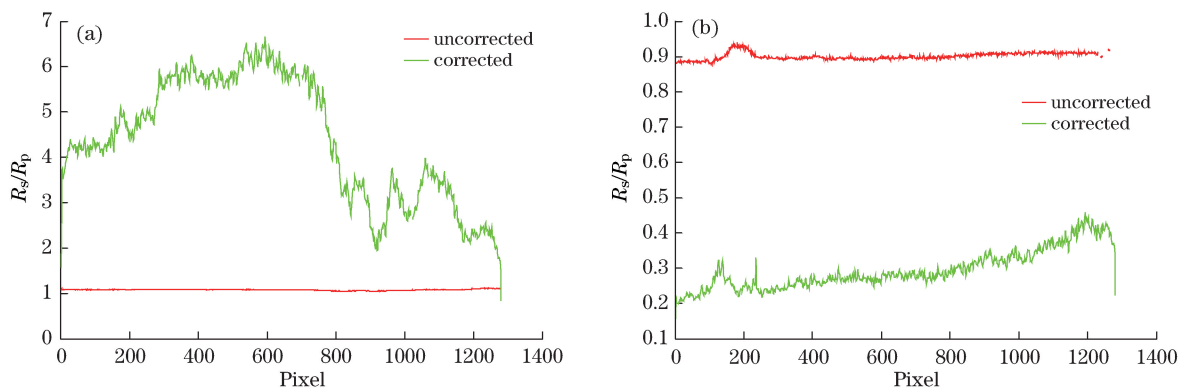


图 8 (a)橡胶板和(b)金属铝板的反射率比曲线

Fig. 8 Reflectivity ratio curves of (a) rubber plate and (b) metal plate

像结果并统计绘制曲线如图 10 所示。反射率以 2 为分界可以明显区分橡胶板和金属板。而偏振度曲线由于观测角和粗糙度的影响存在较大波动,因此以偏振度作为判别依据不具备普适性。

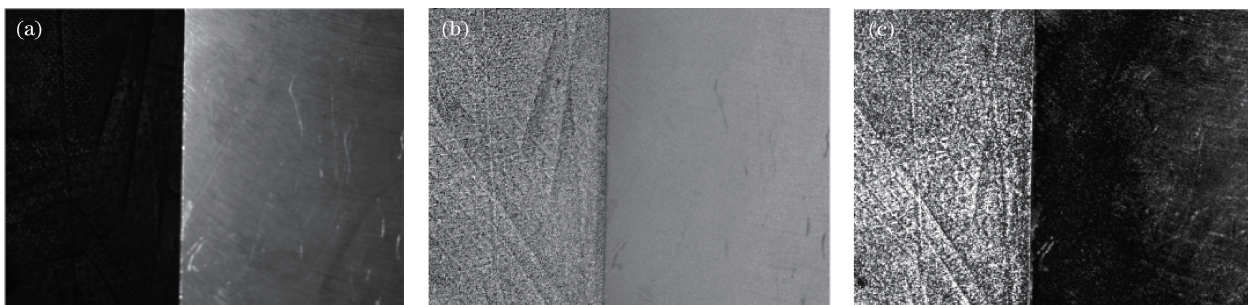


图 9 金属板和橡胶板同时成像结果。(a)强度图像;(b)未修正反射比图;(c)修正后的反射比图

Fig. 9 Simultaneous imaging results of metal plate and rubber plate. (a) Intensity image; (b) uncorrected reflectivity ratio; (c) corrected reflectivity ratio

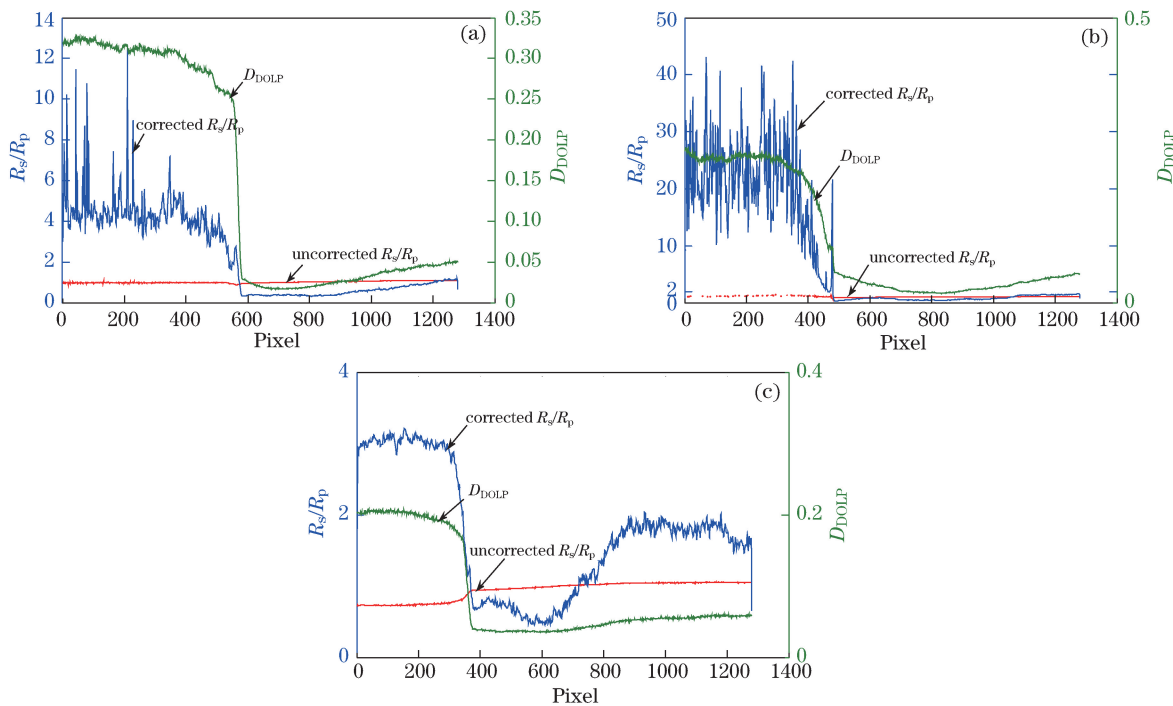


图 10 不同观测角度下成像结果

Fig. 10 Imaging results under different observation angles

4 结 论

通过仿真分析证明了偏振成像中金属和非金属材质可采用菲涅耳反射率比作为区分的判据,通过分析成像几何关系说明了成像方位角对四步偏振成像探测可行性的影响,并提出了采用偏振角修正的反射率比求解方法。通过对橡胶板和金属板进行成像实验,证明了仿真模拟的正确性,对两种材料同时进行成像,利用反射率比有效地进行了材料区分。理论与实验证明,该方法成像过程简单、数据处理量小,比偏振度作为判据具有更强的普适性,适合实际应用。

参 考 文 献

- 1 Chen H, Wolf L B. A polarization phase-based method for material classification and object recognition in computer vision [C]. SPIE, 1996, 2599: 54-63.
- 2 Wang Xia, Xia Runqiu, Jin Weiqi, *et al.* Technology progress of infrared polarization imaging detection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(10): 3175-3182.
王 霞, 夏润秋, 金伟其, 等. 红外偏振成像探测技术进展[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3175-3182.
- 3 Xu Feifei, Zeng Chaoyang, Chen Hang. Research on active laser polarization imaging of vehicle targets under complicated background[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 051103.
徐飞飞, 曾朝阳, 陈 杭. 复杂地物背景下的车辆目标激光主动偏振成像研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 051103.
- 4 Zhang Nan, Wang Fei, Liu Jun, *et al.* Spatial distribution polarization pattern acquisition based on polarization imaging technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 091101.
张 楠, 王 飞, 刘 俊, 等. 基于偏振成像技术的空间大气偏振模式分布获取[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 091101.
- 5 Gurton K P, Dahmani R. Effect of surface roughness and complex indices of refraction on polarized thermal emission[J]. Applied Optics, 2015, 44(26): 5361-5367.
- 6 Hu Qiaoyun, Yang Weifeng, Hu Yadong, *et al.* Principle and simulation of a spatially modulated full stokes parameters polarization imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0211044.
胡巧云, 杨伟锋, 胡亚东, 等. 空间调制型全 stokes 参量偏振成像系统原理及仿真[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0211044.
- 7 Huang Honglian, Yi Weining, Qiao Yanli, *et al.* Analyzing of optical remote polarization imaging simulation based on intensity images and surface polarized bidirectional reflectance data[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1028001.
黄红莲, 易维宁, 乔延利, 等. 基于强度图像和地物偏振反射率数据的光学遥感偏振成像仿真分析[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1028001.
- 8 Cao Nianwen, Liu Wenqing, Zhang Yujun, *et al.* The circular polarization image and the calculation for the farthest imaging range for underwater objects[J]. Chinese J Lasers, 2000, 27(2): 150-154.
曹念文, 刘文清, 张玉钧, 等. 水下目标圆偏振成像及最远成像距离的计算[J]. 中国激光, 2000, 27(2): 150-154.
- 9 Tang Peijun, Chen Feihu, Tang Zhilie. Visualization of polarization state and its imaging method[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0826002.
唐珮珺, 陈飞虎, 唐志列. 偏振态的可视化及其成像技术的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0826002.
- 10 Tominaga S, Kadoi H, Hirai K, *et al.* Metal-dielectric object classification by combining polarization property and surface spectral reflectance[C]. SPIE, 2013, 8652: 86520E.
- 11 Thilak V, Creusere C D, Voelz D G. Material classification using passive polarimetric imagery [J]. International Conference on Image Processing, 2007, 4: 1817-1820.
- 12 Thilak V, Voelz David, Creusere Charles, *et al.* Estimating the refractive index and reflected zenith angle of a target using multiple polarization measurements[C]. SPIE, 2006, 6240: 624004.