

分时型长波红外偏振成像系统图像配准研究

杨志勇, 王晓伟, 杨雨豪, 张明娣, 张志伟

(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘要: 针对分时型长波红外偏振成像系统在图像采集过程中, 由于在不同偏振方向获得的原始图像存在平移或者旋转的问题, 使用自行搭建的分时型长波红外偏振成像系统拍摄的 2 组不同复杂程度场景图像作为实验对象, 利用 3 种经典的特征检测算法 (Harris 角点、尺度不变特征变换 (Scale-Invariant Feature Transform, SIFT) 和 KAZE) 和 2 种匹配器 (Brute Force 和 Flann) 进行图像配准实验。结果表明: KAZE 算法检测出的特征点数比 Harris 和 SIFT 算法少, 但与 Brute Force 匹配器搭配时的配准正确率分别为 79.58% 和 59.53%, 远大于 Harris 和 SIFT 算法的配准正确率; KAZE 与 Brute Force 组合作为偏振成像系统的图像配准算法时, 配准后的图像中物体的几何形状和边缘轮廓更加清晰, 很好地减少了像素偏差带来的影响。

关键词: 红外偏振成像; 图像配准; 分时型偏振成像系统; 特征检测; 特征匹配

中图分类号: O436.3

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)05-044-09

Study of Image Registration in the Division-of-Time Long-Wave Infrared Polarization Imaging System

YANG Zhiyong, WANG Xiaowei, YANG Yuhao,
ZHANG Mingdi, ZHANG Zhiwei

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, Shaanxi)

ABSTRACT: In the process of image acquisition by the division-of-time long-wave infrared polarization imaging system, original images obtained in different polarization directions may have small translation or rotation. To solve this problem, two sets of images with different complexities of scenes captured by the division-of-time long wave infrared polarization imaging system built by the paper were taken as experimental objects. Thereby, image registration experiments were conducted by three classical feature algorithms including Harris corner detection algorithm, scale invariant feature transform (SIFT) and KAZE as well as two matchers including Brute Force and Flann. Results showed that the number of feature points detected by the KAZE algorithm is less than that of the Harris and SIFT algorithms. However, the registration accuracy of the KAZE algorithm with Brute Force matcher are 79.58% and 59.53% respectively, which are much higher than the other two algorithms. Moreover, the geometric shape and edge contour of the object in the registered image obtained by the image registration algorithm combing KAZE

收稿日期: 2024-05-30

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2023-JC-QN-0089)

第一作者: 杨志勇 (1983—), 男, 副教授, 主要从事偏振成像研究。E-mail: 731218791@qq.com

引用格式: 杨志勇, 王晓伟, 杨雨豪, 等. 分时型长波红外偏振成像系统图像配准研究[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (5): 44-52.

and Brute Force are more clearly visible. It indicated that the proposed method could greatly reduce the influence of pixel deviation.

KEYWORDS: infrared polarization imaging; image registration; division-of-time imaging system; feature detection; feature matching

光的振动方向与其传播方向的不对称性被称为偏振, 这是区分横波与其他纵波最明显的标志。在光的传播过程中, 不同的目标会根据自身的特征改变光的偏振特性, 这使得光的偏振具有不同于强度和光谱的独特信息, 其中包含了与探测目标有关的固有物理和化学特性相关丰富信息, 如目标材质、表面纹理和结构特征等^[1-3]。因此, 偏振探测作为一种新的光学探测方法, 近年来得到了广泛的研究, 主要应用在遥感^[4-5]、医学诊断^[6-7]、水下探测^[8-9]和军事领域^[10]。

红外偏振成像系统是一种多特征联合光电探测技术^[11], 通过结合红外成像和偏振光测量技术来获取目标和背景的热辐射特征和偏振特征 (如线偏振度和线偏振角), 相对传统的红外探测系统可以更好地凸显背景与目标之间的差异, 为解决复杂环境下目标的识别提供了新的思路。为了充分发挥红外偏振成像系统的优势, 国内外学者开展了许多实验研究。美国陆军研究实验室报道了长波红外偏振热成像仪, 之后法国 Thales 公司也报道了长波红外焦平面偏振探测器及其偏振成像仪^[12]。加拿大 Lavigne 等^[13]研制了一款分时偏振成像设备 VIP SPICE, 可以在可见光、短波红外、中波红外和长波红外 4 个谱段进行偏振成像。西北工业大学赵永强研究团队联合北方广微公司推出国内第一款制冷型长波红外分焦平面型偏振相机, 工作波段为 8~12 μm , 分辨率为 512 像素 $\times$ 640 像素, 系统帧频为 50 Hz, 可同时采集 0°、45°、90°、135° 方向偏振信息。国外红外偏振成像技术研究起步较早, 并且多种类型的红外偏振成像设备已经投入实际应用; 而国内技术发展较晚, 多数为仿制国外已有设备, 并且由于偏振元器件制造精度与国外有很大差距, 导致发展较慢。

在分时型偏振成像系统中, 由于旋转工作台的机械运动不可避免地会引起偏振系统产生微小的振动, 导致获取的不同偏振方向的图像存在像素偏移。大多数研究未给出像素偏移处理的方式^[14-16]。而陆高翔等^[17]基于 Sobel 边缘检测方式对获得的 4 幅不同偏振方向的图像进行配准来减少像素偏移误差。但使用 Sobel 算子进行图像配准存在

一定的局限性, 例如: 对于复杂场景的图像, 由于复杂场景通常具有非线性边缘特性, Sobel 算子在处理非线性特征时效果不佳, 难以准确定位边缘^[18], 并且 Sobel 算子容易错过一些非水平或非垂直的边缘。这些缺陷都会使得分时型偏振成像系统在进行复杂环境探测任务时生成的偏振图像的噪声较大, 清晰度低。

本文针对分时型长波偏振成像系统中像素位置偏移问题, 使用 3 个经典的图像检测算法 Harris 角点、尺度不变特征变换 (Scale-Invariant Feature Transform, SIFT) 和 KAZE, 并分别搭配 Brute Force 和 Flann 匹配器进行了图像配准实验, 进而使用 KAZE 算法和 Brute Force 匹配器, 根据线偏振角 (Angle of Linear Polarization, AoLP) 的计算公式求得 AoLP 图像, 以减少成像系统微小偏移引起的误差, 提高成像质量, 使得图像中物体边缘轮廓更加清晰。

1 分时型长波红外偏振成像系统

1.1 偏振态的 Stokes 表示

在偏振探测领域, 通常使用 Stokes 矢量 (S_0 、 S_1 、 S_2 和 S_3) 来描述物体反射或辐射光的偏振态。并且 Stokes 给出了光的偏振态的实验测量方法, 可以用公式表示为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_H + P_V \\ P_H - P_V \\ P_{45} - P_{135} \\ P_R + P_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}$$

式中: S_0 为光束的总辐照度, 通常表示为水平和垂直偏振光通量之和; S_1 为水平偏振光通量分量 P_H 与垂直光通量 P_V 之差; S_2 为 45° 光通量 P_{45} 与 135° 光通量 P_{135} 之差; S_3 为右旋 P_R 与左旋 P_L 圆偏振光通量之和。

斯托克斯参量也经常使用 I 、 Q 、 U 和 V 来表示。在实际应用中, 因为圆偏振分量很小, 并且会增大测量难度, 通常取 $S_3 = 0$, 利用 Stokes 矢量可以进一步计算得到线偏振度 (Degree of Linear

Polarization, DoLP) 和 AoLP 等偏振信息, 计算公式分别为

$$D_{LP} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}$$

$$A_{LP} = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{S_2}{S_1} \right) \quad (2)$$

式中: D_{LP} 为 DoLP; A_{LP} 为 AoLP。

相对于 DoLP 图像能凸显目标与背景的不同特征, AoLP 图像对图像中物体的表面纹理、几何形状和表面走向更加敏感, 使用 AoLP 图像作为图像配准后检测准确性的指标, 可以更好地衡量图像的质量。

1.2 分时型长波红外偏振成像系统

分时型长波红外偏振成像系统主要由红外成像仪和偏振片组成, 通过步进电机带动偏振片的旋转, 采集特定方向上的偏振图像。这种成像方式结构简单, 可以更换不同性能的偏振片以及扩展镜组 (如增加滤光片来获取不同谱段的偏振图像; 增加四分之一波片来获取圆偏振图像), 具有较好的空间分辨率和准确性。但是也存在测量过程时间较长、无法对移动的物体进行探测的缺点。其设计原理如图 1 所示。

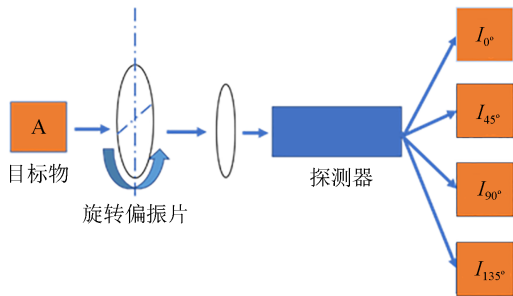


图 1 分时型偏振成像系统原理

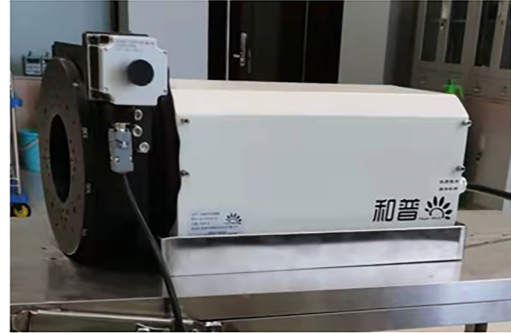
Fig. 1 Principle of the division-of-time polarization imaging system

图 1 中: I_{0° 、 I_{45° 、 I_{90° 和 I_{135° 分别表示通过偏振片旋转 0° 、 45° 、 90° 和 135° 而获得的物体在 0° 、 45° 、 90° 和 135° 方向上的光强图像。

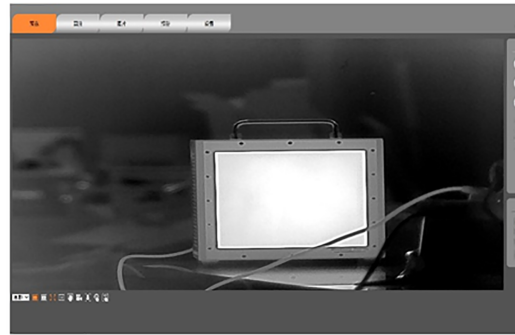
实验设备使用济南和普威视光电技术有限公司研制的长波红外成像器, 外加机械结构和偏振片, 使用软件控制偏振片的旋转从而获得目标不同方向上的偏振图像, 成像系统的光学分辨率为 $640 \text{ 像素} \times 512 \text{ 像素}$, 波长范围为 $7\,400 \sim 14\,000 \text{ nm}$, 有效探测范围为 $8\,400 \text{ m}$, 偏振片的消光比为 $10\,000:1$ 。系统实物如图 2 所示。

通过图 2 可以看到, 由于旋转机械结构在带动

偏振片旋转的过程中会不可避免地产生振动偏移, 导致拍摄的 4 幅不同偏振方向的图像存在像素不对齐的问题, 如果直接进行图像计算, 会产生较大的误差, 使得到的偏振图像质量无法保证。



(a) 成像系统实物



(b) 红外成像效果及损伤界面

图 2 分时型长波红外偏振成像系统

Fig. 2 Division-of-time long wave infrared polarization imaging system

2 角点检测算法

2.1 Harris 角点检测算法

Harris 算法^[19]是在目标图像上使用一个大小合适的窗口, 通过窗口在图像上的随意移动, 根据移动前后的该窗口的图像灰度变化程度来确定角点的位置。Harris 算法计算步骤为: 计算待检测图像的自相关矩阵、判断待检测图像的角点。具体步骤如下。

第一步: 将图函数 $I(x, y)$ 和窗口函数 $\omega(x, y)$ 进行卷积计算, 得到图像梯度 I_x 和 I_y 。再使用平方和函数来定义窗口前后移动的灰度变化:

$$E(u, v) = \sum_{(x, y) \in \omega} \omega(x, y) [I(x+u, y+v) - I(x, y)]^2$$

式中: (u, v) 为窗口偏移量; (x, y) 为窗口内像素点的坐标值。

将 $E(u, v)$ 进行泰勒展开:

$$\sum_{(x,y) \in \omega} \omega(x,y) [I(x+u, y+v) - I(x,y)]^2 =$$

$$\left(\sum_{(x,y) \in \omega} \omega(x,y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \left(\sum_{(x,y) \in \omega} \omega(x,y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$

即 $E(u, v)$ 的表达式为

$$E(u, v) \cong \begin{bmatrix} u & v \end{bmatrix} \mathbf{H} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$

式中: $\mathbf{H}$ 为待检测图像点的自相关矩阵, 有

$$\mathbf{H} = \sum_{(x,y) \in \omega} \omega(x,y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix}$$

第二步: 通过对比自相关矩阵 $\mathbf{H}$ 的特征值大小 λ_1, λ_2 来确定是否存在角点。当 λ_1, λ_2 均为较小值时, 说明像素点所在区域为“平坦区域”; 当 λ_1, λ_2 为一小一大时, 说明像素处于图像的边缘; 当 λ_1, λ_2 均为较大值且近似相等时, 说明像素点所在区域为角点。为了控制计算自相关矩阵特征值分解的复杂度, 定义 Harris 角点响应函数为

$$R(x, y) = \det(\mathbf{H}) - K(\text{trace}(\mathbf{H}))^2$$

$$\det(\mathbf{H}) = \lambda_1 \lambda_2$$

$$\text{trace}(\mathbf{H}) = \lambda_1 + \lambda_2$$

式中: $\det(\mathbf{H})$ 为矩阵 $\mathbf{H}$ 的行列式值; $\text{trace}(\mathbf{H})$ 为矩阵 $\mathbf{H}$ 的迹; K 为经验常数。当 $R(x, y)$ 大于设定的阈值时, 则判断该像素点 (x, y) 为角点。

Harris 角点检测运算的原理比较简单且具有旋转不变性和光照不变性, 但是阈值的设定对 Harris 算法的角点检测有很大的影响, 并且检测效果很大程度上取决于窗口大小的设定, 实际应用中很难控制高斯窗口的大小。

2.2 SIFT 角点检测算法

SIFT 是一种较为常见的角点检测算法^[20], 可以在 Open cv 中直接调用。SIFT 算法主要步骤为: 特征检测、特征提取和特征匹配。

1) 图像特征检测

SIFT 在 Harris 角点检测算法原理的基础上,

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 D}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 D}{\partial x \partial \sigma} & \frac{\partial^2 D}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 D}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 D}{\partial y \partial \sigma} & \frac{\partial^2 D}{\partial \sigma \partial x} & \frac{\partial^2 D}{\partial \sigma \partial y} & \frac{\partial^2 D}{\partial \sigma^2} \end{bmatrix}$$

使其导数为 0, 即

$$\frac{\partial D(x, y, \sigma)}{\partial x} = \mathbf{g} + \mathbf{H}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) = 0$$

可求得 $D(x_{\max}, y, \sigma)$, 为高斯差分算子。通常情

使用图像和高斯函数卷积生成的尺度空间进行特征检测, 创建尺度空间 σ 如下。

尺度空间 $L(x, y, \sigma)$ 定义为一个变化尺度的高斯函数 $G(x, y, \sigma)$ 和原图像 $I(x, y)$ 的卷积。

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y)$$

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-x^2 - \frac{y^2}{2\sigma^2}\right)$$

式中: σ 为高斯核标准差。

构建高斯金字塔和差分金字塔来创建尺度空间, 其中, 高斯金字塔有两层: 第一层大小是原图像的两倍, 第二层由第一层通过高斯滤波得到。之后将新生成的图层重复进行高斯滤波后构成一个组, 将第一组最模糊的一层进行二倍采样作为下一组的初始图像重复进行。差分金字塔是由高斯金字塔前后两层的差所构造, 具体公式为

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k_1\sigma) -$$

$$G(x, y, \sigma)) * I(x, y) =$$

$$L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma)$$

式中: $D(x, y, \sigma)$ 为高斯差分图像; k_1 为比例因子。

完成尺度空间构建后, 对尺度空间每一个点进行检测, 通过判断是否满足极值条件来定位特征点的位置。

2) 图像特征提取

在 $D(x, y, \sigma)$ 中检测局部极值点, 提取出的每个点都要与它同一层周围邻域的 8 个点以及上下两层中对应位置周围邻域的 2×9 个点即一共 26 个像素点进行比较。仅当被检测点的值大于或小于这 26 个点时, 才将该点确定为一个极值点。

为了剔除边缘响应产生的伪角点, 同时剔除对比度低的角点, 空间尺度函数的二阶泰勒展开式为

$$D(x, y, \sigma) \approx D(x_0, y, \sigma) + \mathbf{g}^T(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) +$$

$$\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)^T \mathbf{H}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)$$

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} \frac{\partial D}{\partial x} & \frac{\partial D}{\partial y} & \frac{\partial D}{\partial \sigma} \end{bmatrix}$$

况下, $D(x_{\max}, y, \sigma) \leq 0.03$, 则认为是低对比点, 即非角点。

3) 图像特征匹配

为了保证图片旋转时角点不变, 则需要确定

角点的方向，即使用特征点 (x, y) 处的梯度 $m(x, y)$ 和梯度方向角 $\theta(x, y)$ 作为 SIFT 的特征描述因子，具体公式为

$$m(x, y) = (L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + \\ L(x, y+1) - L(x, y-1))^2)^{1/2} \\ \theta(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)} \right)$$

式中： $L(x, y)$ 表示特征点 (x, y) 的尺度。对于已经提取到的特征点，已知该特征点的尺度值为 μ ，以该特征点为中心，以 $3 \times 1.5\mu$ 为半径的图像区域的梯度的方向角和幅值为角点方向。

SIFT 具有尺度不变性和旋转不变性，同时当图像产生亮度变化、对比度变化和视角变化时，对 SIFT 算法效果的影响较小，但是 SIFT 算法也存在复杂度高、耗时长缺点。

2.3 KAZE 算法

KAZE 算法^[21]与 SIFT 和 SURF 算法相比，最大的区别在于 KAZE 算法使用的是非线性尺度空间来代替线性高斯空间，从而达到保证图片边界和细节的目的。

在特征检测中使用非线性微分方程来描述扩散方程：

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \text{div}(c(x, y, \eta) \cdot \nabla B)$$

式中： B 为图像像素大小即图像亮度； η 为尺度参数； div 和 ∇ 代表散度和梯度； $c(x, y, \eta)$ 为传导函数，控制图像亮度扩散过程中大尺度下的图像边缘特性与细节特性能够更好地保留。让图像梯度幅值与 $c(x, y, \eta)$ 相联系，构造传导函数为

$$c(x, y, \eta) = g(|\nabla B_\delta(x, y, \eta)|)$$

式中： $\nabla B_\delta(x, y, \eta)$ 为图像亮度在某一尺度经过高斯运算后的梯度； g 为扩散函数。为了保留较大的宽度区域，通常选取

$$g = \frac{1}{1 + |\nabla B_\delta|^2 / k_2^2}$$

式中： k_2 为控制扩散级别的对比度因子，决定了边缘信息的保留程度。

KAZE 算法的非线性尺度空间构建与 SIFT 相似尺度级别都按对数递增，区别在于非线性扩散滤波是以时间为单位，需要对以像素为单位的尺度参数 η_i 进行转换，其中尺度参数 η_i 与进化时间 t_i 的映射关系为

$$t_i = \frac{1}{2} \eta_i^2$$

式中： t_i 为进化时间。根据进化时间序列即可构造非线性尺度空间。

针对非线性偏微分方程的图像扩散方程没有解析解的问题，KAZE 提出了一种加性算子分裂算法，即使用隐性差分格式对偏微分方程进行离散变化：

$$B^{i+1} = (I - (t_{i+1} - t_i) \sum_{l=1}^m A_l (B^i)^{-1}) B^i$$

式中： I 是单位矩阵； A_l 为 i 尺度上图像亮度 B^i 在维度 l 上的传导矩阵。该式对任意时间步长都有效。

KAZE 算法的特征点检测与 SURF 相似，都是计算尺度空间中的 Hessian 矩阵。在特征点描述中，KAZE 算法采用 MSURF 算法的描述形式，在以特征点为中心、 $6\delta_i$ 为半径的圆形区域内，对所有像素进行一阶微分，再以步长为 0.15 rad 、张角为 60° 的扇形遍历整个区域，求得微分为

$$w = \sum B_x / \sum B_y$$

最大微分所对应的方向为图像特征点的主方向，有

$$\varepsilon = \arctan(\sum B_x / \sum B_y)$$

特征提取部分使用 64 维的描述向量，以特征点为中心建立 $24\eta_i \times 24\eta_i$ 的矩形区域，将其划分为 4×4 的子模块，再使用高斯核对子模块一阶导数进行加权运算，获得子模块的向量为

$$d_v = (\sum B_x, \sum B_y, \sum |B_x|, \sum |B_y|)$$

对 16 个子模块向量 d_v 进行加权计算和归一化处理，可以去除光照的影响，从而保证不同对比度下描述因子的不变性。特征匹配过程与 SIFT 算法使用相同的原理来获得角点的方向。KAZE 算法在保持良好的尺度不变性和旋转不变性的同时，由于特征点周围的细节和边缘点是由一阶微分计算构成，从而保证了边缘的不变性。

3 图像配准实验

使用分时型长波红外偏振探测系统分别从 4 个偏振方向拍摄了两组场景复杂程度不同的图像，如图 3 所示。图 3 (a) 是在实验室环境中，背景为墙壁，目标为金属支架和垂直放置的金属板，金属板的中央呈现凹凸不平的特征；图 3 (b) 是在户外树林中被平面铣过，右下角有一个收音机和被树遮挡的模型车。

3.1 3种算法配准对比实验

使用笔记本作为图像配准的实验平台，其具体参数为：CPU 为 12th Gen Intel Core i9-12900 Hz，内存 16GB；显卡为 NVIDIA GeForce RTX 3060 Laptop GPU。通过 Python 程序实现基于 3 种算法的偏振图像匹配。简单场景的实验结果依次如图 4 所示。图中左侧为偏振片在起始位置时的偏振图像；右侧为偏振片旋转 45° 时的偏振图像。

表 1 为对简单场景检测的特征点和匹配点数

据，其中，正确匹配的特征点数表示通过人眼观察完全没有匹配错误时的特征点数。

由图 4 和表 1 可以看出：简单金属板图像的特征点较少，且大多分布在金属板上；Harris 和 SFIT 算法检测特征点的能力大致相同，但是和匹配器匹配的效果较差；而 KAZE 算法因为使用非线性尺度空间的特征检测方式，检测出的特征点相对较少，但是与两种匹配器搭配的匹配率最高为 79.58%。

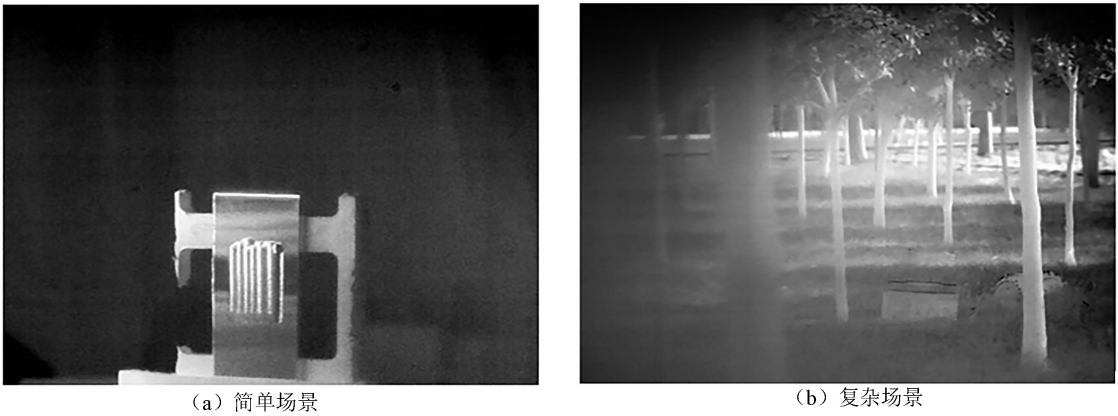


图 3 两组场景目标光强图像
Fig. 3 Light intensity images of the target in two scenes

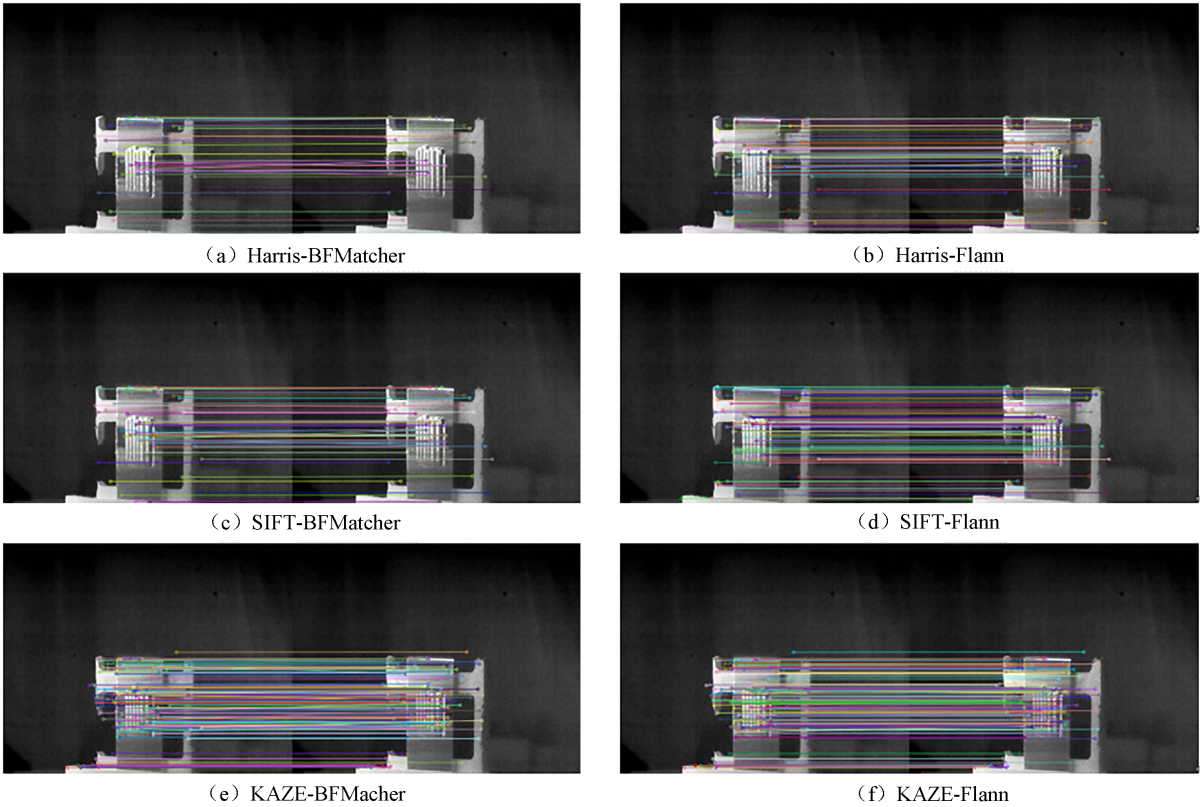


图 4 简单场景配准实验结果
Fig. 4 Registration experiment results of simple scene

表 1 简单场景匹配数据

Tab. 1 Matching data of simple scene

算法	检测特征点数量	匹配器	正确匹配的特征点数	匹配正确率/%
Harris	356/355	Brute Force	40	11.24
		Flann	55	15.45
SIFT	375/355	Brute Force	65	16.53
		Flann	92	24.53
KAZE	278/284	Brute Force	226	79.58
		Flann	201	70.77

注：在检测特征点数量一列中，“356/355”中的“356”为起始位置图片检测的特征点数目，“355”为偏振片旋转45°时图像检测的特征点数。

复杂场景的配准实验结果如图5和表2所示。

在复杂场景中同样可以看出：Harris和SIFT算法检测的特征点较多，但是搭配两种匹配器的匹配效果很差；而KAZE算法的检测特征点数相对于金属板图像多了一倍，与两种匹配器匹配率均高于50%，相对于简单图像来说效果变差，但是描述的特征点数目变多。

通过两组不同复杂程度照片的图像配准实验可以发现，KAZE算法虽然特征点检测的能力弱于Harris和SIFT算法，但是与匹配器搭配的整体配准性能更优而且与Brute Force匹配器搭配的图

像配准效果最好，可以作为分时型长波红外偏振成像系统的图像配准算法。

表 2 复杂场景匹配数据记录表

Tab. 2 Matching data of complex scene

算法	检测特征点数量	匹配器	正确匹配的特征点数	匹配正确率/%
Harris	799/716	Brute Force	70	8.8
		Flann	4	0.5
SIFT	852/716	Brute Force	21	2.46
		Flann	174	20.42
KAZE	598/478	Brute Force	356	59.53
		Flann	307	51.34

3.2 AoLP 图像计算

将KAZE算法和Brute Force匹配器搭配作为分时型长波红外偏振成像系统的配准算法，以 I_0 图像为基准，对 I_{45° 、 I_{90° 和 I_{135° 的图像进行图像配准，再使用式（1）计算得到两组场景的AoLP图像，如图6所示。

由图6可以发现，未进行图像配准的金属板边缘部分和金属支架的平面部分因为成像系统的微小位移导致AoLP图像边缘模糊不清晰，并且噪点较大，配准后的图像金属板边缘清晰分明。从复杂场景图像的对比可以看出，树木边缘轮廓变得清晰可见。

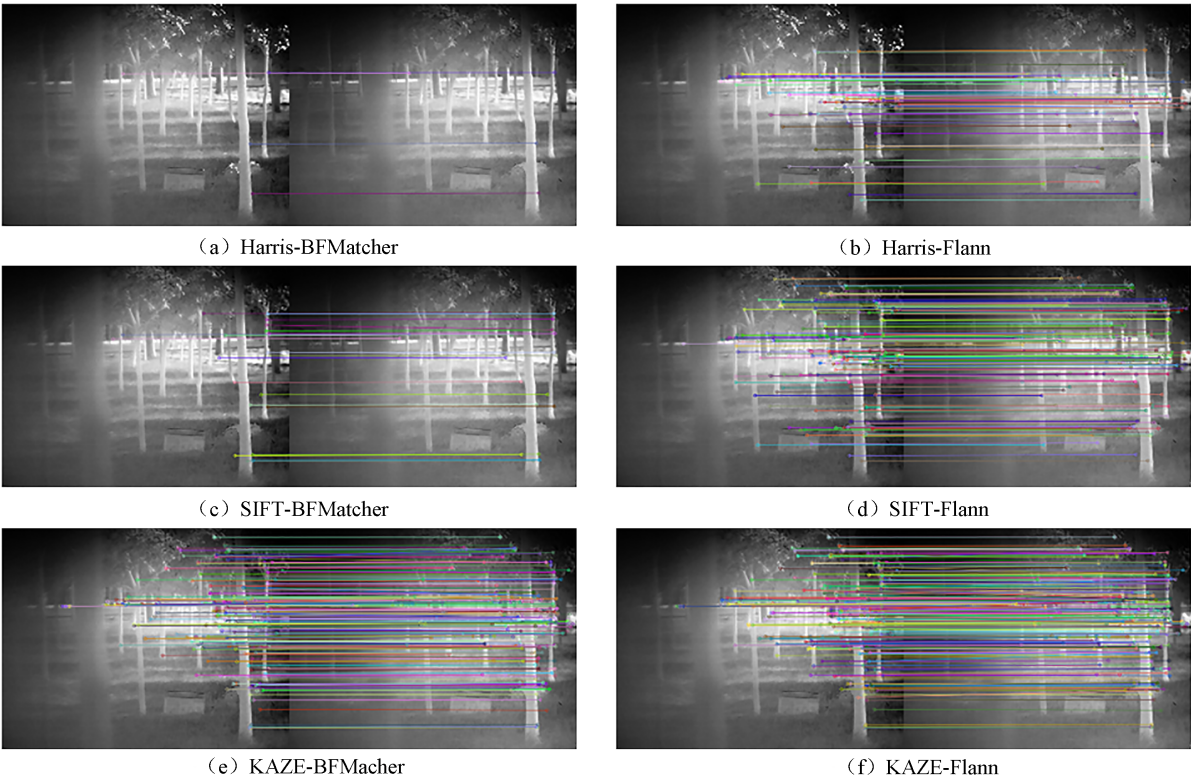


图 5 复杂场景配准实验结果

Fig. 5 Registration experiment results of complex scene

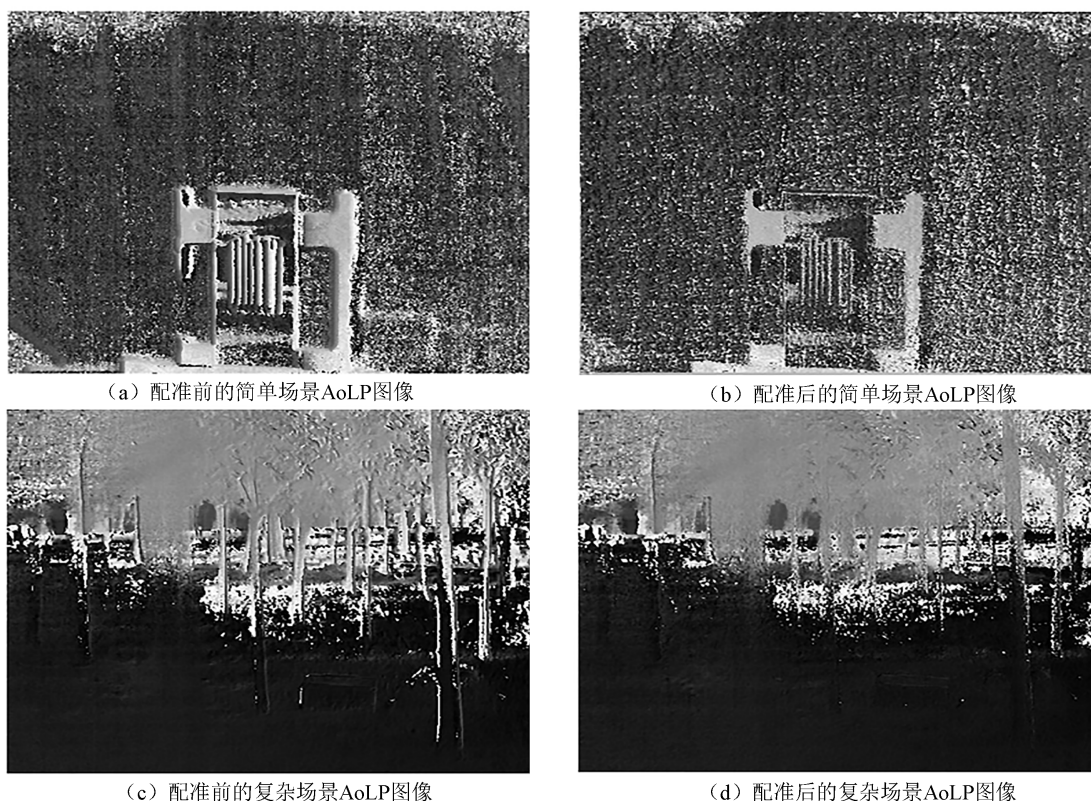


图 6 AoLP 图像对比

Fig. 6 Comparison of AoLP images before and after registration

4 结论

本文以两组复杂程度不相同的图像作为实验对象, 使用 Harris、SIFT 和 KAZE 算法分别搭配 Brute Force 和 Flann 匹配器进行图像配准实验, 根据实验结果, 选择以 KAZE 算法和 Brute Force 匹配器组合作为偏振成像系统的图像配准算法, 经过图像配准后的 AoLP 图像中物体的边缘轮廓清晰可见, 很好地解决了成像系统中的像素偏移问题。但是通过图像配准算法消除像素误差也存在一定的问题, 例如: 在进行配准实验的过程中需要对 4 幅源图像进行配准, 没有考虑时间因素, 源图像越复杂, 所需要的时间就会越长, 这使得分时型长波红外偏振成像系统无法快速获取目标的偏振特性, 只能对静止的目标进行研究。

参考文献:

- [1] 蔡伟, 陈栋, 杨志勇, 等. 热辐射环境下多涂层目标红外偏振特性分析[J]. 光学学报, 2023, 43(22): 49-56.
- CAI W, CHEN D, YANG Z Y, et al. Analysis of infrared polarization characteristics of multi-coat-

ed targets in thermal radiation environment[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(22): 49-56.

- [2] 朱达荣, 杨善骥, 汪方斌, 等. 疲劳损伤过程金属表面偏振热像纹理特征实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(4): 424001.

ZHU D R, YANG S J, WANG F B, et al. Texture characteristics of polarized thermal images on metal surfaces in fatigue damage process[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(4): 424001.

- [3] 柳祎, 史浩东, 姜会林, 等. 粗糙目标表面红外偏振特性研究[J]. 中国光学, 2020, 13(3): 459-471.
- LIU Y, SHI H D, JIANG H L, et al. Infrared polarization properties of targets with rough surface [J]. Chinese Optics, 2020, 13(3): 459-471.

- [4] JIA C W, WANG C C, MA L X, et al. Polarized radiative transfer in seawater-in-oil emulsions floated on seawater considering the impact of oil absorption on seawater droplet scattering[J]. Applied Optics, 2023, 62(17): 4660-4672.

- [5] RAN D J, SUN Z G, LU S, et al. Optimizing angular resistant spectral indices to estimate leaf biochemical parameters from multi-angular spectral reflection[J]. Agricultural and Forest Meteorology,

- 2024, 348: 109916.
- [6] 褚金奎, 丁晓涵, 陈永台, 等. 硬化性腺病和浸润性导管癌组织的 Mueller 矩阵表征[J/OL]. 中国激光, 2024: 1-17 [2024-07-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.tn.20240520.1459.017.html>.
ZHU J K, DING X H, CHEN Y T, et al. Mueller matrix characterization of sclerosing adenosis and invasive ductal carcinoma tissues[J/OL]. Chinese Journal of Lasers, 2024: 1-17 [2024-07-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.tn.20240520.1459.017.html>.
- [7] LI P C, DONG Y, WAN J C, et al. Polarimetrics: Deriving polarization parameters from a Mueller matrix for quantitative characterization of biomedical specimen[J]. Journal of Physics, D: Applied Physics, 2021, 55(3): 34002.
- [8] ZHU Y, HE Q Y, FU Q, et al. Detection of underwater targets using polarization laser assisted echo detection technique[J]. Applied Sciences, 2023, 13(5): 3222.
- [9] WANG G C, GAO J, CHEN Y B, et al. Polarization-enhanced underwater detection method for multiple material targets based on deep-learning[J]. IEEE Photonics Journal, 2023, 15(6): 8501106.
- [10] DUAN J, FU Q, MO C H, et al. Review of polarization imaging for international military application[C]// Fifth International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013. Washington D. C.: SPIE, 2013, 8908: 276-281.
- [11] 郝佳, 周奎, 王文正, 等. 基于红外偏振成像的背景淹没目标探测应用研究[C]//中国指挥与控制学会. 第十届中国指挥控制大会论文集(上册). 北京: 兵器工业出版社, 2022: 656-661.
HAO J, ZHOU K, WANG W Z, et al. Research on target detection obscured by background based on infrared polarization imaging[C]//Chinese Institute of Command and Control. Proceedings of the 10th China Conference on Command and Control. Beijing: National Defense Industry Press, 2022: 656-661.
- [12] ZHANG Z, BLUM R S. A categorization of multiscale-decomposition-based image fusion schemes with a performance study for a digital camera application[J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(8): 1315-1326.
- [13] LAVIGNE D A, BRETON M, FOURNIER G, et al. A new passive polarimetric imaging system collecting polarization signatures in the visible and infrared bands[C]//Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XX. Washington D. C.: SPIE, 2009, 7300: 353-361.
- [14] 张卫红, 李校博, 张永宁, 等. 分时型偏振成像探测系统开发与应用(特邀)[J]. 光电技术应用, 2023, 38(5): 30-36, 78.
ZHANG W H, LI X B, ZHANG Y N, et al. Development and application of time-sharing polarization imaging detection system (invited) [J]. Electro-Optic Technology Application, 2023, 38(5): 30-36, 78.
- [15] 张哲. 长波红外偏振成像及实验研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019: 35-37.
ZHANG Z. Long-wave infrared polarization imaging and experimental study[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019: 35-37.
- [16] 褚金奎, 林威, 张然, 等. 偏振探测系统的图像配准[J]. 光学精密工程, 2018, 26(5): 1181-1190.
CHU J K, LIN W, ZHANG R, et al. Image registration of polarimeters[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(5): 1181-1190.
- [17] 陆高翔, 杨志勇, 宋俊辰. 简易分时型长波红外偏振成像系统研究[J]. 红外技术, 2021, 43(8): 723-729.
LU G X, YANG Z Y, SONG J C. Simple time-sharing long wave infrared polarization imaging system[J]. Infrared Technology, 2021, 43(8): 723-729.
- [18] HE K M, ZHANG X Y, REN S Q, et al. Deep residual learning for image recognition[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 770-778.
- [19] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector[C]//Proceedings of the Alvey Vision Conference. Manchester: British Machine Vision Association, 1988, 15(50): 23.
- [20] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [21] ALCANTARILLA P F, BARTOLI A, DAVISON A J. KAZE features[C]//European Conference on Computer Vision. Berlin Heidelberg: Springer, 2012: 214-227.