一种基于非线性扩散滤波的图像特征检测算法

汪方斌1,2*,储朱涛1,2**,朱达荣1,2,刘涛1,2,孙凡1,2,冯康康1,2

1安徽建筑大学机械与电气工程学院,安徽 合肥 230601;

2安徽建筑大学建筑机械故障诊断与预警重点实验室,安徽 合肥 230601

摘要 利用非线性扩散滤波构造尺度空间,将 Hessian 矩阵的弱边缘检测能力与 Laplace 算子的强边缘检测能力相结合,以 Hessian 矩阵行列式与 Laplace 算子之比作为特征判据,提出了一种基于非线性扩散滤波的图像特征检测算法,并对点和线仿真图像、Mikolajczyk标准数据库、SALSA 偏振相机获取的真实场景图像进行了性能验证。结果表明,所提算法能够检测出图像的强边缘、弱边缘和角点特征,受光照、对比度影响较小,稳健性好。
关键词 图像处理;特征检测与描述;偏振图像;非线性尺度空间;图像匹配中图分类号 TP391.4 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP56.111002

Nonlinear-Diffusion-Filtering-Based Feature Detection Algorithm

Wang Fangbin^{1,2*}, Chu Zhutao^{1,2**}, Zhu Darong^{1,2}, Liu Tao^{1,2}, Sun Fan^{1,2}, Feng Kangkang^{1,2}

¹ School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China; ² Key Laboratory of Construction Machinery Fault Diagnosis and Early Warning Technology, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China

Abstract A nonlinear diffusion-filtering based feature detection algorithm was proposed with the scale space constructed by nonlinear diffusion-filtering, in which the ability of Hessian matrix weak edge detection and that of Laplace operator strong edge detection was combined, and the ratio of the Hessian matrix determinant to the Laplace operator was set as feature detection criterion. The performance of the proposed algorithm was validated with the images from simulated points and lines, Mikolajczyk standard database and the real scenes through SALSA polarization camera. The results demonstrated that the proposed algorithm can detect the strong and weak edges and corner points of an image with good robustness less affected by bad illumination or low contrast.

Key words image processing; feature detection & description; polarization image; nonlinear scale space; image matching

OCIS codes 100.3008; 100.2000; 100.2960

1引言

偏振成像作为新型的探测技术与传统光强成像 相比,不仅能够获取目标表面偏振度、偏振角,以及 偏振光强等多重目标信息,还能提高对目标的探测 能力,因此被广泛应用于医疗、航天、遥感等领 域^[1-7]。偏振成像系统通常具有多个通道,各通道间 的特性存在差异。如果直接对其进行偏振解算,易 产生虚假偏振信息,因而在解算前需要对不同偏振 方位角图像进行精确配准[8-12]。

图像配准算法通常分为基于灰度值和基于特征 两大类。其中基于特征的配准算法对尺度、旋转、视 角的变换具有较好的适应能力且计算简单,因此在 实际中应用的较多。配准前,需要进行特征检测以 找出图像之间的对应关系。传统的特征检测算法主 要有尺度不变特征变换(SIFT)和加速稳健特征 (SURF)等^[13-16]。SIFT 算法采用各向同性的高斯 滤波构建差分尺度空间,易使边缘特征模糊,且计算

收稿日期: 2018-11-07; 修回日期: 2018-12-07; 录用日期: 2018-12-25

基金项目:国家自然科学基金(61871002)、安徽省高校自然科学研究重大项目(KJ2017ZD42)、安徽省自然科学基金项目 (1808085ME125)、安徽省科技强警计划项目(1604d0802013)

^{*} E-mail: wangfb@ahjzu.edu.cn; ** E-mail: zhutaochu@ahjzu.edu.cn

复杂度高、时效性差。SURF 是在 SIFT 基础上发 展起来的加速特征检测算法,但其在进行尺度空间 构建时因采用盒子滤波模糊了边缘特征,故难以精 确定位。偏振成像能够凸显复杂环境中目标边缘、 轮廓、细节等信息,进而提高对目标的探测和识别能 力。如果采用传统算法对偏振图像特征进行检测, 由于边缘和细节特征丢失,不同偏振方位角图像特 征之间难以准确匹配,继而降低了配准的精度。文 献[17-20]中提出了 KAZE 图像特征检测算法,利 用非线性扩散滤波构造尺度空间,避免了图像边缘 和细节特征被平滑,并采用 Hessian 矩阵行列式实 现特征点的判别,获得了比 Harris 更好的角点和弱 边缘检测能力,但 KAZE 算法对光照和对比度的变 化敏感[21-22],且构建非线性尺度空间较为耗时,因此 Alcantarilla 等^[23] 又提出 AKAZE (Accelerated-KAZE) 算法^[24]。

在应用偏振成像时,光线需要穿过某一特定偏振方位角的偏振片,而其他方向上的辐射量则被滤除,导致图像对比度较低,且图像的弱边缘对光照变化非常敏感,若直接利用 KAZE 算法检测偏振图像的特征来进行配准,则会造成特征识别率和配准精度降低。为此,本文基于非线性扩散滤波构造尺度空间,将 Hessian 矩阵弱边缘与 Laplace 算子强边缘的检测能力相结合,并以 Hessian 矩阵行列式与Laplace 算子之比作为特征判据,提出了一种基于非线性扩散滤波的图像特征检测算法,并对点线仿真图像、Mikolajczyk标准数据库图像和 SALSA 偏振相机获取的真实场景图像进行了性能验证。

2 非线性尺度空间的构造

KAZE 特征检测描述算法是利用非线性扩散滤 波来构造非线性尺度空间,扩散方程为^[25]

$$\frac{\partial \boldsymbol{L}}{\partial t} = \operatorname{div}[c(x, y, t) \nabla \boldsymbol{L}], \qquad (1)$$

式中:L 为图像亮度; div 为散度; ∇ 为梯度; t 为时间; c(x, y, t)为图像坐标为(x, y)且时间为 t 处的传导函数值,其表达式为

$$c(x,y,t) = g[\nabla L_{\delta}(x,y,t)], \qquad (2)$$

通常取

$$g = \frac{1}{1 + |\nabla \boldsymbol{L}_{\delta}|^2 / k^2}, \qquad (3)$$

式中: ∇L_s 为图像 L 在 δ 尺度上的梯度值;k 为对比 度因子, 取 ∇L_s 直方图 70%时对应的值^[17]。

由(3)式可知,非线性扩散滤波的传导函数与图 像梯度的平方成反比。在图像边缘区域,梯度值较 大,而传导函数值较小,图像的边缘特征能够得以保 留。传统的 SIFT 和 SURF 算法是通过线性扩散滤 波构建尺度空间,等价于传导函数 c(x,y,t)=1,尺 度空间中图像的边缘被模糊,使图像边缘特征点难 以精确定位。

非线性尺度空间共有 O 组,每组有 S 层,不同 组与层采用序号 o 和 s 标记,则尺度参数代数 关系为

 $\delta_i = \delta_0 \times 2^{o+\frac{s}{S}}, i \in [0, 1, \cdots, N],$

 $o \in [0,1,\dots,O-1], s \in [0,1,\dots,S-1], (4)$ 式中: δ_0 为尺度参数初始值; $N=O \times S$ 为尺度空间 中图像总层数;i为序号。将(1)式采用加性算子分 裂(AOS)算法可以解算为

$$\boldsymbol{L}^{(i+1)} = \left[\boldsymbol{I} - (t_{i+1} - t_i) \sum_{l=1}^{m} \boldsymbol{A}_l (\boldsymbol{L}^{(i)})\right]^{-1} \boldsymbol{L}^{(i)},$$
(5)

式中: **I** 为单位矩阵; t_i 为进化时间, 其表示为 $t_i = \frac{1}{2}\delta_i^2$; **A**_i 为图像的传导矩阵。输入一幅原始图像代入(5)式, 便可得到新一层的尺度图像, 以此构建完成尺度空间图像层。

3 所提算法

3.1 算法的提出

在强边缘区域,图像灰度值变化很大,一阶偏导数 存在局部极值,二阶偏导数过零点,因此,Laplace 算子 可以较好地检测出图像的强边缘特征。但 Laplace 算 子在运算时采用二阶差分,易受到噪声干扰的影响,若 直接用于图像边缘检测,获得的边缘特征不稳定^[26]。 实际上,如果 $G(x,y,\delta)$ 是L(x,y)高斯滤波 δ 尺度上 的图像, $\nabla^2 G \neq L(x,y)$ Laplace 算子操作后的图像,则 可以通过检测 $\delta^2 \nabla^2 G$ 图像得到较为稳定的特征^[13,27], 但其计算过程较为复杂。由 SIFT 算法的工作原理可 知,采用差分高斯近似代替高斯 Laplace 滤波可以提高 算法的效率,且图像与高斯函数卷积的结果等价于各 向同性热传导的解^[22],即

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial t} = D \times \nabla^2 \mathbf{L} =$$
$$D \times \left(\frac{\partial^2 \mathbf{L}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{L}}{\partial y^2}\right) = D \times (\mathbf{L}_{xx} + \mathbf{L}_{yy}), \quad (6)$$

式中:D为常数; $t = 1/2\delta^2$; L_{xx} 和 L_{yy} 为图像L在水平和竖直方向的二阶微分。

ar

由(6)式可知,图像 Laplace 算子操作的结果等 于图像 Hessian 矩阵的迹。因此,采用非线性扩散 滤波构建尺度空间时,如果将常数 D 设定为随着图 像梯度变化的值,就能够在滤波过程中较好地保留 图像的边缘特征。

KAZE 特征检测算法的基本原理是通过在非线 性尺度空间中搜索像素点 Hessian 矩阵行列式的局 部极大值,并将其局部极大值超过设定阈值(默认为 0.001)的像素点设为特征点。图像 L 在尺度 δ 上的 Hessian 矩阵行列式 L_{Hessian} 为

$$L_{\text{Hessian}} = \sigma^2 \begin{vmatrix} L_{xx} & L_{xy} \\ L_{xy} & L_{yy} \end{vmatrix} = \sigma^2 (L_{xx}L_{yy} - L_{xy}^2) = \sigma^2 \alpha \beta, \qquad (7)$$

式中: σ 为 δ 取整后的值; α 和 β 为 Hessian 矩阵的 两个特征值。当图像的某个区域出现线性结构(边 缘、纹理等)时,如果 α 和 β 符号相异^[23-24], L_{Hessian} 小 于 0,则该像素不会被 KAZE 算法判定为特征点,也 就会造成该区域特征丢失。

综上所述,提出新的非线性特征点判别式

$$L_{\rm T} = \sigma^2 \, \frac{(L_{xx} L_{yy} - L_{xy}^2)}{\nabla^2 L} > T \,, \qquad (8)$$

式中:T 为设定的阈值(其值取 0.0025)。当某一像 素点的 L_T 值大于设定的阈值,就将该像素点与其 所在层、上层、下层 3×3 邻域内像素点 Hessian 矩 阵行列式进行比较,若该像素点的 L_{Hessian} 最大则可 确定为特征点。

3.2 理论分析

由矩阵理论知

$$\begin{cases} \alpha + \beta = L_{xx} + L_{yy} \\ \alpha \times \beta = L_{xx} - L^{2}_{xx}, \end{cases}$$
(9)

将(9)式代入(8)式,并进一步推导可得



显然,当图像处于线性结构(边缘、纹理)时, Hessian 矩阵的两个特征值可能会存在以下两种 情况^[28-29]:

1)
$$\alpha > 0, \beta > 0, \exists \beta \gg \alpha, \emptyset$$

$$\begin{cases}
L_{T} = \sigma^{2} \frac{\alpha \beta}{\alpha + \beta} \approx \alpha > 0 \\
L_{\text{Hessian}} = \sigma^{2} \alpha \beta > 0
\end{cases}$$
(11)
(11)
(11)

$$\begin{cases} L_{\rm T} = \sigma^2 \frac{\alpha\beta}{\alpha + \beta} > 0\\ L_{\rm Hessian} = \sigma^2 \alpha\beta < 0 \end{cases}$$
(12)

由前述分析可知,对于第2种情况,KAZE算法 容易因 Hessian 矩阵行列式小于0,而判定该像素 为非特征点,造成边缘特征丢失。但如果利用(8)式 提出的特征点判据,则在此情况下由于L_T大于零 而使该边缘特征得以保留。

4 实验与分析

为验证算法的有效性,将所提算法与AKAZE、 KAZE、SIFT、SURF 算法对点线仿真图像、 Mikolajczyk数据库标准图像和通过SALSA偏振 相机获取的多个场景偏振成像的真实图像进行特征 检测。实验平台硬件为Intel(R)Core(TM)i7-4790 CPU @ 3.60 GHz、8G 内存、64 位操作系统的 Windows7 计算机上处理数据,软件为VS2010及 OpenCV3.0开源计算机视觉库。

4.1 点线仿真图像验证

应用所提算法与AKAZE、KAZE、SIFT、SURF 算法进行仿真对比点和线仿真图像特征点检测,为 了直观表示,采用圆圈进行标记,圆心即为特征点位 置,实验结果如图1所示。



图 1 点线仿真图像 5 种算法的特征检测。(a)(b)所提算法;(c)(d) AKAZE;(e)(f) KAZE;(g)(h) SIFT;(i)(j) SURF Fig. 1 Feature detection of 5 algorithms for simulated point and line images. (a)(b) Proposed algorithm; (c)(d) AKAZE; (e)(f) KAZE; (g)(h) SIFT; (i)(j) SURF

由图1可知:

1)所提算法和 KAZE 算法对点图像能够很好 地检测出特征点,而 AKAZE、SIFT 和 SURF 算法 并不能检测出特征点。

2) 对线型图像来说,所提算法检测的特征点相 对较多,特征点定位相对较准,AKAZE 算法和 KAZE 算法检测的特征点个数相等,SURF 算法虽 然也可以检测出边缘特征点,但却难以精确定位特 征点的位置,SIFT 算法检测的特征点个数较少。

经过分析可知:所提算法和 KAZE 算法均能够 有效地检测出图像的边缘特征点且能精确定位,但 所提算法通过将 Laplace 算子和 Hessian 矩阵行列 式相结合,不仅能够检测出图像的边缘特征点,还可 以检测出角点,相对于 KAZE 算法具有更强的边缘 特征识别能力。AKAZE 算法通过改变尺度空间的 计算方式,加快了计算速度,检测效果与 KAZE 算法相当。SIFT 算法和 SURF 算法利用线性滤波来构建尺度空间,图像边缘和非边缘区域同等扩散,造成图像边缘特征模糊。由于 SIFT 算法对边缘特征 点进行了剔除,所以只检测出了 2 个端点。而尽管 SURF 算法未剔除边缘特征点,但却不能很好地精确定位边缘特征点的位置。

4.2 标准库图像验证

将 Mikolajczyk 数据库中 boat 的第 6 幅图像分 别采用所提算法、AKAZE、KAZE、SIFT、SURF 算 法进行特征检测,效果对比图如图 2 所示。从图中 方框标记的放大图可知,所提算法能够较好地检测 出山与云之间的强边缘及云与云之间的弱边缘,而 其他 4 种算法却难以达到同等的检测效果,也就表 明所提算法的特征点检测能力更强。



图 2 Boat 中第 6 幅图像特征检测。(a) 所提算法;(b) AKAZE;(c) KAZE;(d) SIFT;(e) SURF

Fig. 2 Feature detection of 6th image in Boat. (a) Proposed algorithm; (b) AKAZE; (c) KAZE; (d) SIFT; (e) SURF

4.3 真实场景偏振图像验证

采用 SALSA 偏振相机获取了建筑场景、雾景、 雪景的 0°、45°、90°偏振方位角图像。建筑场景偏振 图像是在天气状况良好的情况下获取的,图像间主 要存在成像时间不同步、成像通道特性不一致所造 成的差异;雾和雪景成像环境复杂,图像对比度较 低,且噪声较大,图像间存在成像通道特性不一致及 复杂环境共同影响所造成的差异。

利用所提算法和 AKAZE、KAZE、SIFT、

SURF算法对 0°、45°、90°偏振方位角图像进行特征检测,对 0°图像检测的总个数统计在表 1 的Total一栏中。采用匹配正确率指标评价算法的性能,将 45°、90°偏振方位角图像分别与 0°偏振方位角图像进行匹配并通过随机采样一致性(RANSAC)算法剔除误匹配。5 种算法对 3 种场景偏振图像及局部放大图像的特征检测结果如图 3 所示,特征检测统计个数及匹配结果如表 1 所示。



图 3 偏振图像特征检测。(a)(f)(k)所提算法;(b)(g)(l) AKAZE;(c)(h)(m) KAZE;(d)(i)(n) SIFT;(e)(j)(o) SURF Fig. 3 Feature detection of polarization images. (a)(f)(k) Proposed algorithm; (b)(g)(l) AKAZE; (c)(h)(m) KAZE; (d)(i)(n) SIFT; (e)(j)(o) SURF

表1 不同偏振方位角下5种算法的特征检测与匹配

Table 1 Feature detection and matching by 5 algorithms under different polarization azimuthal angles

Scene	Algorithm	0°-45°			0°-90°		
		Total	Correction	Correction	Total	Correction	Correction
			number	rate/ %		number	rate / %
Building image	Proposed	4520	3359	74.314	4520	3452	76.372
	AKAZE	1707	1376	80.609	1707	1429	83.714
	KAZE	2016	1533	76.041	2016	1613	80.001
	SIFT	2146	1419	66.123	2146	1356	63.187
	SURF	5191	2619	50.452	5191	2966	57.137
Fog image	Proposed	1137	746	65.611	1137	787	69.217
	AKAZE	3	2	66.666	3	3	100.000
	KAZE	4	3	75.000	4	4	100.00
	SIFT	31	20	64.516	31	20	64.516
	SURF	548	313	57.117	548	327	59.671
Snow image	Proposed	5908	5016	84.902	5908	5044	85.375
	AKAZE	268	226	84.328	268	227	84.701
	KAZE	297	269	90.572	297	254	85.522
	SIFT	1939	1448	74.677	1939	1460	75.296
	SURF	3905	2743	70.243	3905	2727	69.833

由图 3 和表 1 可得以下结论:

1) 对于建筑场景图像,所提算法可以很好地检测出偏振图像强边缘并精确定位,AKAZE 算法和 KAZE 算法能够检测的强边缘特征相对较少,SIFT 算法和 SURF 算法虽然也能检测出部分强边缘特征,但却不能很好地定位边缘特征。

2) 对于雾景图像,所提算法同样可以很好地检测出偏振图像的边缘并精确定位,但AKAZE、 KAZE、SIFT 算法检测基本失效,SURF 算法检测 出的特征点较少且不能精确定位。

3) 对于雪景图像,所提算法可以很好地检测出 塔吊的边缘和角点特征,且定位较为准确,但 AKAZE、KAZE、SIFT 算法却检测不出塔吊的任何 特征。SURF 算法虽然能检测出部分塔吊的边缘和 角点,但特征定位不准确。

4) 尽管所提算法在建筑场景中对特征点的检测总数略少于 SURF 算法,但在其他场景中,特征 点检测和正确匹配的数量却远大于其他4种算法。

综上所述,可知所提算法相对于 AKAZE、 KAZE、SIFT、SURF 算法在边缘和角点特征检测方 面能力更强,即使偏振成像受复杂环境的影响,图像 亮度和对比度显著降低时,所提算法仍然具有较强 的特征检测能力。

5 结 论

由于复杂环境因素及自身成像通道特性不一致

的影响,偏振成像系统易造成不同偏振方位角图像 之间亮度和对比度的降低。为此,提出了一种非线 性偏振图像特征检测算法,其利用非线性扩散滤波 使得边缘特征保留而不被平滑,采用 Hessian 矩阵 与 Laplace 算子比值作为特征判别的依据,可以很 好地检测出图像的强边缘、弱边缘、角点特征。由于 图像强边缘和角点特征受光照、对比度的影响较小, 因此所提算法可以应用于部分复杂环境中偏振图像 的特征检测。

仿真对比与实验结果表明,所提算法对部分复 杂环境成像的偏振图像特征检测能力较强,因此,利 用所提算法可以准确地找出不同偏振方位角图像之 间的对应关系,进而提高偏振图像的配准精度,具有 一定的应用价值。

参考文献

- Wang F, Ainouz S, Lian C F, et al. Multimodality semantic segmentation based on polarization and color images[J]. Neurocomputing, 2017, 253: 193-200.
- [2] Tao Q Q, Sun Y X, Shen F, et al. Active imaging with the aids of polarization retrieve in turbid media system [J]. Optics Communications, 2016, 359: 405-410.
- [3] Bai C X, Li J X, Zhou J Q, et al. Interferometric hyperspectral polarization imaging method based on micro-polarization array [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(1): 0138003.

柏财勋,李建欣,周建强,等.基于微偏振阵列的干涉型高光谱偏振成像方法[J].红外与激光工程,2017,46(1):0138003.

- [4] Tao F, Hong J, Song M X, et al. Geometric calibration data processing and software design of directional polarization [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 091005.
 陶菲,洪津,宋茂新,等. 偏振成像仪几何定标数据处理及软件设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 091005.
- [5] Luo H B, Liu Y D, Lan L J, et al. Key technologies of polarization imaging for division of focal plane polarimeters [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2017,34(1):8-13.
 罗海波,刘燕德,兰乐佳,等. 分焦平面偏振成像关

键技术[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(1): 8-13.

[6] Wu Z F, Zhou S C, He X Q. Experimental study on underwater objects detection based on polarization imaging [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 081101.

吴中芳,周少聪,何贤强.水下物体偏振成像探测的 实验研究[J].激光与光电子学进展,2018,55(8): 081101.

- [7] Chen W L, Li J W, Sun Z Q, et al. Analysis of visible polarization characteristics of typical satellite surface materials [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38 (10): 1026001.
 陈伟力,李军伟,孙仲秋,等.典型卫星表面材料可见光偏振特性分析 [J].光学学报, 2018, 38(10):
- [8] Patel M I, Thakar V K, Shah S K. Image registration of satellite images with varying illumination level using HOG descriptor based SURF [J]. Procedia Computer Science, 2016, 93: 382-388.

1026001.

- [9] Hossein-Nejad Z, Nasri M. An adaptive image registration method based on SIFT features & RANSAC transform [J]. Computers and Electrical Engineering 2017, 62: 524-537.
- Li Z Y, Ai Y P. Study on the multi-core DSP parallel processing of polarization images registration [J]. Advanced Materials Research, 2013, 756/757/758/ 759: 3532-3536.
- [11] Chen B, Sun T Q, Liu A X. Influence of speckle noise on image registration based on feature point matching [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 121103.
 陈波,孙天齐,刘爱新.散斑噪声对基于特征点匹配 的图像配准的影响[J].激光与光电子学进展, 2017,

54(12): 121103.

- [12] Jin J J, Lu W L, Guo X T, et al. Position registration method of simultaneous phase-shifting interferograms based on SURF and RANSAC algorithms[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1012002.
 靳京京,卢文龙,郭小庭,等.基于 SURF 和 RANSAC 算法的同步相移干涉图位置配准方法[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1012002.
- [13] Lowe D G. Distinctive image features from scaleinvariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [14] Boonsivanon K, Meesomboon A. IKDSIFT: an improved keypoint detection algorithm based-on SIFT approach for non-uniform illumination [J]. Procedia Computer Science, 2016, 86: 269-272.
- [15] Zhang X H, Wang X Q, Yuan X X, et al. An improved SIFT algorithm in the application of closerange Stereo image matching [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016, 46: 012009.
- Bay H, Tuytelaars T, van Gool L, et al. SURF: speeded up robust features [M] // Leonardis A, Bischof H, Pinz A. Computer Vision-ECCV 2006. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006, 3951: 404-417.
- [17] Alcantarilla P F, Bartoli A, Davison A J. KAZE features[M] // Fitzgibbon A, Lazebnik S, Perona P, et al. Computer Vision-ECCV 2012. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, 7577: 214-227.
- [18] Mukherjee P, Lall B. Saliency and KAZE features assisted object segmentation [J]. Image and Vision Computing, 2017, 61: 82-97.
- [19] Li D, Zhang M, Tong Z B. Transmission line insulators detection based on KAZE algorithm [J]. Advanced Materials Research, 2014, 936: 2184-2189.
- [20] Wang F B, Chu Z T, Zhu D R, et al. An improved KAZE feature detection and description algorithm
 [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55 (9): 091007.
 汪方斌,储朱涛,朱达荣,等.一种改进的KAZE特征检测描述算法[J].激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 091007.
- [21] Chen K Y, Zou X J, Xiong J T, et al. Fast corner detection algorithm with sub-pixel accuracy imitating Hessian-Laplace [J]. Application Research of Computers, 2014, 31(7): 2195-2200.
 陈科尹, 邹湘军, 熊俊涛, 等. 一种具有亚像素精度

的仿 Hessian-Laplace 快速角点检测算法[J]. 计算机 应用研究, 2014, 31(7): 2195-2200.

- [22] Liu C J, Zou H L, Qian X. Image processing geometric variational and multiscale method [M].
 Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
 柳婵娟, 邹海林, 钱旭. 图像处理的几何变分与多尺 度方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2016.
- [23] Alcantarilla P F, Nuevo J, Bartoli A. Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale space [C] // British Machine Vision Conference 2013 (BMVC), September 9-13, 2013, Bristol. Durham, England, UK: BMVA Press, 2013: 1-13.
- [24] Liang H Q, Fan Y H, Wan H Q, et al. Mosaic algorithm of UAV images based on AKAZE features
 [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2016, 33(1): 71-75.
 梁焕青,范永弘,万惠琼,等.一种运用 AKAZE 特

案與育, 泡水弘, 刀惠琼, 寺. 一种运用 AKAZE 将 征的无人机遥感影像拼接方法[J]. 测绘科学技术学 报, 2016, 33(1): 71-75.

 [25] Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12 (7): 629-639.

- [26] Weickert J. Applications of nonlinear diffusion in image processing and computer vision [J]. Acta Mathematica Universitatis Comenianae, 2001, 70: 33-50.
- [27] Xia Q, Chen Y K, Zhang Z X, et al. Edge extraction algorithm of infrared thermal image based on Laplace operator and gray theory [J]. Infrared Technology, 2014, 36(5): 377-380,388.
 夏清,陈亚凯,张振鑫,等.基于 Laplace 算子和灰 色理论的热红外影像边缘检测[J].红外技术, 2014, 36(5): 377-380,388.
- [28] Li Y M. A edge detection method based on the Hessian matrix[J]. Laser Journal, 2014, 35(5): 27-30, 33.
 李永明. 基于 Hessian 矩阵的边缘检测方法[J]. 激 光杂志, 2014, 35(5): 27-30, 33.
- [29] Frangi A F, Niessen W J, Vincken K L, et al. Multiscale vessel enhancement filtering [M] // Wells
 W M, Colchester A, Delp S. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI' 98. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998, 1496: 130-137.