

文章编号 1004-924X(2017)12-3179-08

基于像素级偏振相机的超像素校正

张涛¹, 徐文畅^{1,2*}, 王德江¹, 孙 嵩¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130039;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对像素级偏振相机中偏振片单元由于刻划精度和透过率的差异导致偏振片阵列的非均匀性,提出了一种带有角度约束的最小二乘超像素校正方法。建立了带有角度约束的校正优化算法的数学模型,加入了超像素的标量增益和暗补偿参数。最后,搭建了以微偏振片为核心的积分球标定系统,进行了仿真实验和成像实验。结果表明:与最小二乘法相比,本文算法在有效地校正偏振度和非均匀性的同时也校正了超像素内振幅的非均匀性,重建角度的准确度提高了10%。经过插值处理后,边缘表现更为明显,有效减少了插值过程中所产生的噪声,提升了成像质量。

关键词:像素级偏振相机; 偏振成像; 超像素; 角度约束; 非均匀性校正; 凸优化

中图分类号:O436.3; TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172512.3179

Super-pixel calibration method of pixelated polarization camera

ZHANG Tao¹, XU Wen-chang^{1,2*}, WANG De-jiang¹, SUN He¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130039, China;*
2. *University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*)
* *Corresponding author, E-mail: xuwenchang15@mails,ucas.ac.cn*

Abstract: For the non-uniformity of polarizer array caused by the difference of the lithography accuracy and the transmission of each pixel polarizer in a pixel polarized camera, a least squares based super-pixel calibration method with angle constraint was proposed. A mathematical model of calibration optimization algorithm with angle constraint was established, meanwhile, scalar gain and dark compensation parameters were added in the model. Finally, an integrating sphere calibration system by taking a micro-polarizer as the core was established, simulation experiment and imaging experiment were performed. The experimental results show that the proposed method in this paper corrects effectively the amplitude unevenness of the super-pixels while correcting the degree of polarization and non-uniformity as compared with the least squares method, and the accuracy of the reconstruction perspective has increased by 10%. After interpolation processing, the edge performance is more obvious, and the noise generated during the interpolation process effectively is reduced and the image quality is improved.

收稿日期:2017-09-28;修订日期:2017-10-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61675202)

Key words: pixelated polarization camera; polarization imaging; super-pixel; angle constraint; non-uniformity calibration; convex optimization

1 引言

偏振成像系统中,通常用光的斯托克斯分量来描述偏振信息,以反映出物体的细节特征^[1]。近年来,偏振探测在遥感探测、海天复杂背景成像^[2]、识别伪装、水下目标检测^[3]和医学成像等诸多领域,具有广泛地应用和很大发展潜力^[4]。

从偏振成像系统的时间特点划分,探测系统可以分为分时成像和同时成像两大类^[5],文中采用同时成像中的像素级偏振探测方法^[6],即通过微偏振片的马赛克阵列进行分光,再投射到面阵探测器 CCD 上进行测量。结构简单紧凑,能够良好地适应探测环境的变化,适用于多种复杂环境下的探测成像和瞬时干涉测量^[7]。

像素级偏振成像也存在着以下缺点:存在瞬时视场误差(Instantaneous Field-of-View, IFOV),即一个超像素内不同的偏振片单元在空间维存在像元级对准误差,像元响应存在振幅不均匀性及角度重建的不准确性;存在固定型噪声(Fixed Pattern Noise, FPN),线栅中马赛克阵列的各偏振片单元的刻划精度、透射率^[8]、偏振方向等都存在一定差异。其中,IFOV 误差需要用插值算法来弥补,FPN 噪声可用校正算法来校正。Ratliff 等对于减少 IFOV 误差提出了后期有效的插值算法^[9],但是缺少了对于 FPN 误差的校正;北京理工大学成像重点实验室王霞^[10]等提出了一种超像素最小二乘校正法,有效地减少了 FPN 误差。

本文针对微偏振片马赛克阵列(金属纳米线栅)的特点^[11],根据最小二乘法数学理论,提出了一种带有角度约束的最小二乘校正算法,不仅可以有效地减少 IFOV 误差,还可以减少后期因插值算法产生的噪声。

2 像素级偏振相机的核心器件

像素级偏振相机的核心器件为微偏振片,刻划方式如图 1。微偏振片的马赛克阵列中将每 4 个(2×2)相邻的单像素(single-pixel)组合后看做

一个超像素(super-pixel)^[12],如图 1 所示,每个超像素中分别对应 0°,45°,90°,135°的 4 种偏振轴方向(偏振片透过率最大的方向)。整片微偏振片是由多数量的超像素平铺而成,超像素的 4 个小像素组中对角线上的两个像素点刻划角度相差 90°。入射光经过此微偏振片之后,投射到面阵 CCD 上,CCD 探测器可根据超像素的划分,一次性测量出入射光在 4 个线偏振角度上的强度信息,从而进行偏振信息解算^[13]。由此可见,针对微偏振片马赛克阵列的特点,运用超像素校正不仅可以提升优化过程中的校正效率,还考虑到相邻单像素的响应值,即在减少 FPN 误差校正图像的同时,还将 IFOV 误差考虑在内,为后续的插值算法处理过程减少噪声。因此本文采取超像素校正算法进行研究与探讨。

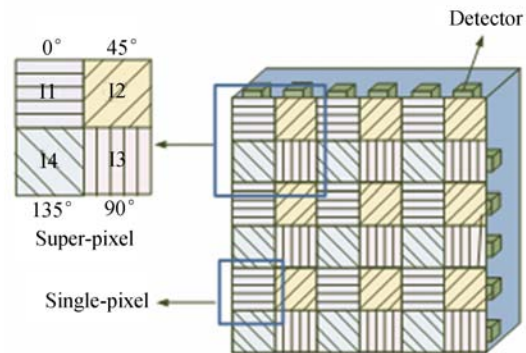


图 1 微偏振片的具体刻划方式

Fig. 1 Detailed characterization of micro-polarizer

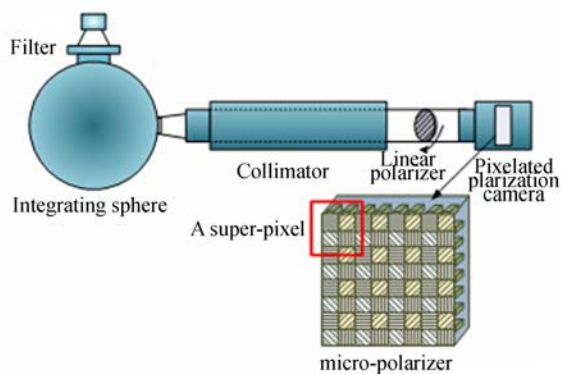


图 2 校正系统的光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optical path of calibration system

3 像素级偏振相机的超像素校正算法

图 2 为校正系统的光路示意图,由此系统得到的校正参数来校正偏振相机输出的偏振图像,以此来输出最终的偏振图像。由于本文算法得到

$$\mathbf{M}_f = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \epsilon + \eta & (\epsilon - \eta) \cos 2\alpha & (\epsilon - \eta) \sin 2\alpha & 0 \\ (\epsilon - \eta) \cos 2\alpha & (\epsilon + \eta) \cos^2 2\alpha + 2\sqrt{\epsilon\eta} \sin^2 2\alpha & (\epsilon + \eta - 2\sqrt{\epsilon\eta}) \sin 2\alpha \cos 2\alpha & 0 \\ (\epsilon - \eta) \sin 2\alpha & (\epsilon + \eta - 2\sqrt{\epsilon\eta}) \sin 2\alpha \cos 2\alpha & (\epsilon + \eta) \sin^2 2\alpha + 2\sqrt{\epsilon\eta} \cos^2 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\sqrt{\epsilon\eta} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中: M_f 为穆勒矩阵, ϵ 为偏振片透光轴的透过率, η 为阻光轴的透过率,偏振片消光比表示为:

$$\xi = \epsilon / \eta, \quad (3)$$

消光比是衡量偏振器件的质量的重要参数,消光比越大,该偏振器件质量越高。

实验中所选用的线偏振片透过率大于 80%,消光比大于 1 000,可近似看做理想线偏振片,所以线偏振片的穆勒矩阵可以忽略上述 ϵ 和 η 两项,简化为下式:

$$\mathbf{M}_f = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ \cos 2\alpha & \cos^2 2\alpha & \sin 2\alpha \cos 2\alpha & 0 \\ \sin 2\alpha & \sin 2\alpha \cos 2\alpha & \sin^2 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

入射到偏振相机光的斯托克斯分量为:

$$\mathbf{S}_m = \mathbf{M}_f \mathbf{S}_{\text{origin}} = \frac{1}{2} (\mathbf{S}_0 \quad \mathbf{S}_0 \cos 2\alpha \quad \mathbf{S}_0 \sin 2\alpha \quad 0). \quad (5)$$

3.1 最小二乘法 (Least Squares-LS)

入射光经过微偏振片,再由探测器探测到一个超像素的光强 $\mathbf{I}_p = (\mathbf{I}_1 \quad \mathbf{I}_2 \quad \mathbf{I}_3 \quad \mathbf{I}_4)$,微偏振片也有相应的传输矩阵即系统矩阵 \mathbf{A}_f 所以把探测器探测到的光强和入射光的斯托克斯参量 \mathbf{S}_m 写成矩阵形式: $\mathbf{I}_p = \mathbf{A}_f \mathbf{S}_m$ 。

根据矩阵最小二乘法原理^[16],设矩阵方程 $l = \mathbf{B}\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{v}$,其中使噪声 \mathbf{v} 最小时的 $\hat{\mathbf{X}}$ 取值应为 $(\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T l$ 。对应上述方法,此处的仪器矩阵 \mathbf{A}_f 可看做是原方程里的未知数 $\hat{\mathbf{X}}$, \mathbf{I}_p 对应于矩阵方程中的 l ,则根据矩阵最小二乘法理论可得:

$$\mathbf{A}_f = \mathbf{I}_p \mathbf{S}_m^T (\mathbf{S}_m \mathbf{S}_m^T)^{-1}. \quad (6)$$

的均是一个超像素的校正系数^[14],因此以下论述均以一个超像素为例。

积分球输出无偏光的斯托克斯分量为:

$$\mathbf{S}_{\text{origin}} = (\mathbf{S}_0 \quad 0 \quad 0 \quad 0), \quad (1)$$

其中 \mathbf{S}_0 表示积分球输出的光强高精度旋转线偏振片的穆勒矩阵^[15]:

3.2 约束性最小二乘法 (Least Squares with Constraints-CLS)

穆勒矩阵(4)中,只有第一行表示光强值,文中只取式(4)的第一行进行分析,一个超像素的 4 个小像素光强值穆勒矩阵为^[17]:

$$\mathbf{A}_{\text{ideal}} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

则理想的和实际的探测器光强响应矩阵可表示为式(8)和式(9):

$$\mathbf{I}_{\text{ideal}} = \mathbf{A}_{\text{ideal}} \mathbf{S}_m, \quad (8)$$

$$\mathbf{I}_p = \mathbf{A}_f \mathbf{S}_m + \mathbf{d}, \quad (9)$$

其中 d 为像素的暗补偿,而校正算法的目的就是将实际光强响应值拟合于理想的光强响应值,使其在不用改变入射光斯托克斯分量的基础上,依然能够产生较为理想的光强响应值。因此建立了一个简单的校正模型:

$$\text{Cal}_p(\mathbf{I}_p) = \mathbf{G}_c (\mathbf{I}_p - \mathbf{d}_c). \quad (10)$$

将探测器光强响应矩阵中加入了超像素增益标量 $\mathbf{G}_c (4 \times 4)$ 和超像素暗补偿 $\mathbf{d}_c (4 \times 1)$,超像素光强响应 $\text{Cal}_p(\mathbf{I}_p) (4 \times 1)$,即对 \mathbf{I}_p 做线性变换得到较为理想的超像素光强响应值 $\text{Cal}_p(\mathbf{I}_p)$,然后采用最小二乘拟合法将其拟合于理想光强响应值 $\mathbf{I}_{\text{ideal}}$,如下式:

$$\min_{\text{Cal}_p} \| \text{Cal}_p(\mathbf{I}_p) - \mathbf{I}_{\text{ideal}} \|^2. \quad (11)$$

将式(8)和(9)代入式(10),可获得模型具体计算公式:

$$\min_{\mathbf{G}_c, \mathbf{d}_c} \| \mathbf{G}_c (\mathbf{A}_f \mathbf{S}_m + \mathbf{d} - \mathbf{d}_c) - \mathbf{A}_{\text{ideal}} \mathbf{S}_m \|^2. \quad (12)$$

上式最小化问题为凸问题^[18],即各个局部问

题最小,调整变量校正增益矩阵和校正暗补偿可使式(12)得到最小。对于上式最小的解:

$$\mathbf{d} = \mathbf{d}_c \quad \mathbf{G}_c = \mathbf{A}_{\text{ideal}} \mathbf{A}^+ \quad (13)$$

此处 \mathbf{A}^+ 为的逆矩阵,Michael Grant 等^[19]提出的 CVX 插件完美的结合了 Matlab 编程与凸优化理论,经式(13)给予出的最小解来约束式(12),从而得到此问题的最优解,经检验可得:

$$\mathbf{C} \mathbf{A} \mathbf{I}_p = \mathbf{G}_c (\mathbf{I}_p - \mathbf{d}_c) = \mathbf{A}_{\text{ideal}} \mathbf{A}^+ (\mathbf{A} \mathbf{S}_{\text{in}} + \mathbf{d} - \mathbf{d}) = \mathbf{A}_{\text{ideal}} \mathbf{S}_{\text{in}} = \mathbf{I}_{\text{ideal}} \quad (14)$$

4 实验结果与分析

基于上文所述的传输矩阵测量模型,利用如图 3 所示的实验光学系统,测量出偏振相机每个超像素的传输矩阵 \mathbf{A} ,拟合于理想光强的超像素标量增益 \mathbf{G}_c 与暗补偿 \mathbf{d}_c 。系统主要由积分球、可精确控制旋转角度精密空心转台、高性能线偏振片,平行光管及不带光学镜头的偏振相机组成^[20]。具体实验器件参数如表 1:

表 1 实验器件参数表

Tab. 1 Experimental device parameters

Experimental device	parameter	Value
Integral ball	Diameter of light	300 mm
	uniformity	more than 99%
Parallel light tube	Aperture caliber	15 mm
	Field of view	less than 67°
Linear polarizer	caliber	70 mm
	Transmittance	more than 0.8
Precision rotary table	extinction ratio	more than 1000
	Accuracy	5 points
camera	type	4D the company polarcam ^[21]

整套系统置于光学平台上如图 3 所示,控制精密旋转台旋转的角度,当旋转台保持稳定时,采集相机的 12 bits 原始图像数据。

4.1 仿真实验

测量过程中,每隔 10° 旋转线偏振片,每个角度采集偏振相机输出的强度图像 100 张,旋转 18 次,采集共计 1 800 张图片,图中横坐标实验组序号 1~18 分别表示 10°~180°,纵轴 DOLP (Degree of Linear Polarization) 为线偏振度。数据处理时,选择中间像素,为排除散粒噪声对均匀性的影响,把实验结果按照图片为单位在同一个角度

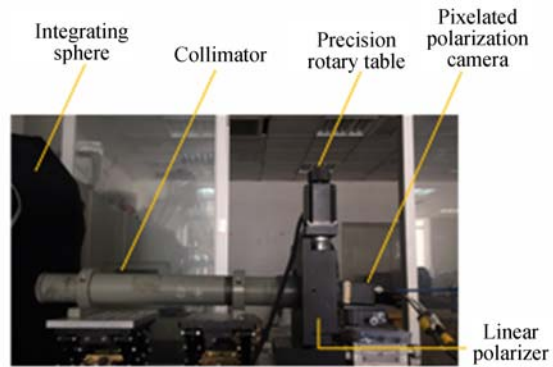


图 3 微偏振片为核心的积分球标定系统

Fig. 3 Micro-polarizer as core of integrating sphere calibration system

上做组内平均计算,每组平均后的图片按照超像素为单位,即每 4 个小像素点为一组,直接计算出图像的偏振度。计算出 18 组图片所有超像素偏振度中位数及四分位数后,可绘制出 18 组实验数据的箱图^[22],其中未经过校正的图片偏振度箱图如图 4 表示。

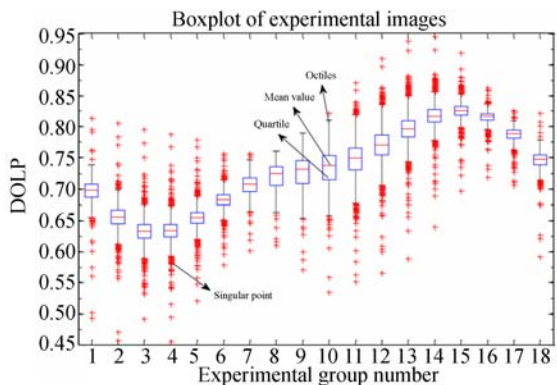


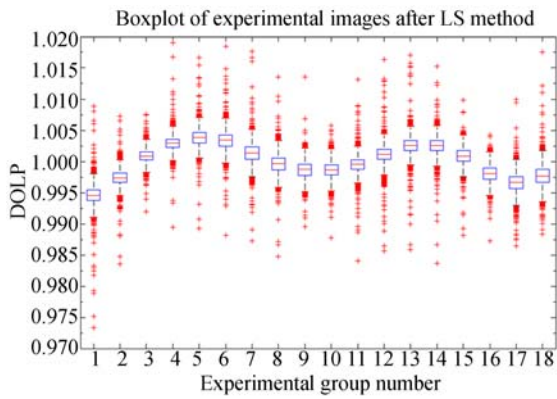
图 4 18 组原始数据的实验数据统计箱图

Fig. 4 Boxplot of eighteen set data before calibration

由上图可以看出,未校正前,完全偏振光照射下,偏振相机的平均偏振度值得仅为 0.7 左右,且当光源的相角从 10°~180° 变化间,图像的偏振度浮动约为 0.2。每组实验的上下四分位数相差普遍超过 0.03,上下界相差 0.1,异常值较多包括异常值在内,整组实验数据中,偏振度的跨度从 0.45~0.95,由此可见,微偏振片存在比较严重的非均匀性问题。

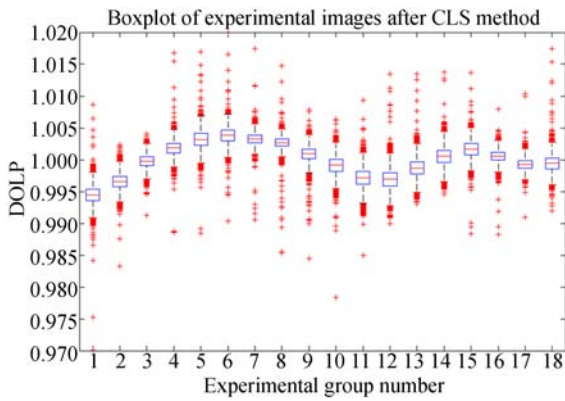
得出 18 组实验数据后,应用文中的 LS 算法和 CLS 算法对相机像素进行偏振度校正,校正后的结果如图 5 所示。

由图可知,在两个算法校正之后,偏振相机的



(a) LS 算法

(a) LS method



(b) CLS 算法

(b) CLS method

图 5 18 组校正后的数据统计箱图

Fig. 5 Boxplot of eighteen set data after calibration method

平均偏振度值均提高到了 1,且当光源的相角从 10° 变化到 180° ,图像的偏振度浮动均减少至 0.01。每组实验的上下四分位数的差值明显减少,低至 0.002,上下界相差 0.01,整组实验数据的偏振度跨度缩小为 0.97~1.02,异常值较未校正之前减少。

方差是衡量图片非均匀性的重要指标,由图 6 可知,校正前实验图片的方差大概在 0.8~2% 之间,两个算法校正后,方差均降至 0.1% 左右,非均匀性下降 8 倍以上。

图 7(a)与图 7(b)展示了两种算法校正之后的相对光辐射强度值,由图 7(a)可知,LS 算法虽然提高了偏振精度,减少了图片的非均匀性,但是并未校正振幅的均匀性和重建角度的准确性,而图 7(b)所示的算法良好的解决了这一问题,相对光辐射强度值响应均匀,均降至 0~2 000,且响应

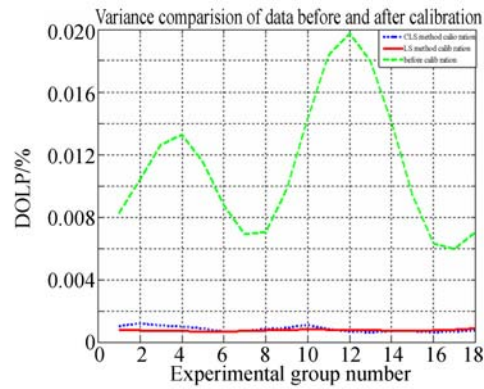
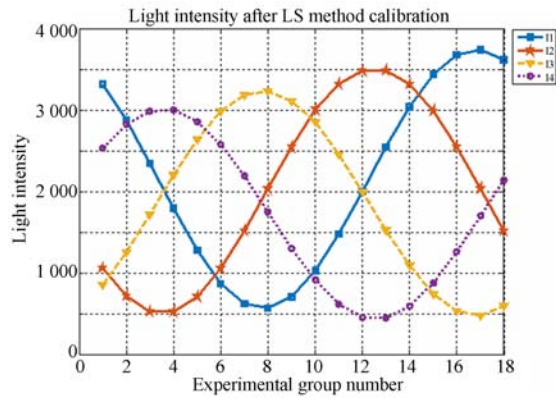


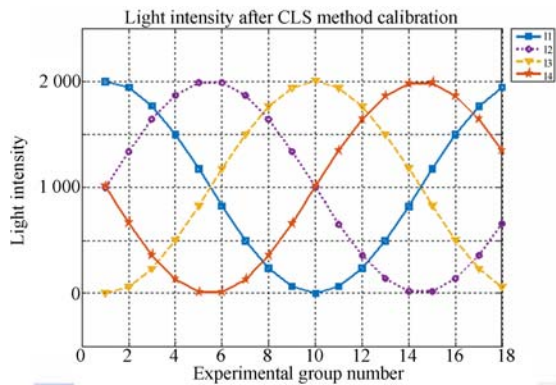
图 6 校正前后实验数据方差对比图

Fig. 6 Variance comparison of data before and after calibration



(a) LS 算法

(a) LS method



(b) CLS 算法

(b) CLS method

图 7 0° 到 180° 校正后的超像素光强值

Fig. 7 Super pixel light intensity from 0° to 180° after calibration

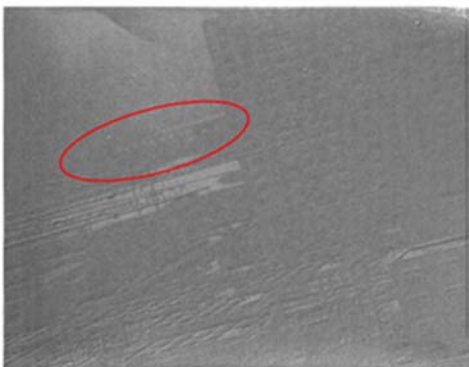
的峰值都恰好在其相应的角度上,重建角度的准确性提高了 10%。

4.2 成像实验

使用偏振相机拍摄外场实验,图 8 为偏振相机拍摄的原图和结算出的偏振度图像,对一个场景只拍摄一张图片。



(a) 强度图像
(a) Intensity image



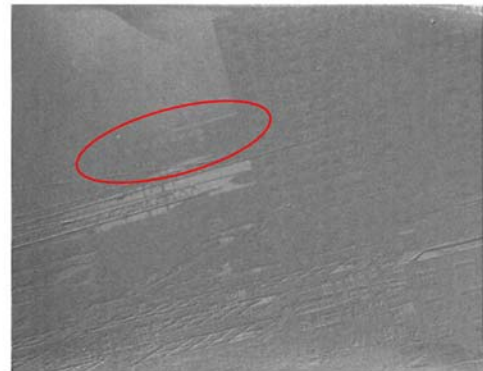
(b) 偏振度图像
(b) Polarization image

图 8 偏振相机拍摄强度图像与偏振度图像

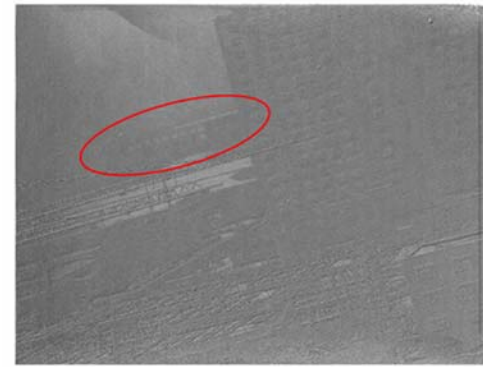
Fig. 8 Images of intensity image and polarization image

观察图 8(彩图见期刊电子版),红圈内的房屋在图 8(a)中表现不明显,但在图 8(b)中有所呈现,采用 LS 和 CLS 校正算法对图像进行像素级校正后,再把图像进行 3 次样条插值^[23],所获得的偏振度图像如图 9 所示。与 LS 算法相比较,用 CLS 算法校正,经过 3 次样条插值之后,远处的房屋可以看的更清晰,边缘表现更为明显,图像的插值噪声减少。

图像的清晰度评价函数值是一个判定画面是否清晰,细节及边缘表现是否清晰的重要指标,一个理想的清晰度评价函数要求具备高灵敏度、单一峰值检测、抗干扰性强和复杂度低的算法,本文采用边缘梯度检测中的 Laplace 图像清晰度评价方法^[24]。



(a) LS 算法校正后的偏振度图像
(a) LS calibration



(b) CLS 算法校正后的偏振度图像
(b) CLS calibration

图 9 LS 算法与 CLS 算法校正后的偏振度图像

Fig. 9 Polarization images after LS calibration and CLS calibration

取 3 张偏振度图片 8(b)、9(a)、9(b)进行清晰度参数比对,对每一张图片的单像素点用 8 邻域差分算子计算 Laplace 代数和表征此张图片的清晰度,如表 2 所示。

表 2 图片全部像素点的 Laplace 代数和

Tab. 2 Laplace algebraic sum of all pixels of the picture

	Before	LS	CLS
Laplace algebraic sum	9 663	12 136	114 368

5 结 论

以微偏振片为核心的像素级偏振相机经超像素 LS 算法与超像素 CLS 算法的校正后,偏振精度均从原图的 0.7 提升至 1,非均匀性下降 8 倍

以上。CLS 算法在有效的校正偏振度和非均匀性的同时也校正了振幅的非均匀性,重建角度的准确性也提高了 10%,光强的峰值都恰好在其相

应的角度上。经过插值处理后,边缘表现更为明显,减少了插值过程中产生的噪声,提升了成像质量。

参考文献:

- [1] 高明,宋冲,巩蕾. 基于偏振双向反射分布函数的粗糙面光散射偏振特性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1213002.
GAO M, SONG CH, GONG L. Analysis of polarization characteristics about rough surface light scattering based on polarized bidirectional reflectance distribution function[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(12): 1213002. (in Chinese)
- [2] 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.
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. (in Chinese)
- [3] 李淑军,姜会林,朱京平,等. 偏振成像探测技术发展现状及关键技术[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 803-809.
LI SH J, JIANG H L, ZHU J P, *et al.*. Development status and key technologies of polarization imaging detection[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 803-809. (in Chinese)
- [4] 薛模根,刘晓诚,刘晓,等. 荒漠背景下红外偏振弱小目标检测方法研究[J]. 光子学报, 2014, 43(10): 1010003.
XUE M G, LIU X C, LIU X, *et al.*. Research of desert infrared polarization dim and small target detection method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(10): 1010003. (in Chinese)
- [5] 宋茂新,孙斌,孙晓兵,等. 航空多角度偏振辐射计的偏振定标[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1153-1158.
SONG M X, SUN B, SUN X B, *et al.*. Polarization calibration of airborne multi-angle polarimetric radiometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1153-1158. (in Chinese)
- [6] DINER D J, CHIPMAN R A, BEAUDRY N A, *et al.*. An integrated multiangle, multispectral, and polarimetric imaging concept for aerosol remote sensing from space[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5659: 88-96.
- [7] BROCK N J, KIMBROUGH B T, MILLER D J E. A pixelated polarizer-based camera for instantaneous interferometric measurements[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8160: 81600W.
- [8] 孟凡涛,褚金奎,韩志涛,等. 面形误差对亚波长金属光栅偏振器性能的影响[J]. 光子学报, 2009, 38(4): 951-955.
MENG F T, CHU J K, HAN ZH T, *et al.*. Effect of profile error on performance of sub-wavelength wire-wired polarizer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(4): 951-955. (in Chinese)
- [9] RATLIFF B M, LACASSE C F, TYO J S. Interpolation strategies for reducing IFOV artifacts in microgrid polarimeter imagery[J]. *Optics Express*, 2009, 17(11): 9112-9125.
- [10] CHEN ZH Y, WANG X, LIANG R G. Calibration method of microgrid polarimeters with image interpolation[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(5): 995-1001.
- [11] 张海洋,张军强,杨斌,等. 多线阵分焦平面型偏振遥感探测系统的标定[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1128003.
ZHANG H Y, ZHANG J Q, YANG B, *et al.*. Calibration for polarization remote sensing system with focal plane divided by multi-linear array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1128003. (in Chinese)
- [12] GRUEV V. Fabrication of a dual-layer aluminum nanowires polarization filter array[J]. *Optics Express*, 2011, 19(24): 24361-24369.
- [13] GRUEV V, PERKINS R, YORK T. CCD polarization imaging sensor with aluminum nanowire optical filters[J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 19087-19094.
- [14] POWELL S B, GRUEV V. Calibration methods for division-of-focal-plane polarimeters[J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21039-21055.
- [15] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 62.
LIAO Y B. *Polarization Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003: 62. (in Chinese)
- [16] 侯俊峰,王东光,邓元勇,等. 斯托克斯椭圆偏仪的非线性最小二乘拟合偏振定标[J]. 光学精密工

- 程, 2013, 21(8): 1915-1922.
- HOU J F, WANG D G, DENG Y Y, *et al.*. Non-linear least-square fitting polarization calibration of Stokes ellipsometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8): 1915-1922. (in Chinese)
- [17] 石顺祥, 王学恩, 刘劲松. 物理光学与应用光学 [M]. 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 23-27.
- SHI SH X, WANG X E, LIU J S. *Physical Optics and Applied Optics* [M]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2008: 23-27. (in Chinese)
- [18] BOYD S, VANDENBERGHE L. *Convex Optimization* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 285.
- [19] GRANT M, BOYD S. CVX users' guide for cvx version 1.2 [EB/OL]. https://see.stanford.edu/materials/lsoctee364a/cvx_usrguide.pdf.
- [20] 王东, 颜昌翔, 张军强. 光谱偏振调制器的高精度装调方法 [J]. *中国光学*, 2016, 9(1): 144-154.
- WANG D, YAN CH X, ZHANG J Q. High accuracy alignment of spectral-polarimetric modulator [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 144-154. (in Chinese)
- Chinese)
- [21] 4D, Technology. Polar cam snap shot micropolarizer cameras [EB/OL]. (2016-02-15) [2016-05-10]. <http://www.4dtechnology.com/products/polarcam.php>.
- [22] 孙翥, 徐文畅. 像素刻划偏振相机的高精度像素级偏振非均匀性矫正 [J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1111002.
- SUN H, XU W CH. High quality pixel level Non-uniform Calibration method of pixelated polarization camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1111002. (in Chinese)
- [23] GAO SH K, GRUEV V. Bilinear and bicubic interpolation methods for division of focal plane polarimeters [J]. *Optics Express*, 2011, 19(27): 26161-26173.
- [24] 张仕玲, 孙旭. 基于 Matlab 的图像清晰度评价方法研究 [J]. *通信技术*, 2011, 44(12): 7-9.
- ZHANG SH L, SUN X. Image evaluation based on fast wavelet transform [J]. *Communications Technology*, 2011, 44(12): 7-9. (in Chinese)

作者简介:



张涛(1964—),男,吉林长春人,博士,研究员,1987年、1990年于浙江大学分别获得学士、硕士学位,1993年于长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事探测与成像技术,稳定控制技术方面的研究。E-mail: Zhang@ciomp.ac.cn



徐文畅(1993—),女,吉林长春人,硕士研究生,2011年于哈尔滨工业大学获得学士学位,现为长春光学精密机械与物理研究所读硕士,主要从事偏振成像探测方面的研究。E-mail: xuwenchang15@mails.ucas.ac.cn