

彩色偏振成像目标-背景对比度增强方法研究

李欣^{**}, 高明^{*}, 冯斌

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 为了提高光电成像系统对目标的探测识别能力,提出了一种彩色偏振成像的目标-背景对比度增强方法。基于菲涅耳原理,分析了目标偏振度随入射光波长的变化规律;采集不同偏振片旋转角度下的彩色偏振图像,从中分离出红、绿、蓝三通道下的 0° 、 45° 、 90° 和 135° 偏振图像,并分别计算各通道的偏振度图像,将红、绿、蓝三通道偏振度图像合成为新的彩色偏振图像,得到比彩色成像原图更加丰富的图像信息。搭建了彩色偏振成像实验系统,将矢量角度距离和对比度计算作为两种客观评价指标,开展了两组目标-背景的对比度观测实验。结果表明,该彩色偏振成像方法将目标与背景的矢量角度平均距离增加了0.13,对比度平均提高了0.11。

关键词 成像系统; 彩色偏振; 目标探测; 偏振度; 对比度

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.121103

Method for Target-Background Contrast Enhancement Based on Color Polarization Imaging

Li Xin^{**}, Gao Ming^{*}, Feng Bin

School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

Abstract In order to improve the detection and recognition ability of an electro-optical imaging system, a novel method for the target-background contrast enhancement based on color polarization imaging is proposed. Based on the Fresnel principle, the variation of target degree of linear polarization with wavelength of incident light is investigated. A collection of color polarization images under different rotation angles is conducted, which is separated into 0° , 45° , 90° and 135° polarization images within the red, green and blue channels. In addition, the polarization images within each channel are calculated, respectively. The red, green and blue polarization images from three channels are synthesized as a novel color polarization image, which contains richer image information than its original color image. A color polarization experimental setup is constructed. Two groups of experiments on target-background contrast enhancement are conducted, which take vector angle distance and contrast calculation as two objective evaluation indexes. The results show that this color polarization method can be used to increase the average distance of vector angle by 0.13 and the contrast calculation by 0.11.

Key words imaging systems; color polarization; target detection; degree of polarization; contrast

OCIS codes 110.2960; 260.5430; 100.2000

1 引言

光电成像系统对目标的成像探测利用了场景光的基本属性,比如强度、光谱、偏振和相关性^[1]。基于强度信息的可见光图像容易受到外界环境因素的影响,对于隐藏在自然背景中的人造目标以及场景中目标与背景呈现对比度低的目标,可见光成像对其探测识别的效果较差。偏振成像技术探测目标表面的偏振信息,利用人造物与自然物的偏振特性差

异,可以在一定程度上提高目标与背景之间的对比度,提高对目标的检测概率^[2-3]。基于黑白相机的灰度偏振成像只获得了场景在可见光波段的偏振特征信息,不能反映不同波长下偏振成像的效果,且在目标与背景的偏振特性差异不明显条件下探测目标较为困难。综合利用场景光的偏振信息和光谱信息提高光电成像系统的探测识别能力,是国内外研究的热点^[4]。该类型的成像系统主要有光谱偏振成像系统和彩色偏振成像系统。其中,多光谱偏振成像系统

收稿日期: 2018-04-23; 修回日期: 2018-05-26; 录用日期: 2018-06-20

* E-mail: minggao1964@163.com; ** E-mail: lxx1267@163.com

需要成像光谱仪组件,因此系统结构复杂、成本高,而彩色偏振成像系统可通过彩色相机和旋转偏振片构建,系统结构简单且成本低。

彩色偏振成像兼具光谱和偏振两种特性,在光谱上将可见光波段划分为红绿蓝三通道,分别计算其偏振信息,从而获得较灰度偏振图像更精细、更丰富的红绿蓝三波段偏振信息。在实际应用中,彩色偏振成像对目标与背景在光谱特性和偏振特性的差异具有敏感性,综合利用偏振信息及其在不同波长下的差异进行探测识别,将显著提高光电成像系统对目标的探测识别能力。因此,彩色偏振成像在抗雾霾、烟尘、复杂背景等恶劣环境下探测隐身、伪装、虚假目标等方面具有潜在的应用价值^[5-6]。

本文在研究偏振成像的基础上,通过分析目标偏振度随入射光波长的变化规律,提出了利用彩色偏振成像提高场景中目标与背景对比度的方法,并搭建彩色偏振成像实验系统对两个场景进行成像实验。

2 彩色偏振成像理论分析与方法

2.1 理论分析与仿真

光的偏振态一般有三角函数表示法、琼斯矩阵法和斯托克斯矢量法等^[7]。当一束光射到光学性质不同的两个媒质的界面上时,会将其分成透射波和反射波,反射波、折射波的波矢方向与入射角的波矢方向在同一平面(即入射面内)^[8]。以入射面为基准,将每个场矢量分解成平行于入射面(用下角标 \parallel 表示)和垂直于入射面(用下角标 \perp 表示)的两个分量。设 α 为入射角、 β 为折射角, $n_1(\lambda)$ 为入射介质的折射率, $n_2(\lambda)$ 为折射介质的折射率, $n(\lambda)$ 为相对折射率,则 $n(\lambda) = n_2(\lambda)/n_1(\lambda)$;入射光电矢量 \mathbf{E}

可分解为垂直分量 E_{\perp} 和平行分量 E_{\parallel} ,反射光电矢量 \mathbf{E}' 可分解为垂直分量 E'_{\perp} 和平行分量 E'_{\parallel} ^[8],表示为

$$\begin{cases} E_{\perp} = n_1(\lambda) \cos \alpha + n_2(\lambda) \cos \beta \\ E_{\parallel} = n_2(\lambda) \cos \alpha + n_1(\lambda) \cos \beta \\ E'_{\perp} = n_1(\lambda) \cos \alpha - n_2(\lambda) \cos \beta \\ E'_{\parallel} = n_2(\lambda) \cos \alpha - n_1(\lambda) \cos \beta \end{cases} \quad (1)$$

由于光强 I 为电矢量振幅的平方,故反射光的反射率 R 及其垂直分量的反射率 R_{\perp} 、平行分量的反射率 R_{\parallel} 分别为

$$\begin{cases} R_{\perp} = \frac{I'_{\perp}}{I_{\perp}} = \frac{n_1(\lambda) \cos \alpha - n_2(\lambda) \cos \beta}{n_1(\lambda) \cos \alpha + n_2(\lambda) \cos \beta} \\ R_{\parallel} = \frac{I'_{\parallel}}{I_{\parallel}} = \frac{n_2(\lambda) \cos \alpha - n_1(\lambda) \sin \beta}{n_2(\lambda) \cos \alpha + n_1(\lambda) \cos \beta} \end{cases} \quad (2)$$

反射光的偏振度定义为

$$P = \frac{|R_{\parallel} - R_{\perp}|}{|R_{\parallel} + R_{\perp}|} \quad (3)$$

将(2)式代入(3)式可得:

$$P = \frac{2 \sin \alpha \tan \alpha \sqrt{n^2(\lambda)^2 - \sin^2 \alpha}}{n^2(\lambda)^2 - \sin^2 \alpha + \sin^2 \alpha \tan^2 \alpha} \quad (4)$$

将材料的折射率与波长的变化关系代入(4)式,即可得到波长与偏振度的关系。

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^[9]。选择水^[10]和二氧化硅(SiO_2)作为仿真材料,其中水定义在室温 25°C 且纯净。波长随折射率变化的关系式代入(4)式即可得出折射率和偏振度随波长的变化曲线。水的偏振特性曲线如图1所示, SiO_2 的偏振特性曲线如图2所示。

由仿真数据可以得出,材料的折射率与偏振度均随着波长的变化而变化,在相同的入射角下,不同

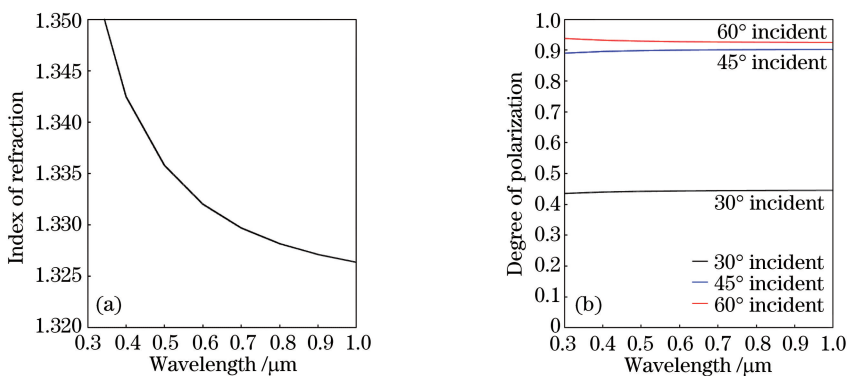


图1 水的折射率和偏振度随波长的变化曲线。(a)折射率;(b)偏振度

Fig. 1 Index of refraction of water and degree of polarization versus wavelength.

(a) Index of refraction; (b) degree of polarization

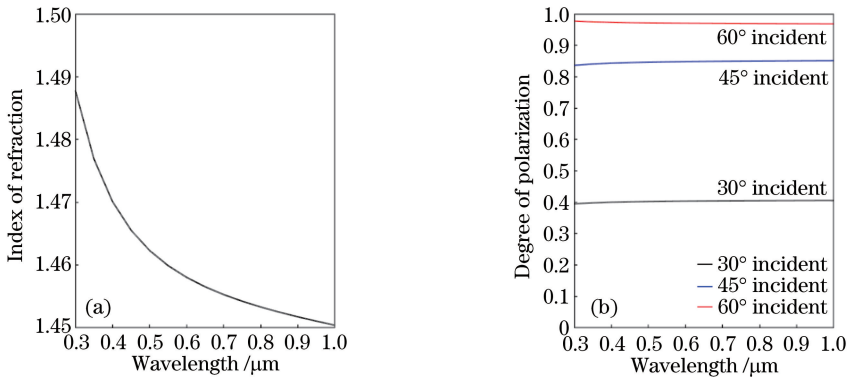


图2 SiO₂的折射率和偏振度随波长的变化曲线。(a)折射率;(b)偏振度

Fig. 2 Index of refraction of SiO₂ and degree of polarization versus wavelength.

(a) Index of refraction; (b) degree of polarization

波长的光入射时所得的偏振度不同。将整个可见光波段分为红、绿、蓝3个颜色段,不同颜色的光入射时所得的偏振度也不同,利用这一特性,本文提出基于彩色偏振成像的目标-背景对比度计算方法。

2.2 彩色偏振成像方法

单色平面光波的各种偏振态可以用斯托克斯参量(S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3)表示,其中, S_0 为光的总强度, S_1 为 x 轴方向直线偏振光分量, S_2 为 45° 方向直线偏振光分量, S_3 为右旋圆偏振光分量^[11-12], I_θ 为该角度下光的强度。

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \\ I_l - I_r \end{bmatrix}. \quad (5)$$

由斯托克斯矢量矩阵可得偏振度为

$$P_{\text{DoP}} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}. \quad (6)$$

自然大气背景及目标物对太阳入射的偏振效应中,圆偏振分量极少,设 $S_3 = 0$,可得线偏振度为

$$P_{\text{DoLP}} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}. \quad (7)$$

图像的线偏振度可由(7)式计算得出。

结合单色平面波偏振态原理和光波的色散特性,可将其延伸到彩色偏振度图像中。对于 0° 、 45° 、 90° 和 135° 等4个角度所得的彩色偏振度图像,将其颜色分量的强度矩阵分离出来,分别计算三原色偏振度图像的偏振度(P_{DoPR} 、 P_{DoPG} 、 P_{DoPB}),得到红绿蓝三通道下偏振度图,线性拉伸后,红色通道的偏振度图像赋给彩色偏振度图像的红色通道,绿色通道的偏振度图像赋给彩色偏振度图像的绿色通道,蓝色通道的偏振度图像赋给彩色偏振度图像的蓝色通

道,将三通道偏振度图合成为彩色偏振图像,可以得到较彩色成像原图更为丰富的图像信息,并且彩色偏振度图像能够更好地区分目标物与背景,提高了目标与背景的对比度。利用角度矢量距离和对比度对其进行客观的定量评价。偏振图像处理过程如图3所示。

在彩色偏振度图像显示时,可以适当提高图像亮度。同时,进行偏振度强度合成图像,即设定偏振度阈值为 a ,对彩色偏振度图中偏振度 $<a$ 的部分以强度分量 $I(i, j)$ 显示,而 $>a$ 的部分以偏振度分量 $P_{\text{DoP}}(i, j)$ 显示,这种显示方法使得偏振度强度图像看上去更加自然,彩色偏振度图像目标更凸显,即

$$F(i, j) = \begin{cases} I(i, j), & P_{\text{DoP}} < a \\ P_{\text{DoP}}(i, j), & P_{\text{DoP}} > a \end{cases}. \quad (8)$$

3 彩色偏振成像外景实验

3.1 实验系统

偏振测量系统的基本结构有分时测量、分振幅、分孔径、分焦平面^[13]等。实验采用的彩色相机为德国Basler的acA1300-60gc彩色相机,每秒60帧图像,130万像素的分辨率。镜头型号是AZURE公司的M2518-MPW2,焦距为25 mm。高精密切控旋转台为THORLABS公司的PRM1/MZ8电动旋转台,旋转速度 $25^\circ/\text{s}$,精度为1 as。偏振片为Edmund公司、型号#85-919、直径25.4 mm的线偏振片。

彩色偏振片在电动旋转台的带动下对 0° 、 45° 、 90° 和 135° 等4个角度分别进行偏振图像采集。采集到彩色偏振图像后,利用斯托克斯矢量法来表征光波的偏振状态。

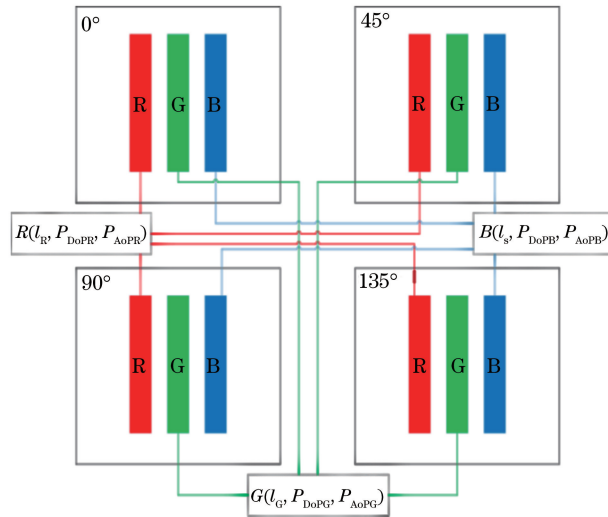


图3 偏振图像处理过程示意图

Fig. 3 Flow chart of polarization image processing



图4 实验装置

Fig. 4 Experimental setup

3.2 实验定量评价方法

采用 RGB 颜色空间的矢量—角度距离公式^[14]定量评价图像, RGB 颜色空间中两个颜色, 坐标分别为 $x_1 = (r_1, g_1, b_1)$ 和 $x_2 = (r_2, g_2, b_2)$, θ 为两个待比较的颜色在 RGB 空间的归一化的矢量角度

$$\theta = \frac{2}{\pi} \arccos \left[\frac{r_1 \cdot r_2 + g_1 \cdot g_2 + b_1 \cdot b_2}{\sqrt{(r_1^2 + g_1^2 + b_1^2) \cdot (r_2^2 + g_2^2 + b_2^2)}} \right]. \quad (9)$$

由(9)式可以得出, 在彩色偏振度图像中, 矢量-

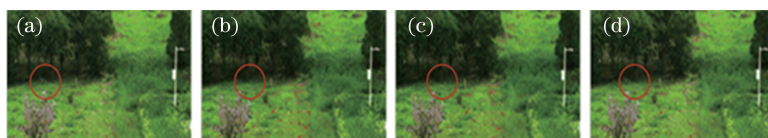
角度距离越大, 说明待比较的两种颜色色差越大, 反映在图中即为目标和背景之间区别较为明显; 角度越小, 说明待比较的两种颜色的色差越小, 反映在图中即为目标和背景之间区别较为模糊。目标与背景是相对而言的, 目标为所需探测的对象, 背景是指目标之外的周围物体。在彩色原图中, \mathbf{X}_t 、 \mathbf{X}_b 分别表示目标和背景的 RGB 均值; 在彩色偏振图中, \mathbf{X}_t 、 \mathbf{X}_b 分别表示目标和背景的彩色偏振度的平均向量。相对对比度定义为

$$C = \frac{\|\mathbf{X}_t - \mathbf{X}_b\|}{\|\mathbf{X}_t + \mathbf{X}_b\|}. \quad (10)$$

目标和背景彩色偏振度的坐标取值均与矢量—角度评价方法的取值范围一致。

3.3 实验

实验一: 目标物体为 60 cm × 50 cm 的石板。实验采集 I_0 、 I_{45} 、 I_{90} 和 I_{135} 偏振参数图像, 图 5 为 0° 、 45° 、 90° 和 135° 的偏振图像, 图 6 为提取的 RGB 各通道的偏振度图像, 图 7 为合成的彩色偏振图像 (在显示彩色偏振图像时亮度增强了 5 倍), 以及合成图像中阈值为 0.2 的偏振图像。设定偏振度阈值为 0.2, 对彩色偏振图像中偏振度 < 0.2 的部分以偏振度强度分量在图像中显示, > 0.2 的部分以偏振度图像显示。

图5 实验一采集的偏振参数图像。(a) I_0 ; (b) I_{45} ; (c) I_{90} ; (d) I_{135} Fig. 5 Polarization images collected in experimental 1. (a) I_0 ; (b) I_{45} ; (c) I_{90} ; (d) I_{135}

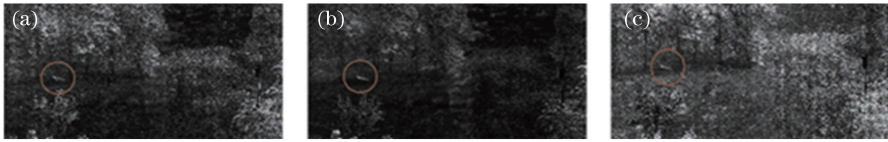


图 6 实验一不同通道偏振度图像。(a) R;(b) G;(c) B

Fig. 6 Polarization images within different channels in experiment 1. (a) R; (b) G; (c) B



图 7 实验一所得图像。(a)彩色原图;(b)合成的彩色偏振图像;(c)阈值为 0.2 的彩色偏振图像

Fig. 7 Images obtained in experiment 1. (a) Original color image; (b) synthesized color polarization image;

(c) color polarization image with threshold of 0.2

实验二:目标物体为 $60\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 的窗户。实验采集 I_0 、 I_{45} 、 I_{90} 和 I_{135} 偏振参数图像,图 8 为 0° 、 45° 、 90° 和 135° 的偏振图像,图 9 为提取的 RGB

各通道的偏振度图像,图 10 为合成的彩色偏振图像以及合成图像中阈值为 0.2 的偏振图像。

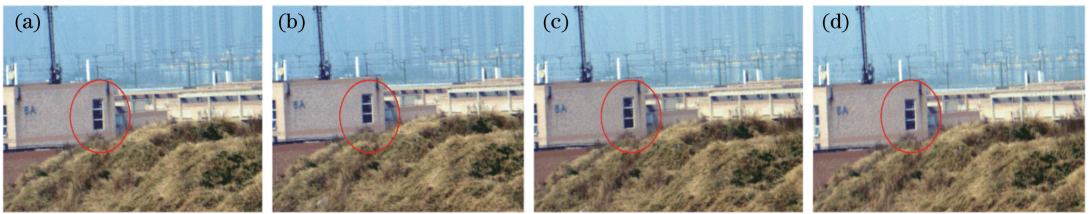


图 8 实验二采集的偏振参数图像。(a) I_0 ;(b) I_{45} ;(c) I_{90} ;(d) I_{135}

Fig. 8 Polarization images collected in experimental 2. (a) I_0 ; (b) I_{45} ; (c) I_{90} ; (d) I_{135}

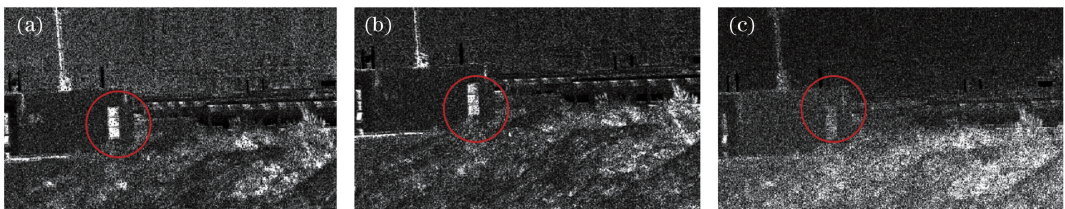


图 9 实验二不同通道偏振度图像。(a) R;(b) G;(c) B

Fig. 9 Polarization images within different channels in experiment 2. (a) R; (b) G; (c) B

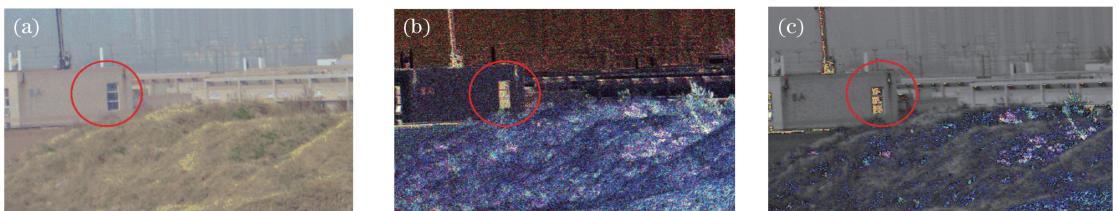


图 10 实验二所得图像。(a)彩色原图;(b)合成的彩色偏振图像;(c)阈值为 0.2 的彩色偏振图像

Fig. 10 Images obtained in experiment 2. (a) Original color image; (b) synthesized color polarization image;

(c) color polarization image with threshold of 0.2

图像数据处理结果如表 1 所示,实验一和实验二的数据分别为表 1 中 1 和 2 的数据,而其中 3、4、5 为其他几组实验的处理数据,可以明显看出,此方

法可以提高图像中目标和背景的对比度以及矢量角度距离。实验一发现:无法明显看见隐藏在草地阴影中的石板,而通过彩色偏振成像后,RGB 3 个通

道的偏振图像中却能够清楚的看见一块发亮的区域。对于合成的彩色偏振图像以及设置阈值后的图像,人眼目视系统能够更清晰地观察到目标和背景,设置阈值后的图像背景比彩色偏振图像更为单一、

清楚。实验二中,虽然可以在偏振图像中看见墙体上的窗户,但偏振成像后,其与背景的对比如明显提高,目标更加凸显。

表 1 各组实验的原图与偏振图像矢量角距离和对比度计算

Table 1 Vector-angle distance and contrast between original and polarization images for each group of experiments

Serial number	Image characteristic	Target [R G B]	Background [R G B]	Vector-angle distance	C
1	Raw color image	[0.2429 0.3581 0.1842]	[0.1836 0.2719 0.1409]	0.0023	0.1369
	Color polarization image	[0.1289 0.1178 0.1397]	[0.0643 0.0620 0.0923]	0.0754	0.2779
2	Raw color image	[0.6081 0.5895 0.5726]	[0.6909 0.6581 0.6144]	0.0517	0.0187
	Color polarization image	[0.1677 0.0985 0.0665]	[0.0424 0.0369 0.0487]	0.4445	0.2448
3	Raw color image	[0.1552 0.1313 0.5708]	[0.1892 0.1312 0.4782]	0.0943	0.0869
	Color polarization image	[0.1072 0.1764 0.0040]	[0.1574 0.1960 0.0049]	0.1102	0.1596
4	Raw color image	[0.5361 0.5341 0.4619]	[0.5762 0.5697 0.5329]	0.0457	0.0200
	Color polarization image	[0.1477 0.1578 0.2312]	[0.1561 0.1912 0.3408]	0.0554	0.1510
5	Raw color image	[0.4857 0.4973 0.5134]	[0.4275 0.3849 0.4139]	0.0992	0.0314
	Color polarization image	[0.1602 0.1452 0.1710]	[0.2571 0.2565 0.3321]	0.2793	0.0472

4 结 论

在研究偏振成像的基础上,分析了目标偏振度随入射光波长的变化规律,提出了利用彩色偏振成像提高场景中目标与背景对比度的方法,并搭建彩色偏振成像实验系统对两个场景进行成像实验,实验中目标与背景的对比如平均提高了 0.11,矢量角度距离平均提高了 0.13,分辨出了彩色成像图像中无法分辨清楚的部分,提高了目标物体的可视化清晰度,并且红绿蓝三通道对物体的偏振特性有明显的区别。

参 考 文 献

- [1] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, *et al.* Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2006, 45 (22): 5453-5469.
- [2] Feng B, Shi Z L, Liu H Z, *et al.* Polarized-pixel performance model for DoFP polarimeter [J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(6): 065703.
- [3] Peng Y, Feng B, Shi Z L, *et al.* Non-uniformity correction in polarization imaging obtained with integrated microgrid polarimeters [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0404004.
- 彭勇, 冯斌, 史泽林, 等. 微偏振片阵列成像的非均匀校正研究 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 0404004.
- [4] Xu F F, Zeng C Y, Chen H. 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.

- [5] Dai J, Gao J, Fan Z G. Polarization-maintaining capacity of backscattered linearly and circularly polarized lights [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0505002.
- 戴俊, 高隽, 范之国. 线偏振光与圆偏振光后向散射偏振保持能力 [J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0505002.
- [6] Huang H L, Yi W N, Qiao Y L, *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.
- [7] Xu C J, Zhao J S, Pan S C, *et al.* Analysis of LWIR polarization images and corresponding false polarization information [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(2): 103-108.
- 徐参军, 赵劲松, 潘顺臣, 等. 长波红外偏振图像及其误偏振信息分析 [J]. *红外技术*, 2012, 34(2): 103-108.
- [8] Born M, Wolf E. Principles of optics [M]. Yang J S,

- Transl. 7th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- 玻恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭荪, 译. 7版. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [9] Liu Z, Guo J. Study on material classification based on the polarized imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1011002.
刘喆, 郭俊. 基于偏振光成像的材质分类研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1011002.
- [10] McNeil G. Metrical fundamentals of underwater lens system [J]. *Optical Engineering*, 1977, 16(2): 162128.
- [11] Quan N C, Zhang C M, Yan T Y, *et al.* Linear stokes imaging spectropolarimeter based on the static polarization interference imaging spectrometer [J]. *Optics Communications*, 2017, 391: 30-36.
- [12] Luan J F, Liu G B, Xiao J, *et al.* Target recognition with polarization degree of color image[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2014, 50(3): 269-271.
栾江峰, 刘广博, 肖军, 等. 基于彩色图像偏振度的目标识别技术研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 50(3): 269-271.
- [13] Wang X, Xia R Q, Jin W Q, *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.
- [14] Yang Z Y, Wang Y, Yang Z D, *et al.* Vector-angular distance color difference formula in RGB color space[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(6): 154-156.
杨振亚, 王勇, 杨振东, 等. RGB颜色空间的矢量—角度距离色差公式[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(6): 154-156.