

文章编号 1004-924X(2017)增-0325-07

## 紫外-可见双光谱成像系统的紫外图像滤波

陈 涛<sup>1,2</sup>, 李剑平<sup>1</sup>, 邢 胜<sup>3</sup>, 董玉明<sup>1</sup>, 焦国华<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院 深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055;

2. 中国科学院大学 深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055;

3. 北京市供用电建设承发包有限公司, 北京 100062)

**摘要:** 为了降低紫外-可见双光谱成像系统的可见图像与紫外图像配准过程中的图像噪声, 提高图像配准精度, 设计了基于相关运算的紫外图像滤波算法。首先, 分析了紫外图像噪声的来源和特性, 确定噪声的类型。然后, 利用一个连续的掩模与紫外图像进行相关运算, 通过设定合适的阈值来滤除噪声。最后, 通过与几种滤波算法的滤波结果的比较来验证该算法的性能, 并通过检测紫外图像中标定板的角点特征来进一步验证该滤波算法的效果。实验结果表明, 与另外几种滤波方法相比, 通过相关性滤波后的紫外图像的峰值信噪比 (PSNR) 最大, 为 45.31 dB, 通过 matlab 编写滤波程序的运行时间为 0.57 s。利用 Shi-Tomasi 算法能够检测出紫外图像中标定板的全部角点。因此, 该滤波算法有较好的滤波效果, 运算速度较快, 对图像本身的信息损失小, 能够满足高精度图像配准的要求。

**关键词:** 紫外-可见双光谱成像系统; 相关运算; 图像配准; 图像滤波; 角点检测

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172513.0325

## Filtering of UV images of UV-Vis dual-band imaging system

CHEN Tao<sup>1,2</sup>, LI Jian-ping<sup>1</sup>, XING Sheng<sup>3</sup>, DONG Yu-ming<sup>1</sup>, JIAO Guo-hua<sup>1\*</sup>

(1. Shenzhen Institutes of Advanced Technology,

Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China;

2. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, University of Chinese Academy of

Sciences, Shenzhen 518055, China;

3. Power Supply Construction Contracting Company in Beijing, Beijing 100062, China)

\* Corresponding author, E-mail: gh.jiao@siat.ac.cn

**Abstract:** In order to reduce image noise and improve registration accuracy in visible and UV image registration of UV-Vis dual-band imaging system, a UV image filtering algorithm based on correlation operation was designed. Firstly, the type of noise was confirmed by analyzing sources and characteristics of UV image noise. Then, correlation operation was completed between UV image and a continuous mask, and the noise was eliminated through a suitable threshold. Finally, the algorithm was verified by comparing the result of correlation filtering and other filtering methods, and the effect of the correlation filtering algorithm was further verified by detecting the corner feature of calibration board

收稿日期: 2017-06-28; 修订日期: 2017-07-11.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2016YFB1200401); 深圳市科技创新技术攻关项目 (No. JSGG20150602143353104)

in UV image. The experiments prove that the peak signal to noise ratio(PSNR) of filtered UV image is 45.31 dB by correlation filter, and it's running time is 0.57 s measured by matlab. Furthermore, the corner feature of calibration board in UV image was detected throughly by Shi-Tomasi algorithm. Therefore, the correlation filter can eliminate the noise of UV image with high-speed and less pixel loss, which can satisfy the requirement of high accuracy image registration.

**Key words:** UV-Vis dual-band imaging system; correlation operation; image registration; image filtering; corner detection

## 1 引言

自 20 世纪 80 年代末开始,紫外光应用技术迅速发展,并广泛应用于各个领域,其中一个重要的应用便是紫外探测成像技术检测高压电力设备的故障点<sup>[1]</sup>。由于高压电力设备故障点会发生电晕放电现象,电晕放电会发出日盲波段的紫外光<sup>[2]</sup>(波长在 240~280 nm),而太阳产生的这个波段的紫外光几乎无法到达地球表面,因此通过可见-紫外双光谱成像系统探测电晕放电产生的紫外光,可以实现电力设备的全天候检测。目前,除了紫外成像技术,电子设备故障点检测方法还有红外热成像、超声电晕探测等。红外热成像技术利用故障点与周围环境明显的温度差异来确定故障点的位置,容易受到太阳辐射的影响,无法在白天进行。另外,红外辐射容易被大气中的水汽、二氧化碳等吸收,因此无法进行长距离检测<sup>[3]</sup>。超声电晕探测器的声音在空气中大幅衰减,而且灵敏度较低,由此限制了该技术在故障探测领域的应用<sup>[4]</sup>。紫外成像技术则能避免这些问题,是电力系统故障探测的有力手段。目前,国内致力于紫外成像技术研究的研究机构有中科院西安光机所、中科院长春光机所和宁波大学等。

紫外-可见双光谱成像系统通过可见图像与紫外图像进行融合来定位设备的故障点,因此,可见图像与紫外图像的配准精度对放电点的定位精度影响很大。在实际应用过程中,通常采用高灵敏度和低噪声的像增强型电荷耦合器件 ICCD 对电晕进行探测与成像。紫外 ICCD 主要包含了日盲阴极噪声、光电子噪声、MCP 放大器噪声和 CCD 噪声<sup>[5-6]</sup>。这些噪声的存在使得紫外图像的信噪比变差,导致在进行紫外图像与可见图像配准的过程中无法准确获取紫外图像信息,降低了

图像配准精度。为了实现高精度的图像配准,需要对紫外图像进行滤波处理。但由于紫外图像与二值化的黑白光斑图像类似,包含的信息量较少,噪声的去除较为困难。紫外图像滤波方法有独立成分分析(ICA)<sup>[7]</sup>、多帧均值滤波<sup>[8]</sup>和时域递归<sup>[9]</sup>等。上述几种滤波方法都需要至少两张紫外图像进行处理,独立成分分析更是需要大量图片进行训练,在嵌入式系统上运行时会比较缓慢。而利用一张图片进行滤波时,如中值滤波,在目标成像面积较大时滤波效果不理想。因此需要一种简单高效的滤波算法在图像配准过程中对紫外图像进行滤波。图像配准的目的是为了获取紫外图像像空间与可见图像像空间的转换关系,利用铝制标定板进行配准。因此,本文主要针对铝制标定板的紫外图像进行了滤波算法设计。

## 2 紫外图像滤波

### 2.1 紫外图像噪声分析

为了分析紫外图像的噪声特点,利用紫外光源和标定板拍摄一段紫外视频,并截取视频中多帧紫外图像进行分析。紫外光源选择 8 W 的紫外灯,紫外光的波长为 254 nm,标定板为铝制网格板。实验使用的紫外-可见双光谱成像系统如图 1 所示,光学系统的结构为大口径折反射结构<sup>[10]</sup>。

实验过程中,系统的放大倍率调到最低,为 5%(100% 放大倍率为  $10^6$  倍),其中一幅紫外图像如图 2 所示。由于紫外 ICCD 的噪声主要为散粒噪声,通过分析发现:(1)不同帧图像内噪声点的灰度值是随机变化的,但图像的平均灰度值变化不大;(2)噪声点出现的位置和时间是随机的,大致均匀分布于整个图像;(3)噪声点之间基本都是独立的,没有出现连续的噪声点<sup>[11]</sup>。由此可

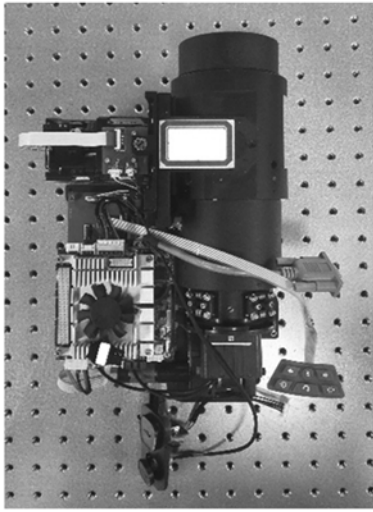


图 1 紫外-可见双光谱成像系统

Fig. 1 Photo of UV-Vis dual-band imaging system

知,紫外图像噪声主要是随机分布的散粒噪声,且少数噪声点的灰度值与目标接近。本文根据随机噪声的随机性以及噪声点的不连续性,利用紫外图像与连续掩模进行相关运算对图像进行滤,并与多种滤波方法进行比较。

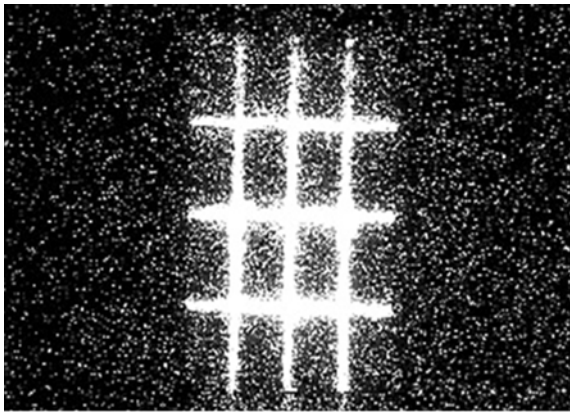


图 2 原始紫外图像

Fig. 2 Original UV image

### 2.2 紫外图像滤波

在紫外图像中,由于噪声不连续,目标图像是连续的,因此目标图像与连续模板具有较大的相关性,噪声与连续模板具有较小的相关性。利用连续模板与紫外图像进行相关运算,保留相关性大的像素点,从而达到滤波的目的。由于紫外图像噪声较大,若利用二维相关运算,则进行相关运算后噪声的相关性也会变大,使得噪声和目标图

像之间的差异变小,难以通过合适的阈值进行消除。因此,本文采用数字图像的一维相关运算。在进行相关运算之前,先对紫外图像进行单位化处理。

在本次实验中,取一个单位向量作为相关运算掩模,每次掩模与紫外图像矩阵的一行进行相关运算,并将相关运算结果与设定阈值进行比较,保留相关性大于阈值的像素点。具体如下:

$$\begin{cases} \omega_1 = [1 \ 1 \dots 1 \ 1] \\ g_i(y) = f(i, y) \\ T_i(y) = \sum_{t=-a}^{t=a} \omega_1(t) g_i(y+t), \\ a = \frac{l-1}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $f$  为紫外图像矩阵;  $g_i$  为紫外图像矩阵第  $i$  行的灰度值,  $i$  的初始值为 1, 最大值为紫外图像的高度;  $T_i$  表示相关运算结果;  $\omega_1$  为单位掩模, 长度为  $l$ , 且为奇数。  $l$  为紫外图像中标定板的像的宽度, 由高斯成像公式可知, 标定板的像的宽度  $l$  为:

$$l = \frac{f * L}{\mu_1 * d}, \quad (2)$$

其中:  $f$  为紫外成像系统的镜头焦距,  $L$  为标定板的实际宽度,  $\mu_1$  为像增强器 (ICCD) 的像元宽度,  $d$  为标定板与镜头的距离。若  $l$  算出为偶数, 则加 1。

设置合适的阈值, 保存相关运算的结果大于阈值的像素, 具体如式 (3) 所示:

$$\begin{cases} \varphi(i, y - \frac{l}{2}) = f(i, y - \frac{l}{2}) \\ \vdots \\ \varphi(i, y + \frac{l}{2}) = f(i, y + \frac{l}{2}) \\ i = i + 1 \end{cases} \quad \begin{cases} T_i(y) \geq Q_1 \\ \\ T_i(y) \leq Q_1 \end{cases}, \quad (3)$$

$$Q_1 = 0.8 \times \max(f(x, y)) \times l$$

式中:  $\varphi$  为初始值为 0 的全黑图像, 用于保存相关性较大的像素点;  $Q_1$  为设置的阈值, 其中 0.8 为一个经验值, 可以根据目标图像的灰度值进行微调。当  $i = n$  时,  $n$  为图像高度,  $\varphi$  内保存的则是紫外图像水平方向的滤波结果。

竖直方向上, 取一个单位向量作为掩模, 并与紫外图像矩阵的一列进行相关运算, 并将相关运算结果与设定阈值进行比较, 保留相关性大于阈

值的像素点,具体所示为:

$$\begin{cases} \omega_2 = [1 \ 1 \ \dots \ 1 \ 1] \\ k_j(x) = f(x, j) \\ R_j(x) = \sum_{t=-b}^{t=b} \omega_2(t) k_j(x+t), \\ b = \frac{h-1}{2} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $k_j$  为紫外图像矩阵第  $j$  行的灰度值,  $j$  的初始值为 1, 最大值为紫外图像的宽度;  $R_j$  表示相关运算结果;  $\omega_2$  为单位掩模, 长度为  $h$ , 且为奇数;  $h$  为紫外图像中标定板的像的高度。由高斯成像公式可知:

$$h = \frac{f * H}{\mu_2 * d}, \quad (5)$$

式中:  $f$  为紫外镜头的焦距,  $H$  为标定板的实际高度,  $\mu_2$  为 ICCD 的像元长度,  $d$  为标定板与镜头之间的距离。若算出  $h$  为偶数, 则加 1。得到相关运算结果后, 再与设置的阈值进行比较, 将大于阈值的像素点保存在水平方向滤波的图像  $\varphi$  中, 如式(6)所示:

$$\begin{cases} \varphi(x - \frac{h-1}{2}, j) = f(x - \frac{h-1}{2}, j) \\ \vdots \\ \varphi(x + \frac{h-1}{2}, j) = f(x + \frac{h-1}{2}, j) \\ j = j+1 \end{cases}, \quad \begin{cases} R_j(y) \geq Q_2 \\ R_j(y) \leq Q_2 \end{cases} \\ Q_2 = 0.8 * \max(f(x, y)) * h \quad (6)$$

式中:  $Q_2$  为设定阈值, 0.8 为经验值, 可根据目标图像的灰度值进行调节。当  $j = m$  时,  $m$  为紫外图像的宽度,  $\varphi$  则是完整的紫外滤波结果。

由此可知, 由于噪声图像是不连续的, 即使灰度值较大, 但通过一定长度的单位掩模进行相关运算后, 得到的相关性则会变得很小。而连续的目标图像在一定区域内都具有较大的灰度值, 在与单位掩模进行相关运算后, 能够得到较大的结果, 通过设置合适的阈值就能在很大程度上滤去噪声。

### 3 实验结果

#### 3.1 紫外图像滤波结果

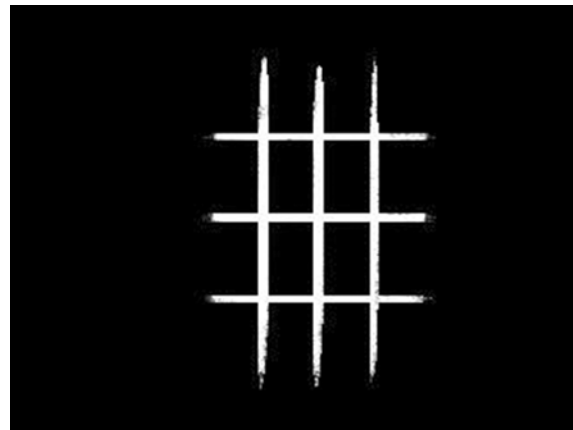
利用 Matlab 实现各个滤波算法, 相关性滤波结果如图 3(a)所示, 多帧均值滤波结果如图 3(b)

所示, 中值滤波结果如图 3(c)所示, 时域递归的滤波结果如图 3(d)所示。几种方法的峰值信噪比和程序运行时间如表 1 所示。

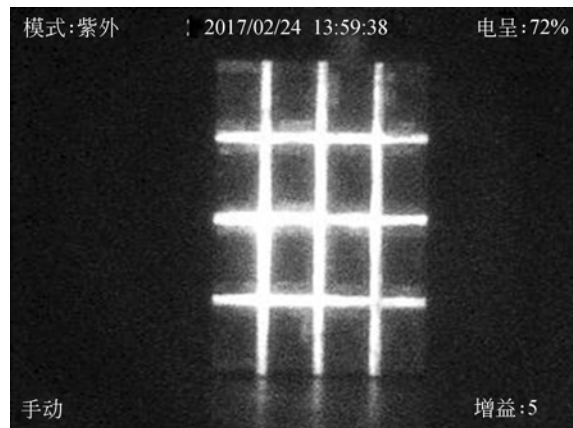
表 1 不同方法的峰值信噪比和程序运行时间对比  
Tab. 1 Comparison of peak signal-to-noise ratio and process time between different methods

滤波方法	峰值信噪比/dB	运行时间/s
相关性滤波	45.31	0.57
多帧均值滤波	27	0.98
中值滤波	29.18	0.50
时域递归滤波	32.57	0.66

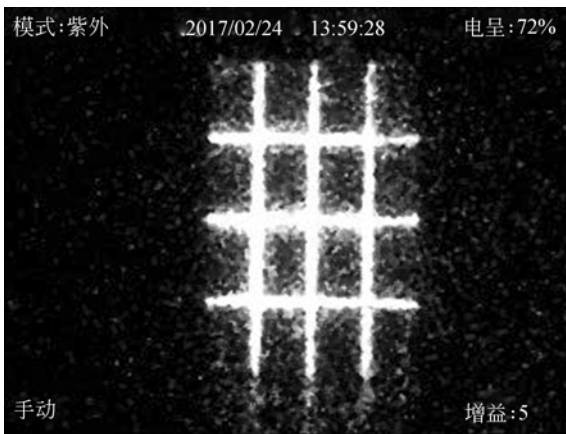
由图 3 可知, 多帧均值滤波、中值滤波以及时域递归滤波对标定板的特征点都有一定程度的模糊。由表 1 可知, 经过相关性滤波之后紫外图像



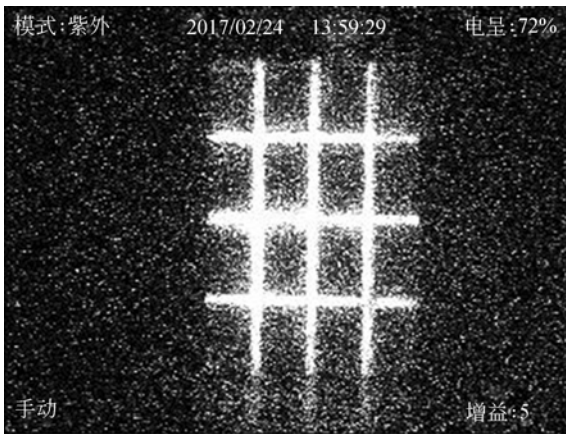
(a)相关性滤波结果  
(a)Result of correlation filtering



(b) $k=35$ 多帧均值滤波结果  
(b)Result of multi frame mean filtering with  $k=35$



(c)中值滤波结果  
(c)Result of median filtering



(d)时域递归滤波结果  
(d)Result of time-recursive filtering

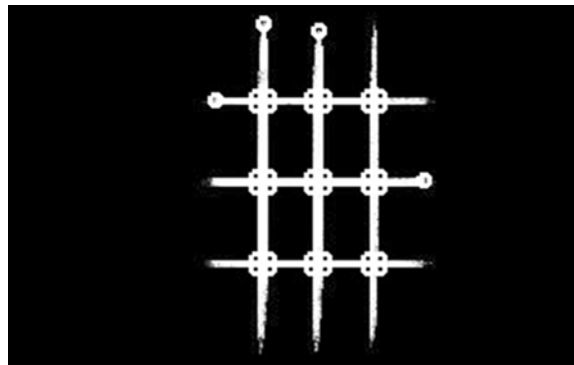
图 3 紫外图像滤波结果  
Fig. 3 Results of UV image filtering

的最大峰值信噪比为 45.31 dB,同时运行时间和基础的中值滤波方法的运行时间非常接近。当将该算法移植到嵌入式系统中时,也能够实现快速运行,同时保证滤波效果。

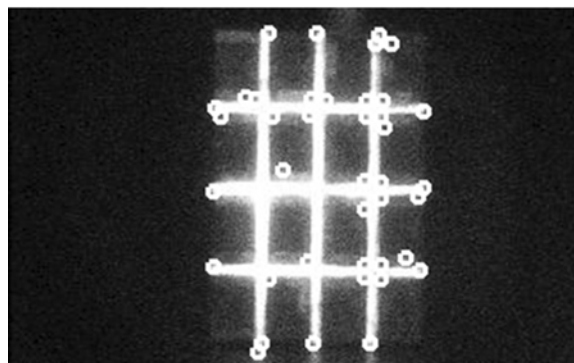
### 3.2 紫外图像的特征检测

因为紫外图像滤波是高精度图像配准的前提,除了检验紫外图像滤波的效果外,还需要检验滤波算法对紫外图像中 useful 信息的保存程度。因此,本实验通过 Shi-Tomasi 算法<sup>[12]</sup>检测紫外图像中标定板的角点特征数量来说明相关性滤波算法的效果。角点检测结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,经过相关性滤波后的紫外图像信息保存得比较完整,标定板中角点特征有 36 个,检测出 36 个。多帧均值滤波对原图像的角点特征有一定模糊,检测出 14 个角点。

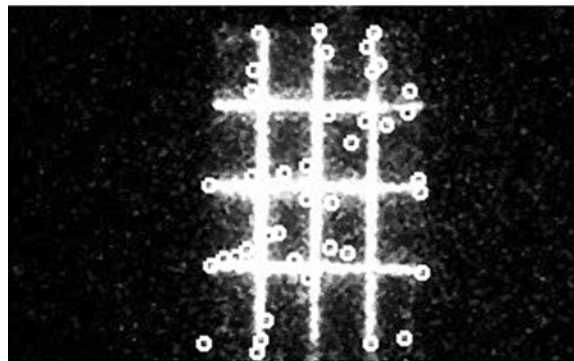
中值滤波对角点特征模糊得较为严重,只检测出 3 个角点。时域递归滤波对噪声滤波的不彻底,导致噪声干扰较大,只检测出 2 个角点。由此可知,相关性滤波能够较好地滤去噪声,同时更好地保存原图像的信息。



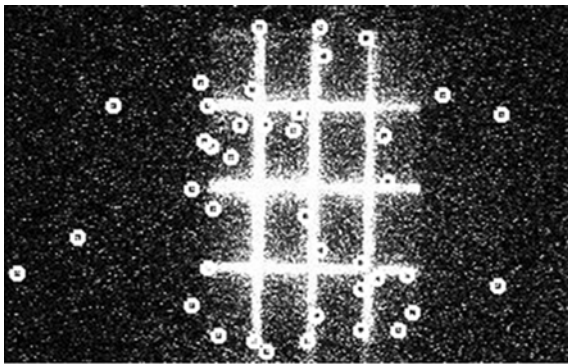
(a)相关性滤波图像角点检测结果  
(a)Corner detection result of filtered image by correlation filter



(b) $k=35$ 多帧均值滤波图像角点检测结果  
(b)Corner detection result of filtered image by multi-frame mean filter with  $k=35$



(c)中值滤波图像角点检测结果  
(c)Corner detection result of filtered image by median filter



(d)时域递归滤波图像角点检测结果  
(d)Corner detection result of filtered image by  
time-recursive filter

图 4 滤波后紫外图像中标定板角点的检测结果

Fig. 4 Corner detection result of calibration board in  
UV image filtering

## 4 结 论

本文根据紫外-可见双光谱成像系统的图像

### 参考文献:

- [1] 王保华,李妥妥,郑国宪. 日盲紫外探测系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2):155-160.  
WANG B H, LI T T, ZHENG G X. Research of solar blind ultraviolet detection system[J]. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2014, 51(2):155-160. (in Chinese)
- [2] 张海峰,庞其昌,陈秀春. 高压电晕放电特征及其检测[J]. 电测与仪表, 2006, 43(2):6-8.  
ZHANG H F, PANG Q CH, CHEN X CH. The characteristics of high-voltage corona and it's detection[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2006, 43(2):6-8. (in Chinese)
- [3] 邵进,胡武炎,贾凤鸣,等. 红外热成像技术在电力设备状态检修中的应用[J]. 高压电气, 2013(1): 126-129.  
SHAO J, HU W Y, JIA F M, et al.. Application of infrared thermal imaging technology to condition-based maintenance of power equipment[J]. *High Voltage Apparatus*, 2013(1): 126-129. (in Chinese)
- [4] LIU S, HUANG D, ZHANG Y, et al.. Research on ultraviolet detection of insulator corona discharge [C]. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, IEEE, 2014:1347-1352.
- [5] 闫丰,于子江,于晓,等. 电晕探测紫外 ICCD 相机图像噪声分析与处理[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4):709-713.  
YAN F, YU Z J, YU X, et al.. Noise analysis and processing of ultraviolet ICCD for corona detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):709-713. (in Chinese)
- [6] 韦亚一,陶兆民. MCP 噪声因子的理论分析[J]. 电子科学学刊, 1993, 15(6):34-38.  
WEI Y Y, TAO ZH M. Theoretical analysis of MCP noise factor [J]. *Journal of Electronics*, 1993, 15(6):34-38. (in Chinese)
- [7] YIN L M, ZHANG Y. Ultraviolet image processing method in corona detection [C]. *International Workshop on Computer Science and Engineering*. IEEE, 2009:327-331.
- [8] 谢勤岚. 结合双边滤波和多帧均值滤波的图像降噪[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(27):154-156.  
XIE Q L. Image denoise combining bilateral and multi frame mean filtering [J]. *Engineering and Applications*, 2009, 45(27):154-156. (in Chinese)
- [9] 张瑞亮,王鹏冲,于瀛,等. 紫外图像处理方法[J].

配准的要求,设计了紫外图像滤波算法,并比较了该算法与多帧均值滤波器的滤波效果,之后利用 Shi-Tomasi 算法检测经过不同滤波算法滤波后的紫外图像中标定板图像的角点。实验结果表明,相关性滤波后紫外图像的峰值信噪比为 45.31 dB,大于其余几种滤波方法的峰值信噪比,算法的运行时间为 0.57 s。在进行图像特征检测时,标定板包含的角点特征有 36 个,利用相关性滤波算法进行滤波的紫外图像中标定板的角点被检测出来的数量为 36 个,全部得以检测。由此可知,相比于另外几种滤波方法,相关性滤波算法能够更好地滤去噪声,提升图像信噪比,也能保留较多的原始图像信息。并且,相关性滤波算法只需要一张紫外图像,运算速度快、实时性较好,能够保证在嵌入式系统中的运行速度,满足之后基于角点特征的高精度图像配准的要求。

光电技术应用,2012,27(4):47-50.

ZHANG R L, WANG P CH, YU Y, *et al.*. Research on ultraviolet image processing method[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2012, 27(4):47-50. (in Chinese)

- [10] JIAO G H, ZHANG Y ZH, DONG Y M, *et al.*. An optical system in solar-blind UV for corona discharge detection[C]. *IEEE International Conference on Real-Time Computing and Robotics*, IEEE, 2016.

- [11] 刘军. 紫外双光谱检测系统及其图像融合研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2007.

LIU J. *Ultraviolet Double Spectrum Detection System and Image Fusion Research*[D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese)

- [12] JIANBO S, TOMASI C. Good features to track [C]. 1994 *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1994: 593-600.

#### 作者简介:



陈 涛(1993—),男,湖南衡阳人,2015年于天津工业大学获得学士学位,主要从事嵌入式系统,图像处理与应用的研究。Email:tao.chen@siat.ac.cn

#### 导师简介:



焦国华(1979—),男,江西吉水人,博士,正高级工程师,2008年于中科院西安光学精密机械研究所获得博士学位,现为中国科学院深圳先进技术研究院光电工程技术中心执行主任,主要研究方向为光电传感技术和光学成像技术。Email: gh.jiao@siat.ac.cn

(本栏目编辑:秦 思)