

doi: 10.3788/gzxb20144301.0111002

三通道偏振成像系统及系统误差校正方法

季尔优, 顾国华, 柏连发, 钱惟贤

(南京理工大学 电光学院 光电技术系, 南京 210094)

摘 要:为了解决现有偏振成像系统难以满足目标检测和跟踪等实时图像处理领域的要求,提出一种实时三通道偏振成像系统,并对该系统存在的视场差异和非一致性误差提出了校正方法.该系统采用三个独立通道采集 0° 、 60° 和 120° 方向上的偏振图像,针对三个独立通道之间存在的视场差异提出了采用尺度不变特征转换配准法进行校正的方法;同时针对三个独立通道之间的灰度响应非一致性现象,根据积分球的退偏特性和探测器的线性响应模型,利用积分球产生完全非偏振光对灰度响应非一致性误差进行了校正.对比实验证明:1)本文提出的三通道偏振成像系统进行校正后的成像效果能够接近单通道偏振成像系统的水平;2)该系统能够在实时采集图像的同时,克服了多通道带来的偏振图像质量下降问题,提高了实用性.

关键词:偏振; 误差校正; 图像配准; 视场差异; 非一致性校正; 退偏; 实时系统

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)01-0111002-6

Three-channel Polarization Imaging Systems and System Error Correction Method

JI Er-you, GU Guo-hua, BAI Lian-fa, QIAN Wei-xian

(Department of Optoelectronic Technology, Electro-optic College, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094, China)

Abstract: The existing polarization imaging systems are hard to meet the requirements of target detection and tracking in real-time image processing field. A three-channel polarization imaging system was put forward to solve above problems, and correction methods were proposed to solve the field differences and non-uniformity errors of the three-channel polarization imaging system. This system used three separate channels to acquire the polarization images from the direction of 0° , 60° and 120° . SIFT algorithm was used to solve the field differences among three independent channels. According to depolarization characteristics of the integrating sphere and linear response model of the detector, integrating sphere was used to produce unpolarized light to correcte the non-uniformity errors. Experimental results show that: 1) the imaging effect of the corrected three-channel polarization imaging system can be close to the level of single-polarization imaging system's; 2) the system can capture images real-time meanwhile overcome the quality-descent problem of the polarization images caused by multi-channel, improving the practical applicability.

Key words: Polarization; Error correction; Image registration; Field difference; Non-uniform correction; Depolarization; Real time systems

OCIS Codes: 110.5405; 100.2000; 110.0110

基金项目:国家自然科学基金(No. 61101199)、江苏省自然科学基金(No. BK201199)和南京理工大学自主科研重大研究计划(No. 20112DJH22)资助

第一作者:季尔优(1984-),男,博士研究生,主要研究方向为偏振成像及目标检测跟踪. Email:jieryou@163.com

导师(通讯作者):顾国华(1966-),男,教授,博士,主要研究方向为光电信息探测与图像处理. Email:gghnjust@jssmail.com.cn

收稿日期:2013-06-08; **录用日期:**2013-08-29

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

偏振成像技术能够根据不同材料物体表面反射特性的差异,突出不同材质之间的区别,有效地区分人造目标和自然景物.随着偏振理论的发展,偏振成像技术已成为目标探测、识别和跟踪的重要手段.

目前偏振成像主要使用单通道成像方式^[1]和分振幅法成像方式^[2].单通道成像系统^[1]使用同一光学系统,通过旋转偏振片的方式交替接收 0° 、 60° 和 120° 方向上的偏振图像,由于三幅图像分时共用一个光学系统,对于静止图像易于进行图像融合等处理,并且不存在通道响应非一致性问题,成像性能较好.但系统对三个偏振方向上图像的采集使用分时采集方式,实时性较差,对于动态图像各个偏振方向上存在差异,因此无法处理运动图像,限制了偏振成像系统在实时图像处理领域的应用.分振幅法成像系统^[3-4]通过光学系统将一束入射光分成三束光束,使用三个探测器同时获取不同偏振方向的图像,该方式实时性好,但光学系统结构复杂,调校困难,很难做到各束光光强一致,同时三个探测器响应的差异,造成偏振图像质量下降.

为了解决现有的偏振成像系统存在的实时性差、光学系统结构复杂和调校困难的问题,提出了一种三通道偏振成像系统.三通道偏振成像系统采用三个通道独立采集 0° 、 60° 和 120° 方向上的偏振图像,该系统结构简单,实时性好,但各个通道之间响应存在严重差异,无法直接根据图像灰度计算出偏振度,在实际应用中需要进行校正.本文从三通道偏振成像系统原理出发,分析了成像系统产生视场差异和灰度响应非一致性误差的原因,并提出了视场差异和灰度响应非一致性误差的校正方法,使得三通道偏振成像系统的成像效果接近单通道偏振成像系统的效果.

1 偏振成像原理

根据麦克斯韦方程可知光是一种电磁波,它具有电场分量 \mathbf{E} 和磁场分量 \mathbf{B} .其中电场分量 \mathbf{E} 在光学中也被称为光矢量.所谓偏振光,就是光在传播过程中,光矢量的方向和大小有规则变化的光.光矢量的方向不变,其大小随相位变化的光是线偏振光,这时在垂直于传播方向的平面上,光矢量端点的轨迹是一直线.圆偏振光在传播过程中,其光矢量的大小不变,方向规则变化,其端点的轨迹是一个圆.椭圆偏振光光矢量的大小和方向在传播过程中均规则变化,光矢量端点沿椭圆轨迹转动.任意偏振光都可以用两个振动方向互相垂直、相位有关联的线偏振光来表示^[5-7].

$$\begin{cases} E_x(z, t) = E_{0x} \cos(kz - \omega t) \\ E_y(z, t) = E_{0y} \cos(kz - \omega t + \epsilon) \end{cases} \quad (1)$$

E_{0x} , E_{0y} 是电场在 x 、 y 方向的振幅; k , ω 分别是空间频率和时间频率 ϵ 是 y 方向电场的偏振向量对于 x 方向的相位延迟; z , t 分别为光线传播方向上的位移和时间.

斯托克斯表示法是目前最常用的偏振度的表示方法,对于 0° 、 60° 和 120° 方向上的偏振光,斯托克斯参量 $[I, Q, U, V]$ 可以表示为

$$\begin{cases} I = \frac{2}{3} [I(0^\circ) + I(60^\circ) + I(120^\circ)] \\ Q = \frac{4}{3} [I(0^\circ) - \frac{1}{2}I(60^\circ) - \frac{1}{2}I(120^\circ)] \\ U = \frac{2}{\sqrt{3}} [I(60^\circ) - I(120^\circ)] \end{cases} \quad (2)$$

式中, $I(0^\circ)$, $I(60^\circ)$ 和 $I(120^\circ)$ 分别为 0° 、 60° 和 120° 偏振方向上的光强,由于自然环境中圆偏振光分量几乎为0,因此可以令 $V=0$;偏振度的定义用斯托克斯参量表示为

$$\text{Dop} = \frac{(Q^2 + U^2 + V^2)^+}{I} \quad (3)$$

即全偏振分量的强度与该光波总强度的比值.全偏振分量的偏振椭圆方位角 θ 和椭率角 ϵ 表示为

$$\theta = \arctan(U/Q)/2 \quad (4)$$

$$\tan(2\epsilon) = V/\sqrt{Q^2 + U^2} \quad (5)$$

因此,只要测出入射辐射的斯托克斯参量,就能由式(3)~(5)求出入射辐射的偏振度、偏振椭圆方位角和偏振椭率.

2 三通道偏振成像系统的组成

三通道偏振成像系统的组成如图1.由图1可以看出偏振成像系统由偏振片、光学系统、电荷耦合元件(Charge-Coupled Device, CCD)、同步系统、图像采集系统和图像处理系统组成.偏振片A、B、C分别为 0° 、 60° 和 120° 方向的偏振片,外界场景通过偏振片后,经光学系统汇聚,成像在CCD的焦平面上;由同步系统控制三个CCD对三个场景同时采集,最后交由图像处理系统进行处理.

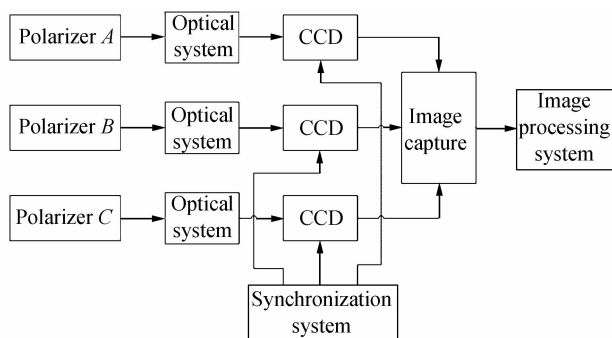


图1 三通道偏振成像系统组成

Fig. 1 Three-channel polarization imaging system

3 三通道偏振成像系统的误差校正

三通道成像系统使用三个通道同时采集不同偏振方向上的偏振图像,由于实际使用中三个通道之间的不一致,会导致系统在进行偏振信息计算时出现误差,因此在使用前需要对三个通道进行标定.通道的非一致性主要表现在两个方面:三个通道的视场差异和通道之间的灰度响应差异.

3.1 视场差异校正

三通道偏振成像系统的视场存在差异,需要对输入的图像进行配准.尺度不变特征转换(Scale-Invariant Feature Transform, SIFT)算法是一种在空间尺度中寻找极值点,并提取出其位置、尺度、旋转不变量等局部特征的算法,是目前公认的最好的基于特征点配准的方法^[8-13].在使用 SIFT 算法对三个通道的图像配准过程中的主要步骤为:

1) 分别提取三个通道同一时刻的图像,用金字塔结构分别计算尺度空间的极值点,同时剔除不稳定点和强边缘点,并计算极值点对应的 128 维特征向量;

2) 以第一个通道的图像为基准,分别用第二、第三通道图像中的特征点和第一通道图像中的特征点进行匹配,得到第一、第二通道图像配对点对和第一、第三通道图像配对点对;

3) 使用渐进的样本一致(Progressive Sample Consensus, PROSAC)算法^[8-9]对配对点进行筛选,剔除错位匹配的点对,并分别计算出第二通道图像相对于第一通道图像和第三通道图像相对于第一通道图像的仿射变换矩阵;

4) 对第二和第三通道的图像分别进行仿射变换,得到与第一通道图像配准后的图像.

通过配准三通道的视场差异得到消除,各方向上的图像能够很好的重叠.

3.2 灰度响应非一致性校正

在计算偏振成像系统获取的 0° 、 60° 和 120° 方向上灰度图像偏振信息时,由于在实际系统中各个通道的光学系统和偏振片的光学透过率不一致,并且 3 个 CCD 对同一亮度的场景响应存在差异,无法直接根据偏振成像系统输出的灰度值计算场景偏振度,因此在计算偏振信息时需要对图像进行校正,使系统对于同一强度的完全非偏振光响应一致.

在成像系统中,输入光强度和输出灰度可以认为存在着近似的线性关系,即

$$Y = GX + B \quad (6)$$

式中, X 为输入光强度; Y 为输出灰度值; G 和 B 分别为成像系统的增益和偏置.对于同一强度的非偏振光而言,在各个偏振方向上的强度是一致的,因此可以根据 0° 、 60° 和 120° 方向三个通道上输出的灰度值 Y_0 、 Y_{60}

和 Y_{120} 将偏置和增益校正成一致

$$Y_0 = G_{60} * Y_{60} + B_{60} = G_{120} * Y_{120} + B_{120} \quad (7)$$

式中, G_{60} 和 B_{60} 为 60° 方向上的校正增益和偏置; G_{120} 和 B_{120} 为 120° 方向上的校正增益和偏置.

为了获取完全非偏振光,采用积分球作为标定偏振成像系统的标准光源.积分球作为理想漫反射光源和匀光器,常常和光源、探测器集成在一起,广泛用于光辐射的测量中.由于积分球内表面的漫反射是均匀的,可以视为理想的朗伯反射面.当部分偏振光射入积分球后,经过积分球内表面的多次漫反射后,可以消除入射光线的偏振性,得到非偏振光^[15].

校正过程如图 2,通过调整积分球和偏振成像系

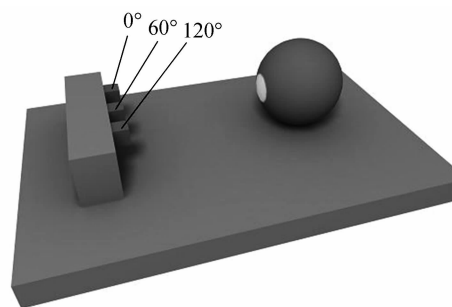


图 2 灰度响应非一致性校正装置

Fig. 2 The device of gray response non-uniformity correction

统的相对位置,使得积分球的开口能够充满 CCD 的整个视场.首先将积分球调整到一个较低的亮度(记作 L_1),记下 L_1 亮度下三个通道上输出的灰度值 $Y_0^{L_1}$ 、 $Y_{60}^{L_1}$ 和 $Y_{120}^{L_1}$,根据式(7)有

$$Y_0^{L_1} = G_{60} Y_{60}^{L_1} + B_{60} = G_{120} Y_{120}^{L_1} + B_{120} \quad (8)$$

接着将积分球调整到另一个较高的亮度(记作 L_2),记下 L_2 亮度下偏振成像系统输出的灰度值 $Y_0^{L_2}$ 、 $Y_{60}^{L_2}$ 和 $Y_{120}^{L_2}$,根据式(7)有

$$Y_0^{L_2} = G_{60} Y_{60}^{L_2} + B_{60} = G_{120} Y_{120}^{L_2} + B_{120} \quad (9)$$

根据式(8)和式(9)可以得到

$$\begin{cases} G_{60} = \frac{Y_0^{L_1} - Y_0^{L_2}}{Y_{60}^{L_1} - Y_{60}^{L_2}} \\ B_{60} = \frac{Y_0^{L_2} Y_{60}^{L_1} - Y_0^{L_1} Y_{60}^{L_2}}{Y_{60}^{L_1} - Y_{60}^{L_2}} \\ G_{120} = \frac{Y_0^{L_1} - Y_0^{L_2}}{Y_{120}^{L_1} - Y_{120}^{L_2}} \\ B_{120} = \frac{Y_0^{L_2} Y_{120}^{L_1} - Y_0^{L_1} Y_{120}^{L_2}}{Y_{120}^{L_1} - Y_{120}^{L_2}} \end{cases} \quad (10)$$

使用 60° 和 120° 通道的增益和偏置对这两个通道分别进行校正后, 0° 、 60° 和 120° 通道具有一致的灰度响应.

4 实验与分析

为验证三通道偏振成像系统的效果,选择三通道偏振成像系统采集的一组偏振图像进行实验.实验数

据由成像系统在同一时刻、相同距离和相同光照条件下采集得到. 如图 3, 从左到右分别为三个通道采集到的图像, 可以看出三个通道之间不仅存在视场差异, 而且还存在灰度响应非一致性的影响.

为解决三通道偏振成像系统的视场差异, 通过 SIFT 配准法^[14]对视场差异校正之后, 得到无视场差异的 0°、60°和 120°的图像, 如图 4. 可以看出图 4 中的视场差异得到了很好的校正.

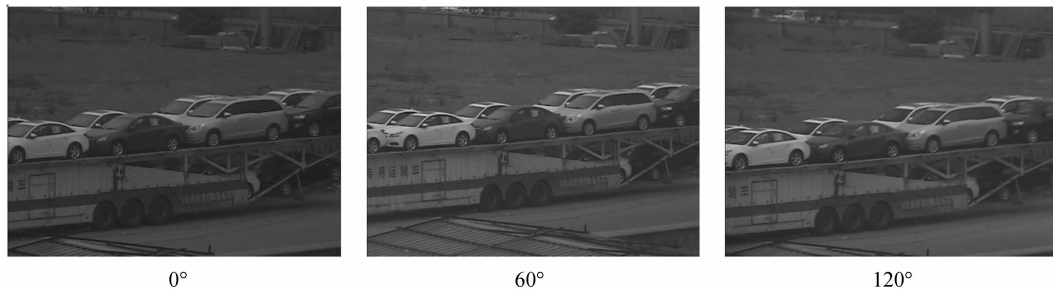


图 3 三通道偏振成像系统未校正前的图像

Fig. 3 Images before correction captured by three-channel polarization imaging system



图 4 经过视场差异校正后的图像

Fig. 4 Images after the field difference correction

经过视场差异校正之后, 三通道偏振成像系统仍然存在严重的灰度响应非一致性差异. 为了直观地显示出三幅图像的差异, 对校正前后三幅图像的灰度直方图分别进行分析比较, 结果如图 5. 从图 5 可以看出,

在校正前 0°和 60°图像与 120°图像在灰度分布上差异存在较大的差异(峰值的横坐标相差较大); 经过校正后, 三个通道上的灰度分布情况趋于相同, 三幅图像的非一致性得到明显改善.

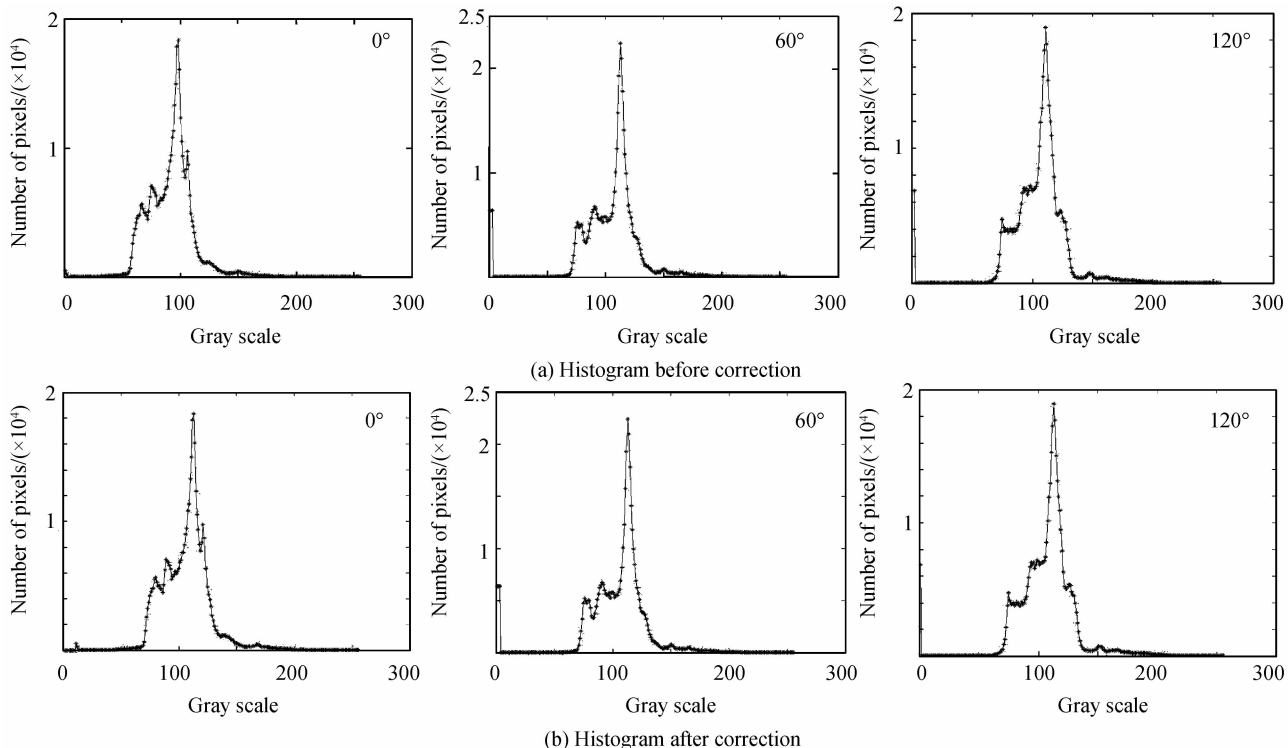
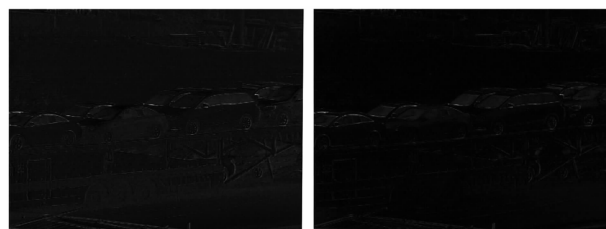


图 5 校正前后图像的直方图

Fig. 5 Polarization histogram before and after the non-uniformity correction

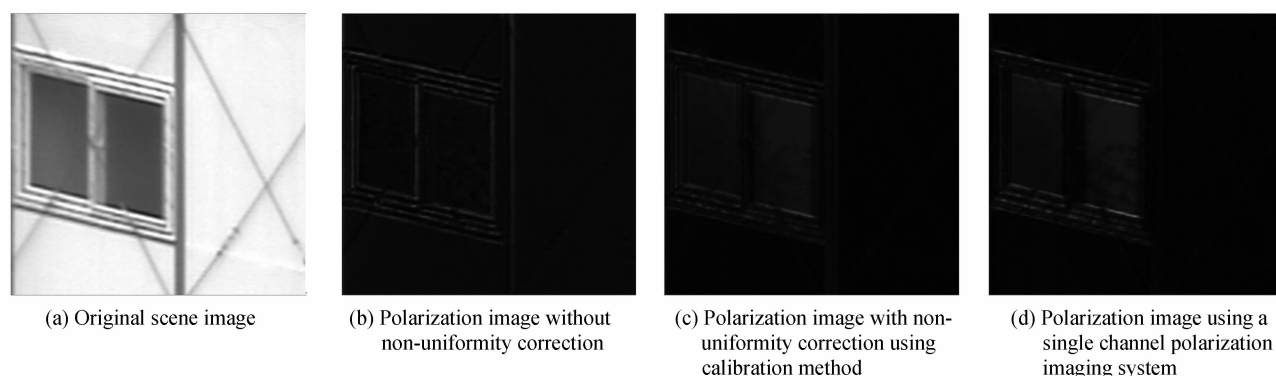
图6为非一致性校正前后的偏振度图像,从整体上看可以看出校正前的图像与校正后相比整体较为模糊,噪音较大,由于各通道非一致性的存在校正前的偏



(a) Polarization image before correction (b) Polarization image after correction

图6 校正前后的偏振度图像

Fig. 6 Polarization image before and after the non-uniformity correction



(a) Original scene image

(b) Polarization image without non-uniformity correction

(c) Polarization image with non-uniformity correction using

(d) Polarization image using a single channel polarization imaging system

图7 实验结果比较

Fig. 7 Comparison of experimental results

分别计算这三幅偏振图像的均方误差(Mean Squared Error, MSE)、峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)和对比度(Contrast),结果如表1.

表1 图像评价结果

Table. 1 The results of image evaluation

Polarization image	MSE	PSNR	Contrast
Fig. 6(b)	5.119 5	94.494 7	0.071 7
Fig. 6(c)	4.077 6	96.776 3	11.152 8
Fig. 6(d)	4.049 3	96.839 9	13.030 4

从表1可以看出经过校正后的偏振度图像的均方误差小于未校正的偏振度图像,且峰值信噪比高于校正前的图像,这说明校正后图像质量得到提高,噪音得到抑制.校正后两种不同材质区域的对比度与校正前相比明显增强,更能突出不同材质的物体偏振特想的差异.与校正前相比,经过本文方法校正后偏振度图像的各项参量更接近于单通道偏振度图像,灰度响应的非一致性差异得到有效的校正.

5 结论

通过对偏振成像机理的分析,提出了一种三通道偏振成像系统以及三通道偏振成像系统误差的校正方法,对三通道偏振成像系统的场景差异和灰度响应非

一致性差异进行了校正.通过对比实验定性和定量的分析了校正之后的图像效果.实验结果表明,本文提出的实时三通道偏振成像系统能够克服视场差异和响应度非一致性的影响,突出不同材质物体的偏振差异,成像效果接近单通道偏振成像系统,同时解决了单通道偏振成像系统无法实时采集视频图像的问题,系统实用性得到极大提高.

为了能对校正的效果进行定量的评价,选取一个具有两种不同材质的背景进行验证.图7(a)为墙面上的一扇窗户,由于材质不同窗户上的玻璃和墙体具有不同的偏振性;图7(b)为三通道偏振成像系统未进行非一致性校正而得到的偏振度图像;图7(c)为使用本文方法经过非一致性校正后得到的偏振度图像;图7(d)为使用单通道偏振成像系统,通过旋转偏振片的方法分别得到 0° 、 60° 和 120° 方向图像的方法得到的偏振度图像.

一致性差异进行了校正.通过对比实验定性和定量的分析了校正之后的图像效果.实验结果表明,本文提出的实时三通道偏振成像系统能够克服视场差异和响应度非一致性的影响,突出不同材质物体的偏振差异,成像效果接近单通道偏振成像系统,同时解决了单通道偏振成像系统无法实时采集视频图像的问题,系统实用性得到极大提高.

参考文献

- [1] CHENG Min-xi, HE Zhen-jiang, HUANG Zuo-hua. Measurement and application of stokes parameters of polarized light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35** (Supplement): 109-115.
程敏熙,何振江,黄佐华.偏振光斯托克斯参量的测量和应用[J].*红外与激光工程*, 2006, 35(Supplement): 109-115.
- [2] XU Xiao-shan. Design and experimental study of the polarized Stokes parameters with sub-amplitude measurement system [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2011.
徐晓珊.偏振光斯托克斯参量的分振幅测量系统的设计与实验研究[D].浙江:浙江大学 2011.
- [3] DU Xi-liang, Dai Jing-ming. New grating-based division-of-amplitude photopolarimeter[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(7): 57-62.
杜西亮,戴景民.光栅分振幅光偏振测量系统的研制[J].*光电工程*, 2006, **33**(7): 57-62.
- [4] CHENG Min-xi, HE Zhen-jiang, HUANG Zuo-hua. Polarimeter System of Stokes parametersBased on division-of-amplitude[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(5):

- 93-97.
程敏熙, 何振江, 黄佐华. 分振幅法偏振光斯托克斯参量测量系统[J]. 光电工程, 2008, **35**(5): 93-97.
- [5] ZENG Hai-fang, GU Guo-hua, HE Wei-ji, *et al.* Adaptive fusion algorithm of polarization images in visible light[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 132-135.
曾海芳, 顾国华, 何伟基, 等. 可见光偏振图像的自适应融合算法[J]. 光子学报, 2011, **40**(1):132-135.
- [6] FANG Shuai, ZHOU Ming, CAO Yang, *et al.* Scene segmentation of hazy image using polarization measurements [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(12): 1820-1826.
方帅, 周明, 曹洋, 等. 基于偏振测量的雾天图像场景分割[J]. 光子学报, 2011, **40**(12):1820-1826.
- [7] WALTER G E. Polarization in remote sensing [C]. SPIE, 1988, **1747**: 2-48.
- [8] AMINTOOSI M, FATHY M, MOZAYANI N. A fast image registration approach based on SIFT key-points applied to super-resolution[J]. *Imaging Science Journal*, 2012, **60**(4): 185-201.
- [9] CHEN Ai-hua, YANG Ben-quan, ZHANG Shi-qin. Sequence image mosaic based on approximate scale invariant feature transform descriptors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(8): 903-908.
- [10] HUO Chun-lei, PAN Chun-hong, HUO Lei-gang. Multilevel SIFT matching for large-size VHR image registration [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, **9**(2): 171-175.
- [11] FU Wei-pin, QIN Chuan, LIU Jia, *et al.* Matching and location of image object based on SIFT algorithm. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, **32**(1): 163-169.
傅卫平, 秦川, 刘佳, 等. 基于 SIFT 算法的图像目标匹配与定位[J]. 仪器仪表学报, 2011, **32**(1): 163-169.
- [12] XU Yun-xi, JIANG Yun-liang, CHEN Fang. Scene matching algorithm based on region covariance for INS integrated navigation system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 471-475.
许允喜, 蒋云良, 陈方. 基于区域协方差的惯性组合导航景象匹配算法[J]. 光子学报, 2011, **40**(3):471-475.
- [13] GUO Ming, ZHOU Xiao-dong. A novel registration algorithm for images with small ship target [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(2): 195-199.
郭明, 周晓东. 舰船小目标图像配准算法[J]. 光子学报, 2012, **41**(2):195-199.
- [14] DHRWADKAR N V, SAVAKAR D G, PANCHAL S S, *et al.* Effect of water on neural-network-based soil image recognizer and classifier[C]. SPIE, 2011: 80092A.
- [15] LI Juan, YI Wei-ning, HUANG Hong-lian, *et al.* Accuracy detection for polarization imaging system [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, **5**(3): 215-219.
李娟, 易维宁, 黄红莲, 等. 一种偏振成像探测系统的测量准确度检测[J]. 大气与环境光学学报, 2010, **5**(3): 215-219.