

## 红外偏振感知与智能处理

赵永强<sup>1</sup>, 李 宁<sup>2</sup>, 张 鹏<sup>3</sup>, 姚嘉昕<sup>2</sup>, 潘 泉<sup>2</sup>

- (1. 西北工业大学 深圳研究院, 广东 深圳 518057;
2. 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072;
3. 西安建筑科技大学 艺术学院, 陕西 西安 710055)

**摘 要:** 红外偏振成像在抗干扰目标检测、复杂环境下人造物识别中具有潜在优势, 同时能够获取目标表面理化特性。分时、分振幅、分孔径红外偏振成像方式由于体积、重量、功耗等的不足限制了其应用, 而小型化、集成化、实时成像设备是红外偏振成像广泛应用的前提, 而对于所获取数据的智能分析是其应用的基础。介绍了所研制的红外偏振智能感知系统, 通过分焦平面式成像技术实时采集目标场景的红外偏振数据, 通过深度学习与分焦平面偏振成像紧密融合, 实现高质量偏振图像恢复与典型场景下运动目标的智能感知。

**关键词:** 分焦平面偏振成像; 热红外偏振探测; 深度学习; 图像处理

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1102001

## Infrared polarization perception and intelligent processing

Zhao Yongqiang<sup>1</sup>, Li Ning<sup>2</sup>, Zhang Peng<sup>3</sup>, Yao Jiabin<sup>2</sup>, Pan Quan<sup>2</sup>

- (1. Research & Development Institute of Northwestern Polytechnical University, Shenzhen 518057, China;
2. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
3. School of Arts, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Infrared polarization imaging has potential advantages in anti-jamming target detection and man-made object recognition in complex environment, and can obtain the physical and chemical characteristics of the target surface. The application of division-of-time, division-of-amplitude and division-of-aperture infrared polarization imaging technique is limited to the insufficiency of volume, weight and power consumption. Miniaturization, integration and real-time imaging equipment are the premise of the widespread application of infrared polarization imaging. Intelligent analysis of the acquired data is the basis of its application. In this paper, a new developed infrared polarization intelligent sensing system was introduced, which collected the infrared polarization data of the target scene in real-time by using the division-of-focal-plane imaging technology. By combining the deep learning with the division-of-focal-plane polarization imaging closely, the high quality polarization image restoration and the intelligent sensing of moving target in typical scenes were realized.

**Key words:** division of focal plane polarization imaging; thermal infrared polarization detection; deep learning; image processing

收稿日期: 2018-06-11; 修订日期: 2018-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(61771391); 深圳市科技创新委员会基础研究(学科布局)项目(JCYJ20170815162956949)

作者简介: 赵永强(1976-), 男, 教授, 博士, 主要从事图像处理、偏振视觉、高光谱遥感、光电探测等方面的研究。Email: zhaoyq@nwpu.edu.cn

## 0 引言

随着红外隐身、伪装等对抗技术的发展以及战场环境的日渐复杂,传统红外成像利用目标与背景的辐射能量差异实现对目标的检测、识别与跟踪的优势也随之削弱。红外偏振成像在抗干扰目标检测、复杂环境下人造物识别中具有潜在优势,同时能够获取目标的表面理化特性。现有的分时、分振幅、分孔径红外偏振成像方式<sup>[1]</sup>存在体积、重量、功耗、实时性等方面的缺陷,限制了红外偏振成像的应用领域。而小型化、集成化、强实时等的偏振成像装置是红外偏振成像技术广泛应用的前提。基于分焦平面的偏振成像器件不仅具有上述特点,且便于集成,有助于红外偏振成像技术应用于军民领域。但是,分焦平面偏振成像器件输出的是偏振马赛克图像,需要进一步计算才能获取相关的偏振参数,计算方法的准确性又会进一步影响所获取偏振参数的准确性以及后续的应用。随着人工智能理论的发展,将智能学习理论应用到计算成像过程中,有效提高分焦平面偏振成像总体性能。文中将详细介绍笔者所研制的红外偏振智能感知系统,包括红外偏振成像的机理、分焦平面偏振成像器件设计原则以及智能解算偏振参数和应用的联合处理原则。

## 1 背景概述

### 1.1 红外偏振特性基本理论

光的偏振是指光矢量的振动相对于光传播方向的不对称性<sup>[2]</sup>。与可见光不同,在红外波段,由菲涅耳定律和基尔霍夫定律可推知,反射和自发辐射都具有偏振特性。二者的偏振度可分别表示为:

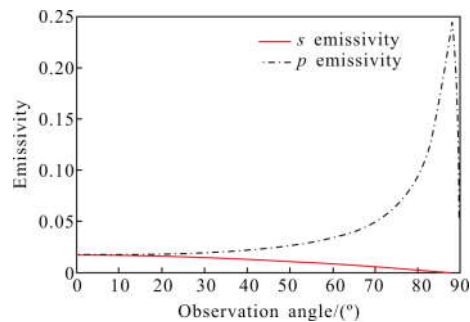
$$DoLP_R = \frac{\rho_s(\varphi, n, k) - \rho_p(\varphi, n, k)}{\rho_s(\varphi, n, k) + \rho_p(\varphi, n, k)} \quad (1)$$

$$DoLP_E = \frac{\varepsilon_p(T, \lambda, \varphi) - \varepsilon_s(T, \lambda, \varphi)}{\varepsilon_p(T, \lambda, \varphi) + \varepsilon_s(T, \lambda, \varphi)} \quad (2)$$

由于  $p$  分量和  $s$  分量对应的反射率  $\rho_p(\varphi, n, k)$ 、 $\rho_s(\varphi, n, k)$  之间存在差异,发射率  $\varepsilon_p(T, \lambda, \varphi)$ 、 $\varepsilon_s(T, \lambda, \varphi)$  之间同样存在差异,所以反射辐射与自发辐射光矢量的平行分量以及垂直分量强度会表现出差异,从而引起光的偏振特性。

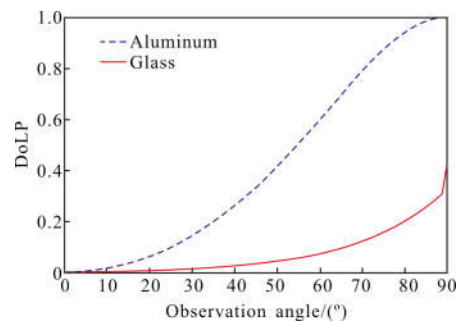
影响目标红外偏振特性的因素主要包括目标材

料、表面粗糙度以及观测角。如图 1 所示,对于光滑的金属铝,其自发辐射光的  $s$  分量与  $p$  分量存在明显的差异,故其自发辐射具有偏振特性;而且不同的观测角其观测偏振度也存在显著的变化,且随着观测角增大,偏振度也在逐渐增大;另外,在红外波段,金属通常具有较高的偏振特性。



(a) 理想光滑铝表面自发辐射的发射率与观测角的关系

(a) Relationship between emissivity and angle of observation of ideal smooth aluminum surface



(b) 不同材料的偏振度与观测角的关系

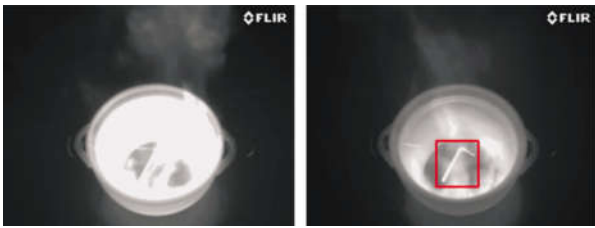
(b) Degree of polarization of different materials varies with observation angle

图 1 影响红外偏振特性的主要因素

Fig.1 Main factors that affect the infrared polarization characteristics

### 1.2 红外偏振成像的优势

红外偏振探测主要基于目标区别性与唯一性偏振特征,红外偏振成像对人造目标的抗干扰检测识别存在潜在优势。如图 2 所示为火焰实验,火盆中放置金属物体,陶瓷盆内燃烧物为酒精,点然后可以发现传统红外图像中金属目标完全淹没在火焰的高温热辐射中,难以辨识;而火焰燃烧与金属目标的红外偏振特性存在差异,且根据偏振成像的强光弱化特性,在红外偏振图像中金属目标清晰可见。



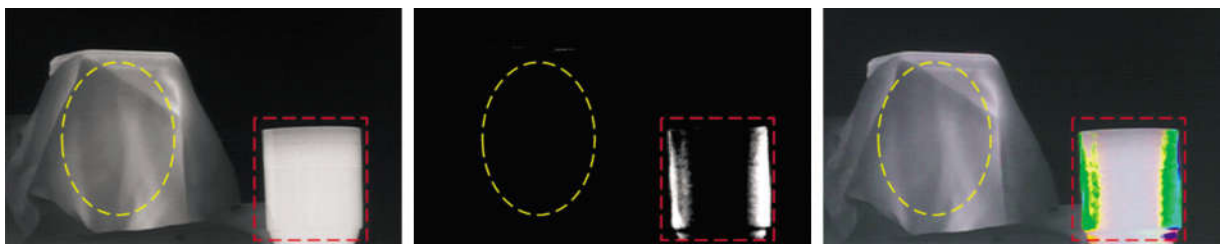
(a) 红外强度图像 (b) 红外偏振图像  
 (a) Infrared intensity image (b) Infrared polarization image

图 2 火焰实验

Fig.2 Flame experiment

又如图 3 所示场景, 两个金属热源目标热辐射能量基本相近, 其中左侧金属物外表蒙有一层薄布, 在传统热红外图像中二者难以有效区分, 但是未被遮挡金属目标具有更强的偏振特性, 所以利用红外偏振图像可以成功识别强偏振特性目标。故有效利用红外偏振信息有望提升传统红外探测抗红外干扰能力。

水面目标易受水面杂波与水面耀光干扰, 在特定观测角度下, 易受红外虚假倒影干扰; 水面耀光与虚假倒影都为部分偏振光, 通过偏振成像可以有

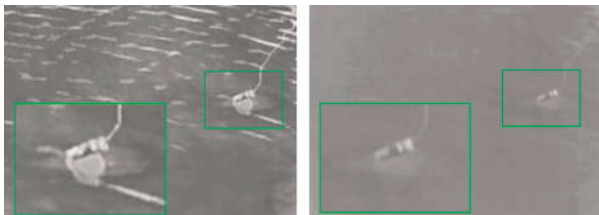


(a) 红外强度图像 (b) 偏振度图像 (c) 红外偏振伪彩色图像  
 (a) Infrared intensity image (b) DoLP image (c) Infrared polarization false-color image

图 3 抗干扰成像

Fig.3 Anti-disturbance imaging

效抑制其干扰, 提高水面目标的探测信杂比, 如图 4 所示。

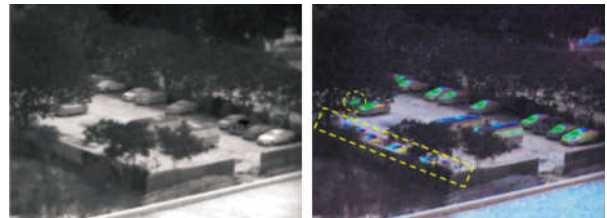


(a) 红外强度图像 (b) 红外偏振图像  
 (a) Infrared intensity image (b) Infrared polarization image

图 4 水面目标

Fig.4 Surface target

红外伪装遮障仅考虑减弱可见光和红外辐射强度, 其表面粗糙度、材料介电常数和外形所决定的偏振信息相对背景仍存在明显差异; 有效利用红外偏振成像可以提高去除红外伪装遮障的能力。如图 5 所示当车辆部分被树木遮挡且车辆温度与地面温度相近时(黄色虚线框内目标), 红外成像难以准确检测车辆位置, 红外偏振成像可以有效抑制背景, 提高信噪比。



(a) 红外强度图像 (b) 红外偏振伪彩色图像  
 (a) Infrared intensity image (b) Infrared polarization false-color image

图 5 伪装目标

Fig.5 Camouflage target

### 1.3 红外偏振成像方式

实现红外偏振探测的前提是红外偏振信息的获取, 目前的红外偏振成像方式主要包括分时、分孔径、分振幅及新兴的分焦平面红外偏振成像方式。如图 6 所示<sup>[1-2]</sup>, 分时偏振成像方式需要机械旋转偏振片采集不同方向偏振图像, 调节周期长, 无法实现实时成像; 而分振幅偏振成像方式通过分光的方法在多个焦平面成像, 无多源误差, 也可实现实时图像获

取,但是通常体积较大,难以满足小型化需求;分孔径偏振成像方式在同一焦平面表面不同区域记录不同方向偏振信息,提高了时间效率,但也引入了更大的误差<sup>[1-2]</sup>。随着微纳加工工艺的成熟,分焦平面偏振成像方式作为新一代偏振成像方式近年来被广泛关注<sup>[3-4]</sup>。分焦平面偏振成像方式采用以空间换时间

的思想,牺牲一部分空间分辨率,以类似于彩色滤波阵列的方式实现不同方向偏振信息的实时采集,具有更高的效率、更低的误差以及更小的体积、重量,是小型化偏振成像的趋势。另外,更加先进的仿生偏振成像方式虽然在时间效率、误差、分辨率等方面更具优势,但目前仍处于机理研究阶段,尚无相关设备报道<sup>[2]</sup>。

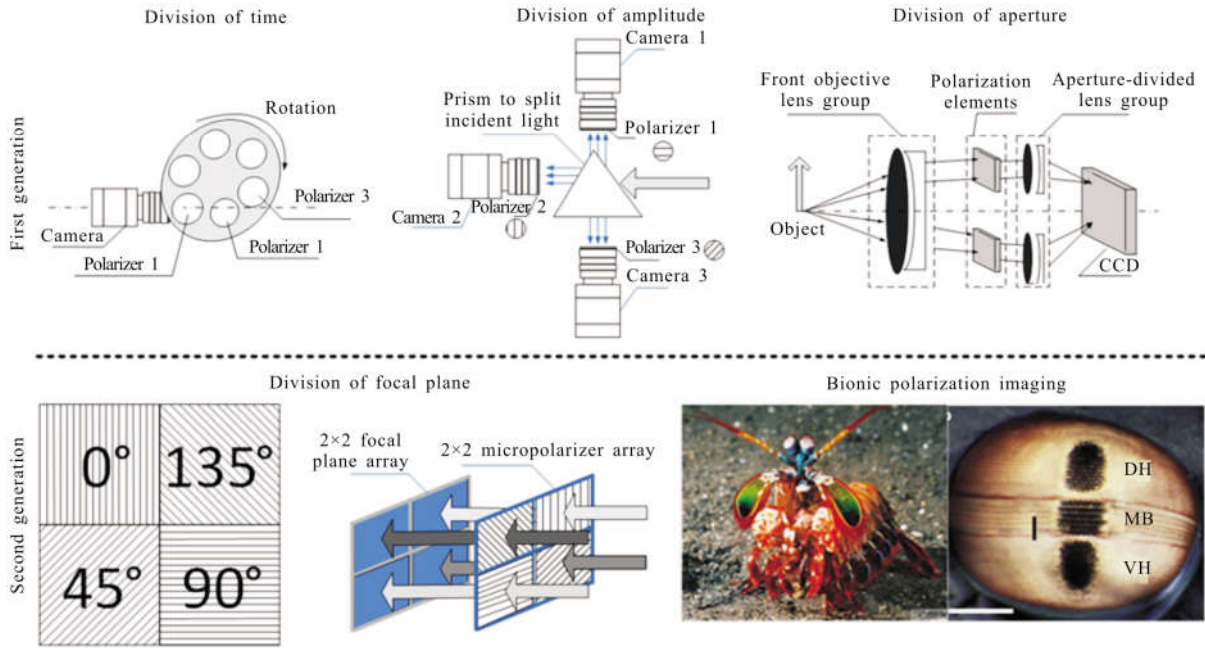


图 6 主要红外偏振成像方式示意图

Fig.6 Main infrared polarization imaging methods

## 2 基于分焦平面的红外偏振成像系统

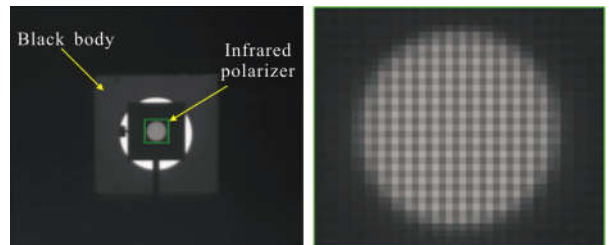
文中介绍一款最新研制的非制冷分焦平面红外偏振成像相机,如图 7 所示,工作波段为 8~12  $\mu\text{m}$ ,分辨率为 512×640,系统帧频为 50 Hz,可同时采集 0°、45°、90°、135°四个方向偏振信息。



图 7 红外偏振成像相机

Fig.7 Infrared polarization imaging camera

利用新研制的非制冷分焦平面红外偏振成像相机对如图 8(a)所示场景进行拍摄,即在面源黑体前放置一片红外线偏振片,构成一个高偏振特性的目标,由于分焦平面偏振成像方式特有的成像机理,在



(a) 原始红外偏振图像

(b) 红外偏振片区域局部放大

(a) Raw infrared polarization image

(b) Blowup of the infrared linear polarization region

图 8 红外偏振成像相机成像效果

Fig.8 A typical scene captured by the infrared polarization imaging camera



高线偏振区域会出现显著的棋盘效应,如图 8(b)线偏振片区域放大结果所示。

### 3 红外偏振成像智能感知

#### 3.1 基于深度学习的偏振图像去马赛克超分辨

针对偏振马赛克图像的特性,文中提出了多通道的残差网络 MCRN 模型来对微偏振阵列的偏振马赛克图像进行超分辨率重建,如图 9 所示。典型的图像重构方法对偏振马赛克图像超分辨率重建之前往往需要进行一系列的预处理,即首先将对应相同方向的像素从偏振马赛克图像中提取出来,构成不同波段的偏振图像数据,然后对偏振图像数据进行配准以消除空间偏振混叠现象。而在文中提出的 MCRN 模型中,则直接使用了一个卷积层实现了上述偏振马赛克图像的预处理过程。同时现有的

超分辨率重建方法一般都忽视了偏振图像在偏振维和空间维存在的相关性。针对该问题,MCRN 模型通过多通道卷积框架提取多张低分辨率的偏振图像特征,实现了对偏振图像数据空间维和偏振维信息的充分利用;为了进一步提高 MCRN 模型的超分辨重建性能,文中采用残差学习的方法来实现偏振马赛克图像的超分辨率重建<sup>[5-6]</sup>。通过使用残差学习,MCRN 模型并不是直接输出高分辨率的图像,而是转变为预测高、低分辨率图像之间的残差图像。从而解决计算量复杂问题的同时,增加了网络的深度,提高了网络的非线性学习能力。同时文中还选用了深度学习中的归一化 Batch Normalization (BN)方法进一步提高网络的收敛速度<sup>[7]</sup>。文中去马赛克结果及与其他偏振去马赛克插值算法的对比如图 10 所示<sup>[8-10]</sup>。

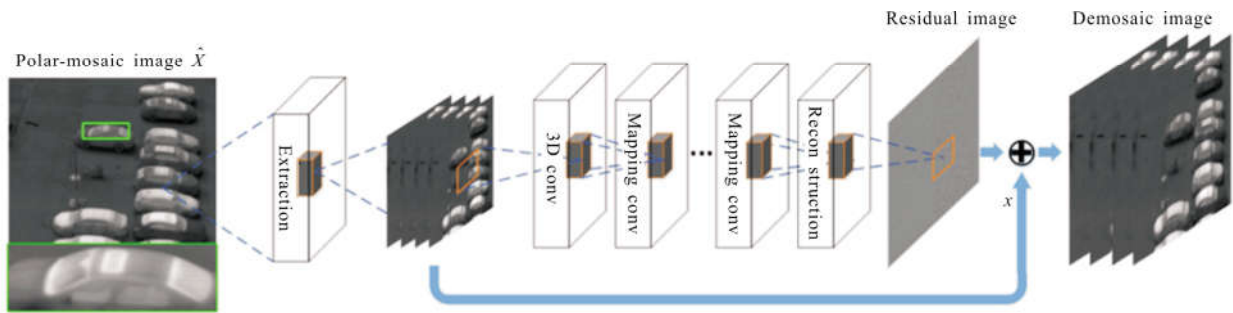


图 9 偏振去马赛克 MCRN 网络模型

Fig.9 Polarization demosaicking MCRN-net model

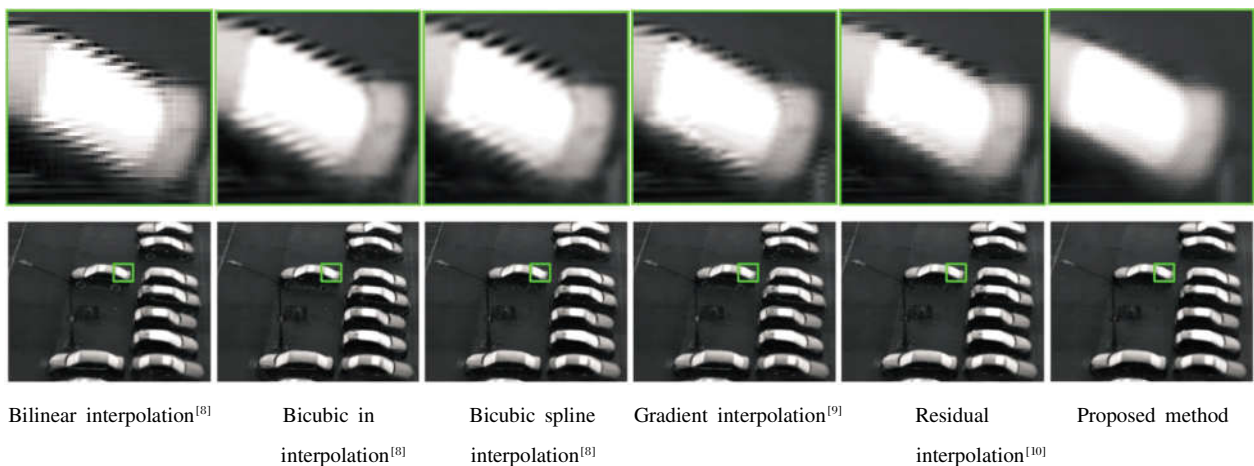


图 10 偏振去马赛克结果(偏振度图)

Fig.10 Polarization demosaicking results(DoLP)

#### 3.2 基于深度学习的目标检测跟踪

文中将红外偏振多目标跟踪工作分为检测和数  
据关联两部分来处理。利用快速目标检测算法

YOLOv3 实现目标的定位<sup>[11]</sup>,完整跟踪轨迹的获取  
通过对检测出的各个目标进行前后帧的匹配获得,  
如图 11 所示。利用 CNN 挖掘红外偏振马赛克图像

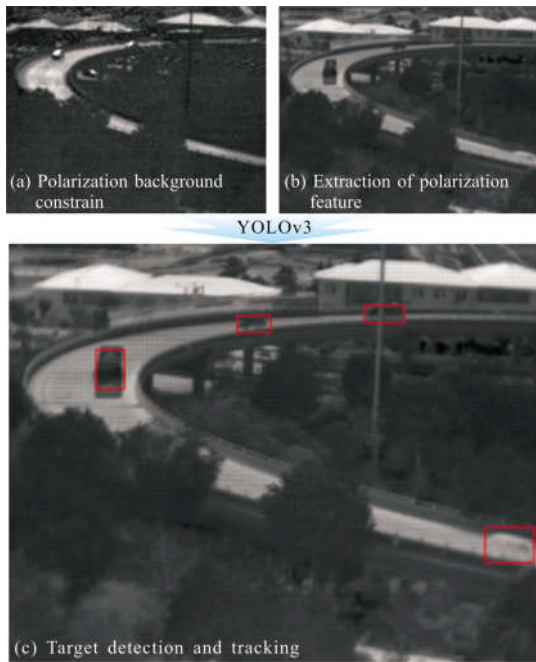


图 11 基于偏振信息的目标检测跟踪

Fig.11 Target detection and tracking based on polarization information

中的多维深度偏振特征,从而保证目标检测与跟踪的准确性,并通过调整学习率训练出检测效果最好的网络模型。在跟踪算法的测试中,实现了检测结果与跟踪器的关联,并通过更改跟踪器中的各项阈值参数与综合利用偏振信息使发生跟踪错误的概率降到了最低。同时,利用道路的强偏振特性作为约束,解决目标被树木遮挡时难以准确跟踪的问题。文中实现的多目标跟踪模型,兼顾快速性、准确性与稳定性,且深度结合偏振信息,能够基本实现实时生成多个目标的轨迹并解决目标由于遮挡、漏检、消失等带来的问题。

文中在真实红外偏振数据上对提出的目标检测跟踪算法进行测试,部分结果如图 12 所示,每一帧的检测结果都可以在 0.1 s 内得到,当遇到部分遮蔽,模糊或者是阴影的情况下仍然能够保持很高的检测水准,甚至能够超过人眼的观测水平。对于和背景辐射差异非常小的汽车目标同样可以实现准确的检测与跟踪。另外,检测精度仍有上升的空间。YOLOv3 尽管使用多尺度的策略已经对小目标的检测效果有了明显提升,但当小目标分布密集时,仍然有不小的可能性发生错检。



(a) 红外强度图像 (b) 红外偏振马赛克图像

(a) Infrared intensity image (b) Infrared polarization mosaic image

图 12 目标检测跟踪结果

Fig.12 Target detection and tracking results

### 3.3 基于偏振特性的倒影去除

在抗干扰目标检测方面,可利用红外偏振特性实现目标倒影的去除,如图 12 所示<sup>[12]</sup>。根据倒影区域反射辐射在正交方向的偏振差异可以实现倒影区域的初步定位。参考文献[12]指出倒影区的偏振角具有均匀性的特征,利用偏振差异性与倒影区偏振角的均匀性可实现对倒影区域的联合检测。然后在保证倒影区域周围背景区域照度一致性的条件下实现对倒影的去除,基本流程如图 13 所示。

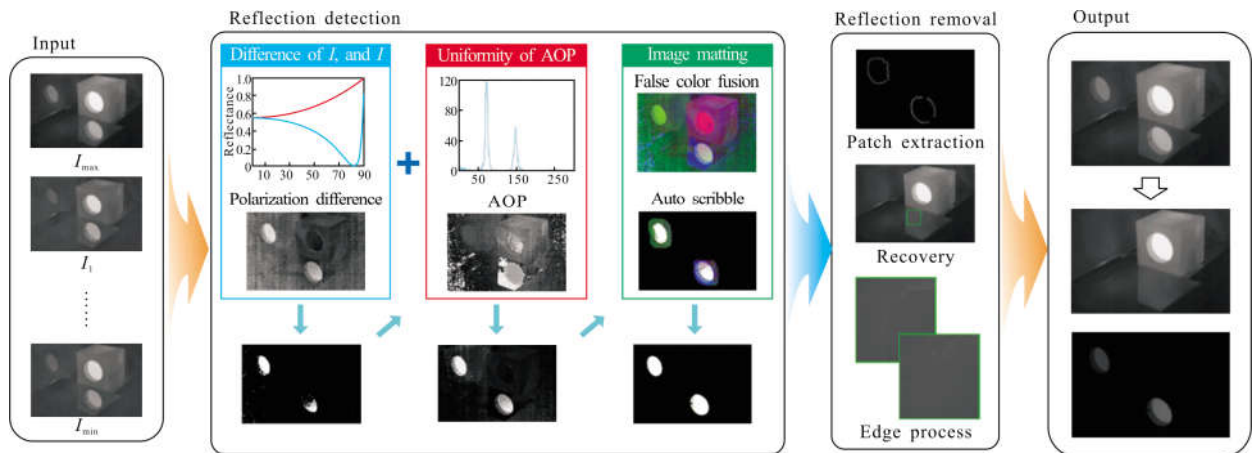


图 13 基于偏振特性的倒影去除<sup>[12]</sup>

Fig.13 Reflection removal based on polarization characteristics<sup>[12]</sup>

具体的,首先利用输入偏振图像计算正交方向偏振分量,进而得到偏振差图像及倒影粗检测结果;然后,根据提出的联合倒影检测算法得到更加准确的倒影检测结果;为了提高检测方法的鲁棒性,采用闭式抠图算法优化倒影区域边界定位,从而得到最终的倒影检测图;最后,根据倒影检测结果利用背景置换实现倒影去除。

基于偏振特性的倒影去除方法有望应用于全天候监控系统的抗干扰目标监测,也可以进一步推广到其他倒影去除应用,如水面倒影抑制等。

## 4 结 论

文中介绍了红外偏振成像在抗干扰目标检测识别中的潜在优势,并介绍了一款新研制的非制冷分焦平面式红外偏振成像相机,可实现场景红外偏振信息的实时获取,具有集成度高、可快照式成像的特点。基于此,介绍了基于多通道深度残差网络的红外偏振图像去马赛克方法,得到了较好的恢复效果。并利用红外偏振多维度信息实现目标检测与跟踪,研究如何利用偏振信息提升典型红外目标检测跟踪的准确性、精度与效率。另外,介绍了一种利用红外偏振特性进行倒影去除的方法,后续将深入研究红外偏振的抗干扰智能感知应用。

## 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] Zhao Yongqiang, Pan Quan, Cheng Yongmei. Imaging Spectropolarimetric Remote Sensing and Application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)  
赵永强,潘泉,程咏梅. 成像偏振光谱遥感及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [3] 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. (in Chinese)  
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.
- [4] Zhao Yongqiang, Zhang Yuchen, Liu Wuteng, et al. Polarization imaging by micro-polarizer array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3117–3123. (in Chinese)  
赵永强,张宇辰,刘吾腾,等. 基于微偏振片阵列的偏振成像技术研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3117–3123.
- [5] Kim J, Kwon Lee J, Mu Lee K. Deeply-recursive convolutional network for image super-resolution [C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 1637–1645.
- [6] He K, Zhang X, Ren S, et al. Deep residual learning for image recognition [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 770–778.
- [7] Ioffe S, Szegedy C. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift [Z]. arXiv preprint arXiv: 1502.03167, 2015.
- [8] Gao S, Gruev V. Bilinear and bicubic interpolation methods for division of focal plane polarimeters [J]. *Optics Express*, 2011, 19(27): 26161–26173.
- [9] Gao S, Gruev V. Gradient-based interpolation method for division-of-focal-plane polarimeters[J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 1137–1151.
- [10] Ahmed A, Zhao X, Gruev V, et al. Residual interpolation for division of focal plane polarization image sensors [J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10651–10662.
- [11] Redmon J, Farhadi A. Yolov3: An incremental improvement [Z]. arXiv preprint arXiv: 1804.02767, 2018.
- [12] Li N, Zhao Y, Pan Q, et al. Removal of reflections in LWIR image with polarization characteristics [J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16488–16504.