引文格式：王海涛, 余晓敏, 陆海霞, 等. 无人机遥感影像特征点子像素定位研究[J]. 地理空间信息, 2023, 21(8): 28-32. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.08.007

无人机遥感影像特征点子像素定位研究

王海涛[1]，余晓敏[1*]，陆海霞[2]，吕　婧[1]
（1. 湖北空间规划研究院，湖北 武汉 430071；2. 洪湖市府场镇自然资源和规划所，湖北 洪湖 433299）

摘　要：无人机遥感多使用于小面幅数码相机对地观测，是快速获取地理空间数据的一种重要手段，其三维重建首先需要通过一定数量、分布合理的特征点将离散的影像连接起来，针对无人机遥感影像高精度解算的要求，提出一种将特征点局部响应函数与二次抛物面曲面拟合相结合的特征点子像素定位算法。通过选取多组不同地区无人机遥感影像数据对Moravec、Harris、Forstner、SUSAN、FAST、DoG、Hessian算法的验证表明：特征点精度提高百分比最小的为27.1%，最大为50.2%；对于利用局部响应方式检测关键点的特征提取算法，使用二次抛物曲面拟合来提高特征点定位精度是一种有效的方法，方法具有较强的普适性。

关键词：最小二乘拟合；子像素定位；Harris 响应函数；局部响应函数
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）08-0028-05

Research on Sub-pixel Location of Feature Point for UAV Remote Sensing Image

WANG Haitao[1], YU Xiaomin[1], LU Haixia[2], LYU Jing[1]
(1. Hubei Spatial Planning Research Institute, Wuhan 430071, China;
2. Natural Resources and Planning Institute of Fuchang Town, Honghu City, Honghu 433299, China)

Abstract: In view of the high precision solution of UAV remote sensing image, we proposed a feature point sub-pixel locationalgorithm combining feature point local response function anda paraboloid function. In this paper, we selected four sets of different areas of UAV remote sensing image data to verify Moravec, Harris, Forstner, SUSAN, FAST, DoG and Hessian algorithms.The results show that the percentage improvement of feature point accuracy is 27.1% to 50.2%.The method of using aparaboloid function to fit the local response of the feature point to improve the locationaccuracy of feature points is more effective and versatile.

Key words: least square fitting, sub-pixel location, Harris response function, local response function

无人机遥感多使用小面幅数码相机对地观测，是快速获取地理空间数据的一种重要手段[1]，其三维重建首先需要通过一定数量、分布合理的连接点将离散的影像“连接”起来[2-6]，所以后期处理的首要工作是多视影像间同名点匹配。对于匹配的同名点，从参数解算的可靠性来考虑[3-6]，要求匹配的同名点具有多度重叠且分布均匀，为适应无人机遥感影像间的旋转、色彩差异、仿射变形、尺度差异等，影像匹配方法在David Lowe 提出的 SIFT （scale-invariant feature transform)[8]算法基础上不断改进，形成了基于局部特征不变算子的影像匹配算法[8-19]，这些方法已广泛用于无人机遥感影像匹配[20-24]。不同的特征匹配算法采用不同的特征提取方法（为适应实时处理的需要，特征点提取算法不断被改进，Rosten 提出 FAST[25-26]算法是公认的比较快速的特征点检测方法），表 1 为在 SIFT 算法基础上发展的特征不变匹配算法的特征提取方法汇总。

表 1　局部特征不变算子的特征点提取方法汇总

序号	匹配算法	特征提取方法	序号	匹配算法	特征提取方法
1	SIFT[8]	DoG(Difference of Gaussian)	7	LIOP[14]	Harris[30]/Hessian
2	PAC-SIFT[9]	DoG	8	BRIEF[15]	FAST/Harris[30]
3	ASIFT[10]	DoG	9	BRISK[16]	FAST[24-25]
4	CSIFT[11]	DoG	10	ORB[17]	FAST
5	SURF[12]	Hessian	11	FREAK[18]	FAST
6	Harris-Laplace[13]	Harris[30]	12	KAZE[19]	FAST

对于匹配的同名点，从参数解算的精度来考虑[3,7]，需要对特征点精确定位[27-29]。不同的特征提取算法采用不同的子像素定位方式，如 SIFT[8]算法采用 DoG 方法提取斑点，使用泰勒级数的方法对特征点子像素定位；SURF[12]算法采用 Hessian 矩阵提取特征点，同 SIFT 算法一样采用泰勒级数的方法对特征点子像素定位；Harris 算法提取特征的特征点，朱庆[27]等和肖雄武[28]等提出的二次抛物面局部拟合的方法精确定位，

收稿日期：2023-03-03；修回日期：2023-05-18。
项目来源：湖北省自然资源厅2023年度科技项目（ZRZY2023KJ26）。
第一作者简介：王海涛（1976—），硕士，正高级工程师，研究方向为实景三维、自然资源信息化，E-mail：306550757@qq.com。
通信作者：余晓敏（1982—），博士，高级工程师，研究方向为遥感智能化、空间信息化应用，E-mail：37952574@qq.com。

该方法通过二次抛物面局部拟合Harris的响应函数$R(x,y)$的方式实现；Forstner[33-35]算法提取的特征点，郭丙轩[29]等提出利用像素间的梯度及方向，采用最小二乘方法对提取的角点及圆点进行子像素定位。特征点提取算法多采用局部响应（设其局响应函数为$F(x,y)$）的方式提取关键点，表1中的特征点提取算法均采用该方式，受朱庆[27]等和肖雄武[28]等采用二次抛物面局部拟合Harris的响应函数$R(x,y)$的方法启发，本文将二次抛物面局部拟合特征点响应函数$F(x,y)$来精确定位特征点。除表1分析的特征点提取方法，传统的遥感影像使用的经典的特征提取算法还有Moravec[31-32]、Forstner[33-35]、SUSAN[36]等。为验证本文算法的普适性，对Moravec、Harris、Forstner、FAST（FAST-12、FAST-11、FAST-10、FAST-9）、SUSAN、DoG、Hessian算法采用多组不同地区的无人机遥感影像开展验证，实验表明本文的子像素定位算法具有较强的通用性。

1　特征提取分析

本文研究无人机遥感影像特征点子像素定位方法，下面介绍不同特征点提取算法的基本原理（概要描述见表2），这些算法从像素间的关系可分为通过像素间一阶差分（如Moravec、Harris、Forstner、SUSAN、FAST）和二阶差分（如DoG、Hessian）来实现，从特征提取的方式来看，这些算法采用局部特征响应的方式检测关键点（见表3）。为验证本文算法的普适性，在后续的实验中对这些特征点提取算法采用不同地区的无人机遥感影像数据逐一开展验证。

表2　不同特征点提取算法的基本原理

序号	算法	基本原理	像素间关系	局部特性
1	Moravec	以像素点为中心，在一个的方形窗口，计算0°、45°、90°、135°4个方向灰度差的平方和	利用像素间一阶差分信息	利用像素局部响应来构造局部响应函数的方式检测关键点
2	Harris	图像$I(x,y)$向任意方向移动较小的平移$(\Delta x,\Delta y)$后自相关函数$E(x,y;\Delta x,\Delta y)$，该算法是Moravec的改进		
3	Forstner	通过计算个像素的Robert梯度和以像素为中心的一个窗口（如5×5）的灰度协方差矩阵		
4	SUSAN	比较圆形模板中心像素与模板内其他像素的差值		
5	FAST	比较像素与其周围一圈的像素的差值，该方法在SUSAN算法基础上发展的方法		
6	DoG	LoG算子的近似方法，通过高斯差分影像检测边缘，再检测极值点（斑点）	利用像素间二阶差分信息	
7	Hessian	根据影像二阶差分检测图像的凹凸性来检测极值点（斑点）		

表3　不同特征点提取算法角点响应分析及角点特征判别分析

序号	算法	局部角点特征响应函数	角点特征选取
1	Moravec	$E(x,y)=\sum_{u,v}w(u,v)\lvert I(x+u,y+v)-I(u,v)\rvert^2$	$\max_{W(x,y)}[\min(E_i(x,y))]$
2	Harris	$R(x,y)=\mathrm{Det}(M)-k\bullet\mathrm{tr}^2(M)$	根据$R(x,y)$设定阈值
3	Forstner	$w=\frac{1}{\mathrm{tr}\,Q}=\frac{\mathrm{Det}(N)}{\mathrm{tr}(N)}$，$q=\frac{4\mathrm{Det}(N)}{(\mathrm{tr}(N))^2}$	根据w，q设定的阈值
4	SUSAN	$n(r_0)=\sum_r c(r,r_0)$	$R(r_0)=\begin{cases}g-n(r_0) & if\ n(r_0)<g\\0 & \text{otherwise}\end{cases}$
5	FAST	$\lvert I_x-I_p\rvert-t$	$\max\left(\sum_{x\in b}\lvert I_x-I_p\rvert-t,\sum_{x\in d}\lvert I_p-I_x\rvert-t\right)$
6	DoG	不同尺度的高斯差分函数	一个点如果在DoG尺度空间本层以及上下两层的26个领域像素中是最大或最小值判别
7	Hessian	$\mathrm{Det}(H_D(I,\sigma))=I(\sigma)_{xx}I(\sigma)_{yy}-I(\sigma)_{xy}I(\sigma)_{xy}$	依据$\mathrm{Det}(H_D(I,\sigma))$设定阈值

2　子像素定位分析

2.1　子像素定位算法

SIFT[8]算法对关键点（特征点）精确定位采用泰勒级数的方式，即对DoG函数在尺度空间进行泰勒（Taylor）展开（式10，其中$X=(x,y,\sigma)^T$），则关键点在尺度空间的精确定位为（式1-2）。

$$D(X)=D+\frac{\partial D^{\mathrm{T}}}{\partial X}X+\frac{1}{2}X^{\mathrm{T}}\frac{\partial^2 D}{\partial X^2}X \tag{1}$$

$$\hat{X}=-\frac{\partial^2 D}{\partial X^2}\bullet\frac{\partial D^{\mathrm{T}}}{\partial X} \tag{2}$$

朱庆[27]等提出使用二次抛物面函数局部拟合Harris响应函数$R(x,y)$的方法（式3）对特征点进行子像素定位，二次抛物面函数系数a_i采用最小二乘的方式计算。

$$R(x,y)=a_0x^2+a_1y^2+a_2xy+a_3x+a_4y+a_5,\quad P=e^{-\frac{d(x,y)^2}{k^2}} \tag{3}$$

式中，P为各像素的权重，$d(x,y)$为像素到特征点

的距离，k为常数（文献中建议取0.2）。

由式（3）可知子像素定位为：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial R(x,y)}{\partial x}=2a_0x+a_2y+a_3=0\\ \dfrac{\partial R(x,y)}{\partial y}=2a_1y+a_2x+a_4=0\end{cases}\tag{4}$$

肖雄武[28]等提出利用二阶泰勒级数（式5）方式拟合Harris的响应函数 $R(x,y)$ 的方法对特征点进行子像素定位，与SIFT算法不同的是，对系数 R_x、R_y、R_{xx}、R_{xy}、R_{yy} 使用有限差分方式计算初值，再使用采用最小二乘的方式精确计算，权值同式（3）的方法。

$$R(x+\Delta x,y+\Delta y)\approx R(x,y)+\frac{\partial R}{\partial x}\Delta x+\frac{\partial R}{\partial y}\Delta y+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2 R}{\partial^2 x}\Delta x^2+2\frac{\partial R}{\partial x}\times\frac{\partial R}{\partial y}\Delta x\times\Delta y+\frac{\partial^2 R}{\partial^2 y}\Delta y^2\right)$$

$$R(x+\Delta x,y+\Delta y)\approx R(x,y)+R_x\Delta x-R_y\Delta y+\frac{1}{2}\left(R_{xx}\Delta x^2+2R_{xy}\Delta x\times\Delta y+R_{yy}\Delta y^2\right)$$

$$R(x+\Delta x,y+\Delta y)\approx R(x,y)+a\Delta x+b\Delta y+\frac{1}{2}\left(c\Delta x^2+2d\Delta x\times\Delta y+e\Delta y^2\right)\tag{5}$$

由式（3）可知子像素定位为：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial R(x+\Delta x,y+\Delta y)}{\partial x}=a+c\Delta x+d\Delta y=0\\ \dfrac{\partial R(x+\Delta x,y+\Delta y)}{\partial y}=b+d\Delta x+e\Delta y=0\end{cases}\tag{6}$$

对式（3）进行变换得：

$$R(x,y)=a_0x^2+a_1y^2+a_2xy+a_3x+a_4y+a_5=\frac{1}{2}\left(b_0x^2+b_1y^2+2b_3xy\right)+b_3x+b_4y+b_5\tag{7}$$

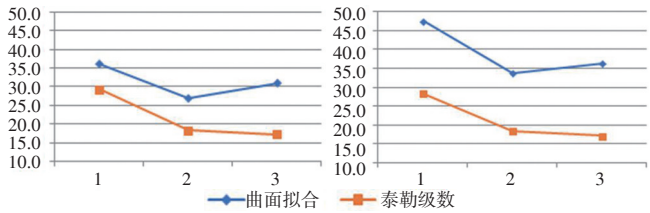
SIFT算法和肖雄武对特征点子像素定位都采用二阶泰勒级数，但是肖雄武提出的方法对泰勒级数的系数采用最小二乘的方法修正。由式（5）和式（7）可知，朱庆[27]等和肖雄武[28]等对Harris的响应函数 $R(x,y)$ 采用的方法本质是用二次抛物面局部拟合的方式进行子像素定位。接下来选取3组不同地区无人机遥感影像数据验证式（2）和式（3）的特征点子像素定位精度（精度评定方式：采用物方三维点坐标反投影到像方计算像点的残差的中误差的方式评估），表4为式（2）和式（3）对Harris算法的子像素定位分析（图1a为实验结果的图形显示），表5为式（2）和式（3）对DoG特征提取算法子像素定位分析（图1b为实验结果的图形显示）。实验表明，二次抛物面局部拟合特征点局部响应函数的方法比泰勒级数的方法具有更好的子像素定位精度。

表4 泰勒级数与抛物面拟合子像素定位精度分析（Harris）/μm

方法	第一组数据			第二组数据			第三组数据		
	直接提取	精确定位	提高比/%	直接提取	精确定位	提高比/%	直接提取	精确定位	提高比/%
抛物面拟合	4.44	2.83	36.2	3.92	2.85	27.1	3.47	2.39	31.1
泰勒级数		3.14	29.3		3.20	18.3		2.87	17.3

表5 泰勒级数与抛物面拟合子像素定位精度分析（DoG）/μm

方法	第一组数据			第二组数据			第三组数据		
	直接提取	精确定位	提高比/%	直接提取	精确定位	提高比/%	直接提取	精确定位	提高比/%
抛物面拟合	4.33	2.27	47.6	3.76	2.49	33.8	3.34	2.12	36.4
泰勒级数		3.10	28.4		3.07	18.4		2.76	17.2



a 结果图形显示（Harris） b 结果图形显示（DoG）

图1 泰勒级数与抛物面拟合子像素定位精度分析

（横坐标：实验数据组号；纵坐标：精度提高百分比）

2.2 特征响应分析

由第1节分析可知，Moravec、Harris、Forstner、SUSAN、FAST、DoG、Hessian算法均采用局部响应函数的方式提取关键点，表6为上述算法的特征点局部响应函数的汇总。由2.1节分析可知，二次抛物面拟合特征点局部响应函数的方法是一种有效的特征点子像素定位方法，设特征点的局部响应函数为 $F(x,y)$，则对于不同特征点二次抛物面局部拟合公变为式（8）。

$$F(x,y)=a_0x^2+a_1y^2+a_2xy+a_3x+a_4y+a_5\tag{8}$$

表6 不同特征点提取算法的局部特征相应分析

序号	算法	特征相应分析	局部响应函数 $F(x,y)$ 计算公式
1	Moravec	$E_i(x,y)$（不同方向的兴趣值）	$F(x,y)=\max_{W(x,y)}[\min(E_i(x,y))]$
2	Harris	$R(x,y)$	$F(x,y)=\mathrm{Det}(M)-k\times\mathrm{tr}^2(M)$
3	Forstner	w	$F(x,y)=\dfrac{Det(N)}{\mathrm{tr}(N)}$
4	Susan	$n(r_0)$	$F(x,y)=\sum_r c(r,r_0)$
5	FAST	V	$F(x,y)=\max\left(\sum_{x\in b}\lvert I_x-I_p\rvert-t,\sum_{x\in d}\lvert I_p-I_x\rvert-t\right)$
6	DoG	不同尺度的高斯差分函数	$F(x,y)=\mathrm{DoG}$
7	Hessian	$\mathrm{Det}(H_D(I,\sigma))$	$F(x,y)=I(\sigma)_{xx}I(\sigma)_{yy}-I(\sigma)_{xy}I(\sigma)_{xy}$

3 实验与分析

为进一步验证二次抛物面拟合特征点局部响应函

数 $F(x,y)$ 来提高特征点定位精度的有效性和普适性，本节选取4组不同地区（依次为高山地、山地、丘陵、平原）的无人机遥感影像数据来验证式（8）对不同特征点提取算法（第2节的特征提取算法）的子像素定位精度，表7、8、9和图2为实验结果统计分析（精度评定方式与3.1节的方式相同）。

表7　子像素定位精度分析/μm

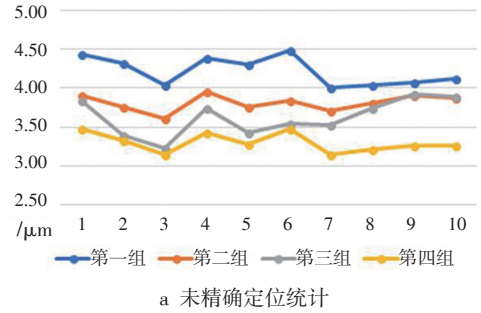
方法	第一组实验数据				方法	第二组实验数据			
	直接提取	精确定位	提高精度	提高比/%		直接提取	精确定位	提高精度	提高比/%
Harris	4.44	2.83	1.61	36.2	Harris	3.92	2.85	1.06	27.1
DoG	4.33	2.27	2.06	47.6	DoG	3.76	2.49	1.27	33.8
Hessian	4.10	2.04	2.06	50.2	Hessian	3.60	2.33	1.28	35.4
Moravec	4.39	2.65	1.74	39.7	Moravec	3.96	2.89	1.07	27.1
Forsnter	4.31	2.56	1.75	40.6	Forsnter	3.75	2.64	1.11	29.6
Susan	4.49	2.69	1.79	40.0	Susan	3.84	2.73	1.11	28.9
FAST12	4.00	2.14	1.86	46.5	FAST12	3.71	2.53	1.18	31.7
FAST11	4.05	2.23	1.82	44.9	FAST11	3.81	2.69	1.12	29.4
FAST10	4.08	2.24	1.84	45.1	FAST10	3.90	2.72	1.18	30.2
FAST9	4.12	2.18	1.94	47.1	FAST9	3.88	2.64	1.24	32.0

表8　子像素定位精度分析/μm

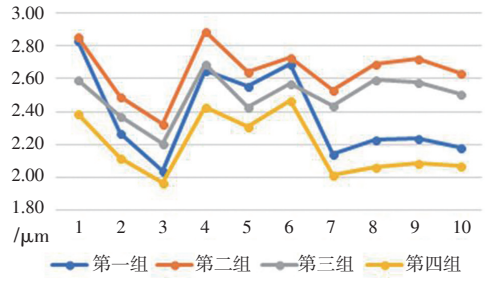
方法	第三组实验数据				方法	第四组实验数据			
	直接提取	精确定位	提高精度	提高比/%		直接提取	精确定位	提高精度	提高比/%
Harris	3.84	2.60	1.25	32.4	Harris	3.47	2.39	1.08	31.1
DoG	3.39	2.37	1.02	30.0	DoG	3.34	2.12	1.22	36.4
Hessian	3.23	2.20	1.03	31.9	Hessian	3.15	1.97	1.18	37.5
Moravec	3.75	2.69	1.06	28.3	Moravec	3.42	2.43	1.00	29.1
Forsnter	3.42	2.43	1.00	29.1	Forsnter	3.27	2.31	0.96	29.3
Susan	3.55	2.57	0.98	27.5	Susan	3.48	2.47	1.01	29.1
FAST12	3.52	2.43	1.09	30.9	FAST12	3.15	2.01	1.13	36.0
FAST11	3.74	2.60	1.14	30.6	FAST11	3.20	2.06	1.14	35.7
FAST10	3.92	2.58	1.34	34.1	FAST10	3.25	2.08	1.17	36.0
FAST9	3.90	2.51	1.39	35.8	FAST9	3.27	2.07	1.20	36.6

表9　不同特征提取方法精度提高比统计表

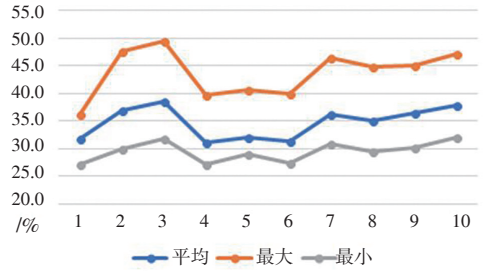
算法	精度提高比/%			算法	精度提高比/%		
	最小	最大	平均		最小	最大	平均
Harris	27.1	36.2	31.7	Susan	27.5	40.0	31.4
DoG	30.0	47.6	37.0	FAST12	30.9	46.5	36.3
Hessian	31.9	50.2	38.6	FAST11	29.4	44.9	35.1
Moravec	27.1	39.7	31.0	FAST10	30.2	45.1	36.4
Forsnter	29.1	40.6	32.1	FAST9	32.0	47.1	37.9



a 未精确定位统计



b 子像素定位统计



c 子像素定位提高比

图2　不同特征提取方法精度定位分析图

（横坐标：特征提取算法序号）

多组实验结果表明：①特征点精度提高百分比最小为27.1%，最大为50.2%；②不同的特征点提取算法都取得很好的子像素定位精度；③不用类型地区的影像都取得较好的精度提升，本文的特征点子像素定位方法具有较强的通用性；④Hessian算法提取的特征点具有更高的定位精度，二次抛物面拟合方法用于该特征点提取算法具有更好的子像素定位精度。

本文分析的特征点检测方法均采用特征点局部响应函数来实现（见表6），即通过特征点局部响应的极大或极小来判断是否为特征点，本节的实验结果表明，对此类特征点检测方法可采用二次抛物面拟合特征点局部响应函数 $F(x,y)$ 的方式提高特征点的定位精度，适用于无人机遥感影像高精度参数解算。

参考文献

[1] 李德仁,李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2014,39(5):505-513

[2] 张祖勋. 数字摄影测量与计算机视觉[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2004,29(12):1 035-1 039

[3] 张力,刘玉轩,孙洋杰,等. 数字航空摄影三维重建理论与技术发展综述[J]. 测绘学报,2022,51(7):1 437-1 457

[4] 薛武,张永生,赵玲,等. 增量式SFM与POS辅助光束法平差精度比较[J]. 测绘学报,2017,46(2):198-207

[5] 姜三,江万寿,郭丙轩. 词汇树索引约束的无人机影像快速特征匹配算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,DOI:10. 13203/j. whugis20220033(优先出版)

[6] 张永显,马国锐,崔志祥,等. 面向大视角差的无人机影像序

列学习型特征匹配[J]. 测绘学报,2023,52(2):230-243

[7] 李德仁,袁修孝. 误误差处理与可靠性理论(第二版)[M]. 武汉:武汉大学出版社,2012

[8] Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints[J]. Internation Journal of Computer Vision (S0920-5691),2004,60(2):91-110

[9] Ke Y, Sukthankar R. PCA-SIFT:A More Distinctive Representation for Local Image Descriptors[C]//Proc. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition,2004:511-517

[10] Morel J M, Yu G. ASIFT: A New Framework for Fully Affine Invariant Image Comparison[J]. Siam Journal on Imaging Sciences,2009,2(2):438-469

[11] Abdel-hakim A E, Farag A A. CSIFT: A Sift Descriptor with Color Invariant Characteristics[C]//2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2006),New York,NY,USA,2006:17-22

[12] Herbert B, Andreas E. Tinne Tuytelaars Luc Van Gool SURF: Speeded Up Robust Features[J]. Computer Vision and Image Understanding (CVIU),2008,110(3):346-359

[13] Mikolajczyk K, Schmid C. Scale & Affine Invariant Interest Point Detectors[J]. International Journal of Computer Vision,2004,60(1):63-86

[14] Wang Z H, Fan B, Wu F C. Local Intensity Order Pattern for Feature Description[C]//International Conference on Computer Vision, Barcelona, Spain, November 6-13, 2011: 603-610

[15] Calonder M, Leptit V, Strecha C. Brief: Binary Robust Independent Elementary Features[C]//Proc. of European Conference on Computer Vision,2010:778-792

[16] Leutenegger S, Chi M, Siegwart R. Brisk: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints[C]//Proc. of International Conference on Computer Vision,2011:2 548-2 555

[17] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, et al. ORB: An Efficient Alternative to Sift or Surf[C]//Proc. of International Conference on Computer Vision,2011:2 546-2 571

[18] Alahi A, Ortiz R, Vandgergheynst P. Freak: Fast Retina keypoint[C]//Computer Vision and Pattern Recognition, 2011: 510-517

[19] Pablo F A. Kaze Feature[C]//Toshiba Research Europe. Firenze: Eccv,2012

[20] 张岩,李建增,李德良,等. 无人机侦察视频超分辨率重建方法[J]. 中国图象图形学报,2016 ,21 (7) :967-976

[21] 于英,张永生,薛武,等. 影像连接点均衡化高精度自动提取[J]. 测绘学报,2017,46(1):90-97

[22] 胡同喜,牛雪峰,谭洋,等. 基于SURF算法的无人机遥感影像拼接技术[J]. 测绘通报,2015(1):55-58

[23] 梁焕青,谢意,付四洲. 颜色不变量与AKAZE特征相结合的无人机影像匹配算法[J]. 测绘学报,2017,46(7):900-909

[24] Tsai C H, Lin Y C. An Accelerated Image Matching Technique for UAV Orthoimage Registration[C]//Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing,2017,128:130-145

[25] Edward R, Tom D. "Machine Learning for High Speed Corner Detection"[C]//9th European Conference on Computer Vision,2006:430-443

[26] Edward R, Reid P, Tom D. "Faster and Better: A Machine Learning Approach to Corner Detection"[J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010(32): 105-119

[27] Zhu Q, Wu B, Wang N. A Sub-pixel Localtion Method for Interest Points by Means of the Harris Interest Strength[J]. The Photogrammetric Record,2007,22(120):321-335

[28] 肖雄武,郭丙轩,潘飞,等. 利用泰勒展开的点特征子像素定位方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2014,39(10): 1 231-1 235

[29] 郭丙轩,罗光光,肖雄武,等. Forstner特征点分类和精确定位方法探讨[J]. 科学技术与工程,2016,16(16):73-78

[30] Harris C J, Stephens M. A Combined Corner and Edge Detector[C]//The 4th Alvey Vision Conference, Manchester, United Kingdom,1988

[31] Moravec H P. Towards Automatic Visual Obstacle Avoidance[C]//Proceedings of the 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence,Massachusetts,1977

[32] Moravec H. Obstacle Avoidance and Navigation In The Real World by a Seeing Robot Rover[R]. Tech Report CMU-RI-TR-3. United States of America:Carnegie-Mellon University, Robotics Institute, 1980

[33] Forstner W. Gulch E. A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners and Circular Feature[C]//Proceedings of the Inter-commission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interalken, 1978

[34] Forstner W. Framework for Low Level Feature Extraction[C]//Proceedings of the 3rd European Conference on Computer Vision,Stockholm,1994

[35] Dickscheid T, Forstner W. Evaluating the Suitability of Feature Detectors for Automatic Image Orientation Systems[C]//Proceedings of 7th International Conference on Computer Vision Systems,Liege ,Belgium,2009

[36] Smith S M, Brady J M. Susan: A New Approach to Low Level Image Processing. International Journal of Computer Vision,2015,23(1):45-78