

文章编号 1004-924X(2016)11-2830-11

## 采用显著性分析与改进边缘方向直方图特征的 红外与可见光图像配准

徐 军<sup>1\*</sup>, 付天宇<sup>2</sup>, 杨 健<sup>2</sup>, 丰 苏<sup>3</sup>

- (1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079;
2. 北京市混合现实与新型显示工程技术研究中心 北京理工大学 光电学院, 北京 100081;
3. 国家质量监督检验检疫总局 信息中心, 北京 100088)

**摘要:** 为了实现红外图像与可见光图像的信息融合, 弥补单一模态图像的不足, 提出了一种基于显著性分析与改进的边缘方向直方图 EOH(Edge Orientation Histogram)特征的红外与可见光图像配准算法。该算法首先利用显著性分析技术找到可见光图像中的重要信息, 得到显著性图; 将其与可见光图像融合, 实现可见光图像中重要信息的划分。然后, 利用自适应 FAST(Features from Accelerated Segment Test)算法, 探测可见光与红外图像上的特征点; 利用改进的 EOH, 描述特征点。最后, 根据描述计算特征点的相似性, 在可见光与红外图像上找出对应的特征点, 实现红外与可见光图像的匹配。在 3 种不同情况下对红外与可见光图像数据进行了配准实验。结果表明: 在红外图像与可见光图像采集条件相似情况下, 特征点正确匹配率为 96.55%, 而在图像采集条件差异较大的情况下, 特征点正确匹配率可达 74.21%。该算法可实现红外与可见光图像的精确快速匹配, 即使红外图像与可见光图像采集的角度与位置均存在较大差异的情况下, 仍可以满足红外与可见光图像匹配对精度和稳定性的要求。

**关键词:** 图像配准; 红外图像; 可见光图像; 显著性分析; 自适应特征点提取; 边缘方向直方图; 特征描述

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162411.2830

## Registration of infrared image and visible image based on saliency and EOH feature analysis

XU Jun<sup>1\*</sup>, FU Tian-yu<sup>2</sup>, YANG Jian<sup>2</sup>, FENG Su<sup>3</sup>

- (1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. Beijing Engineering Research Center of Mixed Reality and Advanced Display, School of Optics and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. Information Center, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC, Beijing 100088, China)

\* Corresponding author, E-mail: junxu70@163.com

**Abstract:** To realize the information fusion of infrared and visible images and make up the deficiency of the single modality image, a new algorithm based on saliency and Edge Orientation Histogram (EOH) features was proposed. Firstly, the saliency analysis was used to find the important information of the

收稿日期: 2016-07-15; 修订日期: 2016-09-07.

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (No. 2015M580962)

visible image and to obtain the saliency map. By fusing it with the visible image, the important information in the visible image was divided. Then, adaptive Features from Accelerated Segment Test (FAST) algorithm was employed in detecting feature points on the visible image and infrared image, and the improved EOH was used to describe the detected feature points. Finally, corresponding feature points were found by calculating the similarity of feature points in the visible and infrared images and the infrared and visible images were matched. An image matching experiments at three conditions were carried out, and the results indicate that when the collection conditions between the infrared and visible images are similar, the feature matching accuracy reaches 96.55%. When the difference of collection conditions between the infrared and visible images is large, the feature matching accuracy still can reach 74.21%. The algorithm realizes fast and accurate matching of infrared and visible images, and meets the requirements of image matching for accuracy and stability, especially under a collection condition that the infrared and visible images are bigger different.

**Key words:** image fusion; infrared image; visible image; saliency analysis; adaptive Features from Accelerated Segment Test (FAST); Edge Orientation Histogram (EOH); feature point descriptor

## 1 引 言

可见光传感器的工作波长大致位于 400~760 nm,红外传感器的工作波长位于 760 nm~1 mm。可见光图像主要反映了拍摄场景内物体的物理位置信息,其存在感兴趣区域不突出等缺点;而红外图像则主要反映了物体的热量信息,其存在成像质量低等问题<sup>[1-3]</sup>。图像配准技术是通过提取红外图像与可见光图像上的特征点,将处于不同光谱图像的对应特征点进行匹配,实现多源信息的融合<sup>[4-6]</sup>,在国土资源调查、军事侦察等领域有着广泛的应用<sup>[7-8]</sup>。

对于红外图像与可见光图像的配准,主要流程包括<sup>[9]</sup>:特征点提取,特征点描述以及特征点匹配。由于待配准图像所处的波段不同,所以对同一物体的成像结果也不同,导致利用 SIFT(Scale-Invariant Feature Transform)等角点检测器提取的特征点质量较差<sup>[10]</sup>,而且不同点的特征描述区分度较低,无法满足多源图像精确配准的需求<sup>[11]</sup>。为了解决 SIFT 在红外与可见光图像匹配中存在的问题,李健等人<sup>[12]</sup>通过先选择适当的阈值对红外与可见光图像进行二值化处理,然后利用 SIFT 提取图像特征,从而改善了红外图像信噪比低,纹理较弱造成的匹配率低的现象。但是当红外图像包含复杂信息时,无法确定出合适的阈值对图像进行二值化。为了提高特征描述区分度,Yi. Z. 等人<sup>[13]</sup>提出了有尺度限制条件的 SIFT 匹配算法 SRSIFT。他们通过设定尺度范围,滤除已匹配的

超出尺度范围的特征点对,以减少在多源图像配准情况下,由 SIFT 特征描述偏差引起的误匹配率。但是当可见光图像与远红外图像配准时,由于图像间所处的波段差异较大,尺度限制条件失效,导致匹配效果较差。Huang 等人<sup>[14]</sup>提出 RNGM(Registration based on NSCT and Gradient Mirroring)算法,其利用非下采样 Contourlet 变换(Nonsub-Sampled Contourlet Transform, NSCT)增强图像中物体的结构信息,同时保证结构信息在多源图像中具有不变性。因此,在 NSCT 图像上,利用 SIFT 可以提取到更多的特征点,此外,他利用 GM(Gradient Mirroring)计算特征方向,以改善 SIFT 特征方向只受灰度差异影响等问题,提高了特征描述区分度,实现了红外图像与可见光图像精确匹配。但是,当匹配图像纹理较弱时,特征点的匹配精度则降低。通过研究现有算法,本文提出了一种基于显著性分析与改进的 EOH(Edge Orientation Histogram)特征的红外可见光图像配准算法,实现红外可见光图像精确匹配。并通过实验验证了算法性能。

## 2 配准流程

本文所提出的匹配算法流程如图 1 所示。首先,对可见光图像进行显著性分析,对表达丰富信息的区域进行识别。然后,利用显著性结果,对可见光图像进行感兴趣区域与非感兴趣区域的划分。其次,在不同区域上,通过自动设置相应的参数,利用 FAST(Features from Accelerated Segment Test)

特征点检测算法,快速提取可见光图像与红外图像的特征点。之后,基于特征点与感兴趣区域与非感兴趣区域的位置关系,提出改进的 EOH 特征描述算子对特征点进行描述,使特征点之间区分度增大。最后,利用归一化的互信息以及相对位置约束条件,对两图像上的特征点进行匹配,同时利用随机一致性(RANSAC)对匹配的特征点进行筛查,剔除误匹配点,实现红外与可见光图像的最优匹配。

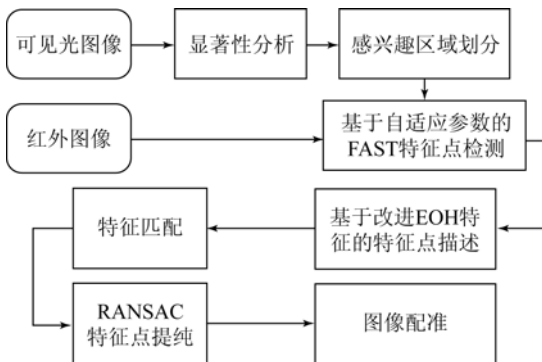


图1 红外与可见光图像匹配流程图

Fig. 1 Flowchart of registration between infrared and visible images

### 3 显著性分析与感兴趣区域划分

图像的显著性体现了人们对图像不同位置的关注度。对于一幅图像,其中最重要的信息通常集中于局部关键区域,即感兴趣区域 ROI(Region of interest),而背景则通常处于非感兴趣区域 NROI。通过显著性分析,可以识别出图像的关键区域,在该区域内采用与其它区域不同的特征点提取方法,不仅可以增加 ROI 周围特征点的数量,提高匹配精度,同时还可以减小搜索区域,提高特征点匹配速度。

基于上下文感知的显著性探测算法<sup>[15]</sup>,是利用心理学准则,来识别图像中感兴趣区域的,同时可以保留感兴趣区域周围重要的背景信息。该方法首先定义单一尺度以及局部-全局显著性,综合像素点之间的位置,颜色(灰度)以及局部-全局差异,将边界以及物体特点区域凸显出来,获得图像的初始显著图。然后利用多尺度方法增强图像的初始显著性图,同时减弱纹理单一的背景区域的显著性,提高显著性与非显著性区域对比度,得到图像增强后的显著图。其次,提取增强后显著图中显著性较强的区域作为感兴趣区域,而周围的像素则根据与该区域的距离被赋予不同的权重,

将权重与像素点的显著值相乘,提高感兴趣区域周围重要背景区域的显著性,同时减小远离感兴趣区域像素的显著性,使图像中上下文信息得到传递,从而获得修正后的图像显著性图  $S$ , 点  $(x, y)$  处的显著性  $S_{x,y}$  计算公式如下:

$$S_{x,y} = \left( \frac{1}{M} \sum_{r \in R} S_{x,y}^r \right) \cdot (1 - d_{\text{foci}}(x, y)), \quad (1)$$

$$S_{x,y}^r = 1 - \exp \left[ - \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K d(p^r, q_k^k) \right], \quad (2)$$

其中:  $M$  表示使用的尺度个数,  $R$  表示尺度大小的集合,  $d_{\text{foci}}(x, y)$  表示点  $(x, y)$  与最近增强后显著图感兴趣区域的归一化距离,  $K$  为设定的与以点  $(x, y)$  为中心的子块  $p^r$  (尺度为  $r$ ) 最相似的子块  $q_k^k$  (尺度为  $r_k$ ) 个数,  $d(p^r, q_k^k)$  为子块间的差异度。最后,对显著图进行后处理,识别增强图像中的感兴趣区域,得到最终的图像显著性图,最终的显著图中,像素值介于 0 到 1 之间,其值且越大表示该点的显著性越大。

红外与可见光图像匹配阶段,利用可见光图像的显著性图,识别感兴趣区域 (Region of Interest, ROI), 在该区域与其它区域采用不同的方法选取特征点,可以实现多光谱图像的快速精确匹配。



(a) 可见光图像

(a) Visible image



(b) 可见光图像显著性分析结果

(b) Result of saliency analysis for visible image

图2 可见光图像及其显著性分析结果

Fig. 2 Visible image and its saliency analysis result

图 2 展示了可见光图像的显著性分析结果,其中(a)为可见光图像,(b)为可见光图像对应的显著性图。在图 2(a)中,房屋与道路的显著性较高,而纹理单一的土地的显著性较低。对于显著图,通过设定阈值,将图像划分为感兴趣区域(ROI)与非感兴趣区域(NROI),即像素值大于阈值的区域为 ROI 区域,像素值小于阈值的区域为 NROI 区域,且通常选择 0.5 作为阈值。但是,如果可见光图像中部分显著性较大的区域并不在红外图像中,那么在那些区域内筛选特征点,将会影响匹配精度。所以如果一幅图像中存在多个 ROI,则需要将它们与 NROI 的相对位置关系加入特征描述,用于匹配过程中误匹配点的滤除。

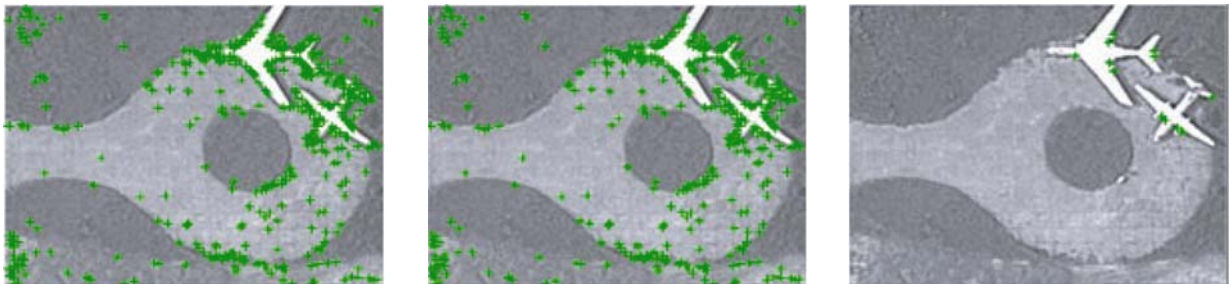
#### 4 自适应 FAST 特征点检测

FAST 是一种快速特征点检测算法,该方法只利用待选像素点与周围像素的比较信息判断该点是否为特征点。具体通过检测统计待选特征点

周围的像素值,如果候选点邻域内有足够多的点与该候选点的灰度值的差异超过设定阈值,则判断该待选点为特征点。在实际计算过程中,对于图像 I,一般通过设置最小对比率确定阈值,其公式如下:

$$Threshold = MC * \max(I(x, y)), \quad (3)$$

其中:  $Threshold$  为滤出特征点的阈值,  $MC$  为最小对比率,大小介于 0~1 之间,  $\max(I(x, y))$  则表示图像 I 中最大的像素值。图 3 为不同最小对比率对应的特征点提取结果,其中图(a)(b)(c)对应的值分别为 0.01, 0.1 以及 0.5。从图中可以看出,如果阈值较大,则无法筛选出部分幅值较低的边界点,造成特征点数量较少;如果阈值较小,在提取边界特征点时,则由于受背景噪声的影响较严重,从而会选出大量低质量的特征点。所以,利用固定阈值筛选特征点尽管计算简单,但是却无法满足不同图像以及图像中不同区域特征点的筛选需求<sup>[16]</sup>。



(a)最小对比率为 0.01 时特征点提取结果 (b)最小对比率为 0.1 时特征点提取结果 (c)最小对比率为 0.5 时特征点提取结果  
 (a)Extraction results of feature points with the minimum contrast ratio of 0.01 (b)Extraction results of feature points with the minimum contrast ratio of 0.1 (c)Extraction results of feature points with the minimum contrast ratio of 0.5

图 3 不同最小对比率对应的特征点提取结果

Fig. 3 Extraction results of feature points with different minimum contrast ratios

本文基于显著性图,对图像 ROI 与 NROI 采用不同的特征点搜索策略。如图 2 所示,房屋与道路等与周围差异较大或边界明显区域的显著性较高,所以需设置较低的  $MC$  值,以获得更多的特征点,而土地的显著性较低,所以  $MC$  值需设置的高些,以获得更有代表性且边界幅值较大的特征点,以避免在单一纹理区域选取过多的特征点,造成较高的误匹配率。综合感兴趣区域与非感兴趣区域灰度信息,本文  $MC$  值选取方法如下:

$$MC_{in}^i = \frac{INS_{mean}}{IS_{mean}^i} \cdot \left[ 1 - \exp \left\{ \frac{-NRS \cdot I_{mean}^i - IS_{mean}^i}{2RS_i \cdot \sigma_i^2} \right\} \right], \quad (4)$$

$$MC_{out} = \frac{\left( \sum_{i=1}^N RS_i \cdot IS_{mean}^i \right)}{N \cdot NRS \cdot INS_{mean}}, \quad (5)$$

其中:  $MC_{in}^i$  表示第  $i(i=1, 2, \dots, N)$  个 ROI 的最小对比率,  $MC_{out}$  表示 NROI 的最小对比率。其中  $INS_{mean}$  表示 NROI 显著性的均值,  $NRS$  为 NROI 面积,  $I_{mean}^i$  表示第  $i$  个 ROI 灰度的归一化均值,

$IS_{\text{mean}}^i$  表示对应显著性均值,  $RS_i$  为其对应的面积,  $\sigma_i$  为对应显著性值的方差。根据公式(4)知, 当 NROI 与 ROI 的显著性均值比率逐渐增大时, 表明该 ROI 呈现的信息越来越重要, 所以  $MC_{\text{in}}^i$  将减小, 以获得更多的特征点; 当 ROI 灰度归一化均值与对应显著性均值差异较大, 且显著性方差较小时, 表明该 ROI 可能包含与周围差异明显但自身灰度分布均一的重要物体, 所以  $MC_{\text{in}}^i$  将增大, 这样可以在重要物体幅值较大的边缘特征点提取时避免噪声影响。根据公式(5)知, 当图像中 ROI 面积较大且它们对应的显著性较高时, NROI 包含的特征信息较少, 所以  $MC_{\text{out}}^i$  将增大, 避免在 NROI 中选取过多的特征点, 从而影像匹配精度; 而当 ROI 面积较小且对应的显著性较小

时, ROI 内的特征点较少, 所以将  $MC_{\text{out}}^i$  减小, 使 NROI 内提取的特征点数量增多, 弥补 ROI 内特征点较少的不足。综合公式(4)(5), 根据不同图像的不同 ROI 的特点, 通过自适应调节  $MC_{\text{in}}^i$  与  $MC_{\text{out}}^i$  参数, 实现 FAST 特征点提取的优化。图 4 展示了特征点提取流程, 其中(a)为原始可见光图像, (b)为其对应的显著图, (c)为在显著图的基础上, 原始可见光图像的分割结果, (d)(彩图见期刊电子版)为自适应 FAST 特征点检测结果。对比图 3 可以发现, 利用自适应 FAST 算法, 可以在背景均一的区域提取数量较少、边界幅值较大的特征点, 而在包含重要物体的 ROI 内, 提取数量较多、表现物体轮廓的特征点。

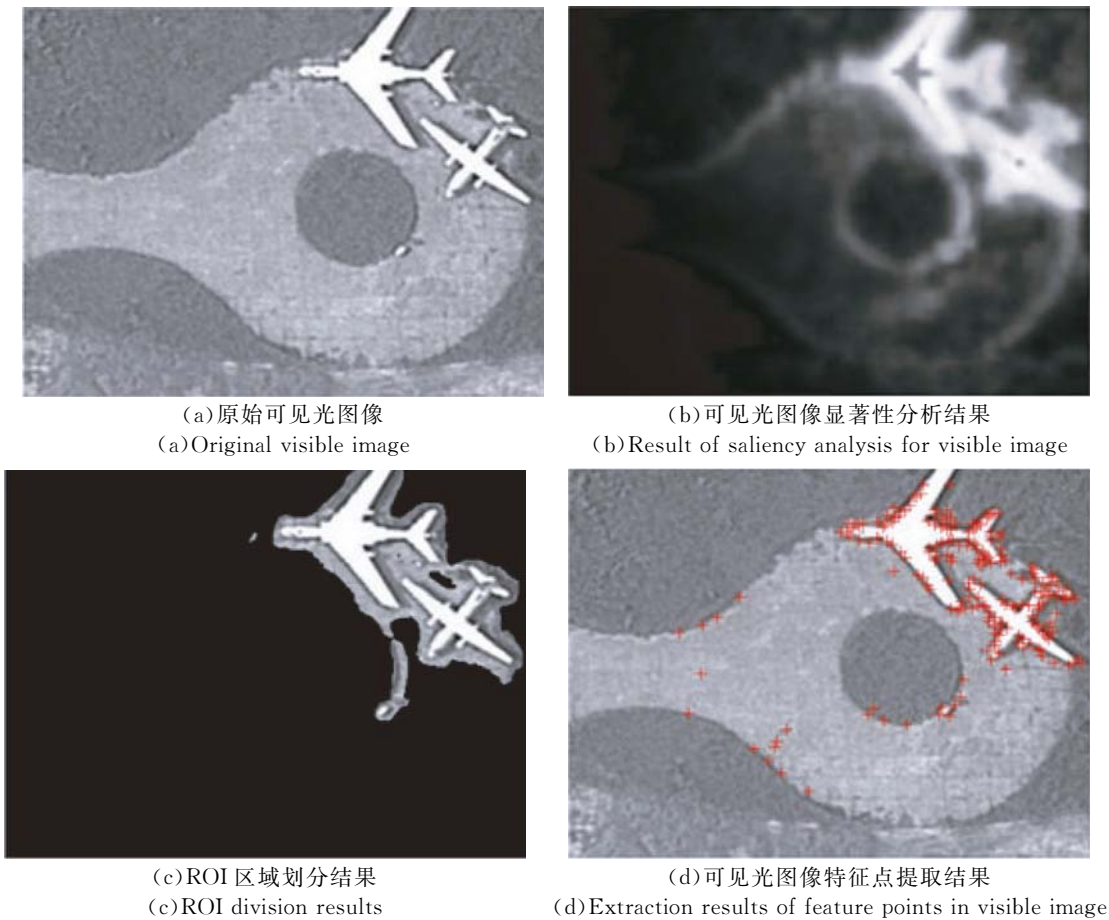


图 4 特征点提取流程

Fig. 4 Procedure of feature points extraction

对于红外图像, 其每个像素点的灰度值反映了对应的热量信息, 即不同的热量值对应不同的灰度值, 热量愈大的点对应的灰度值越大, 且受光

照等环境因素的影响相对较弱。利用统一 MC 值, 可以在不同采集环境下的红外图像中快速获得热量变化较大区域的特征点, 同时由于红外图

像边界扩散程度较大,不利于 ROI 的划分,所以在求解红外图像的特征点时,将采取统一阈值,以实现特征点的快速提取。红外图像特征点提取结果如图 5(彩图见期刊电子版)所示,其中采用的 MC 值为 0.23。

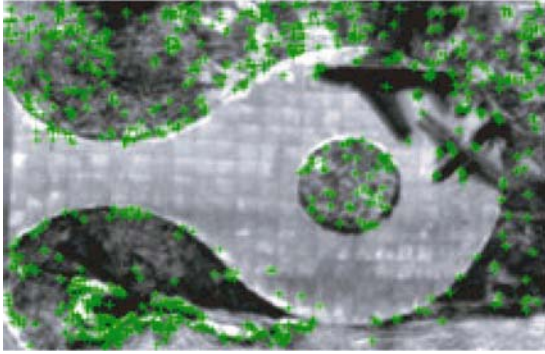


图 5 红外图像特征点提取结果

Fig. 5 Extraction results of feature points for infrared image

### 5 改进的 EOH 特征描述与特征点匹配

EOH 特征综合了特征点周围不同方向上的边界信息,实现对边缘方向以及幅值的描述。EOH 在边缘检测结果的基础上,通过计算以特征点为中心的矩形框范围内,所有点在多个方向的梯度值,生成特征点的边缘方向直方图。公式(6)用于计算点  $(x, y)$  处边缘强度,公式(7)定义了其边缘方向。

$$G(x, y) = \sqrt{G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2}, \quad (6)$$

$$\theta(x, y) = \arctan \left( \frac{G_y(x, y)}{G_x(x, y)} \right). \quad (7)$$

传统 EOH 特征描述需要手动为特征点设置

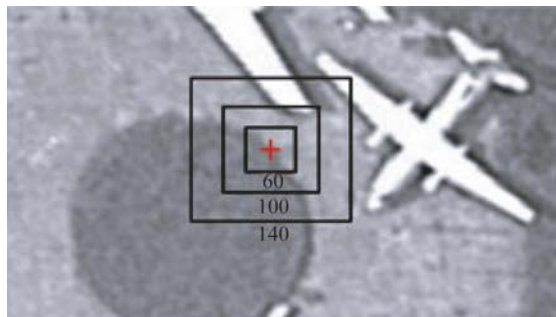
窗宽,在窗宽范围内检测图像的边缘信息,所以窗宽大小会严重影响描述精度。如果窗宽过大,不仅会增加特征描述的计算时间,同时降低了相邻特征点之间的区分度及匹配精度。如果窗宽过小,则将导致描述的边缘信息过细,增加特征点误匹配的概率。图 6 为采用 EOH 特征描述<sup>[1]</sup>对同一特征点在不同窗宽下获得的 80 维特征的直方图,其中 6(a)为可见光图像,图中十字为特征点,以特征点为中心选取边长分别为 60、100 以及 140 pixel 的正方形区域,而 6(b)~6(d)为分别采用 3 个不同的窗宽时对应特征点的 EOH 特征。从图中可以发现,窗宽对特征描述的影响较大。

本文采用公式(8)为特征点  $p$  设置不同的窗宽:

$$size = \begin{cases} \min(d(p, NROI)), & \text{当 } p \in ROI \\ \frac{\sum_{i=1}^N IS_{mean}^i \cdot \min(d(p, ROI^i))}{N}, & \text{当 } p \in NROI \end{cases}. \quad (8)$$

即为特征点到最邻近非该点所处区域的最短距离,如果  $p$  点位于 ROI,则其对应的窗宽为该点到 NROI 的最短距离,而如果  $p$  点位于 NROI,则其对应的窗宽为该点到不同 ROI 的最短距离与对应 ROI 显著性均值的乘积和的均值。通过公式(8),将特征点的位置信息融入 EOH 特征中。

根据自适应窗宽获得 EOH 特征描述后,对每个来自可见光图像的特征点,在红外图像中计算与其特征描述最相似的特征点,利用归一化的互信息作为特征描述间的相似性测度。然后利用随机抽样一致算法(RANDom SAmple Consensus, RANSAC)对匹配的特征点进行筛选提纯,最终获得红外与可见光图像的匹配结果。



(a)可见光图像特征点以及特征点对应的窗口

(a)Feature point and corresponding windows with different sizes in visible image

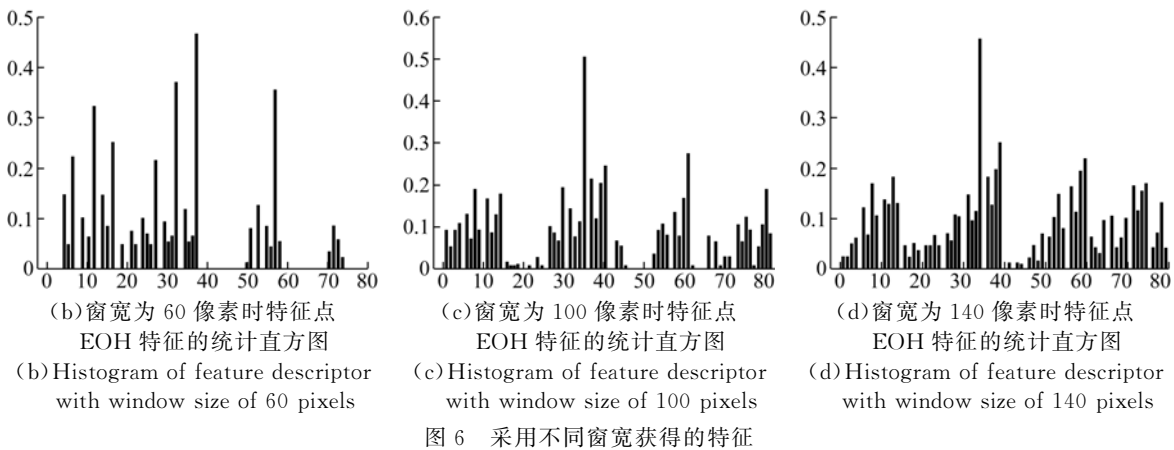


Fig. 6 Features obtained in different window sizes

## 6 实验结果

本文选择了 3 种不同情况下的红外与可见光图像数据进行配准,选用 SIFT、SRSIFT<sup>[13]</sup>、基于 EOH 的 SIFT 算法、RNGM<sup>[14]</sup> 等 4 种匹配算法与本文算法做对比。为了客观评价匹配效果,将利用两图像中匹配的特征点间的坐标误差,求解均方根误差 RMSE (Root-Mean-Square Error),以准确评估本文算法的精度。

第一种情况:红外图像与可见光图像采集的角度与位置大致相同,即红外图像中包含可见光图像中全部的 ROI。如图 7(彩图见期刊电子版)所示,红外图像与可见光图像的采集条件差异较小,其中,红外图像的尺寸为  $486 \times 333$ ,可见光图像尺寸为  $250 \times 188$ 。图 7(a)为利用 SIFT 算法求得的特征点匹配结果,图 7(b)为利用 SRSIFT 算法求得的特征点匹配结果,其中尺度范围为  $0.02 \sim 1.51$ ,图 7(c)为利用 FAST 进行特征提取,MC 值为 0.1,然后将 EOH 作为特征描述算法求得的特征点匹配结果,图 7(d)为利用 RNGM 算法求得的特征点匹配结果,图 7(e)为利用本文方法求得的结果。从结果可以看出,本文方法不同于其它 4 种算法,它在可见光图像中背景纹理均一的区域,选择较高的阈值,筛选出边缘幅值较大且数量较少的特征点,在 ROI 区域内,即飞机及其周围区域内,自适应的选择阈值,筛选出飞机上重要的特征点,然后利用自适应窗口的 EOH 求解特征,最终实现精确匹配。对于 SIFT 算法,当处理多光谱影像时,由于红外与可见光图像在同一物体区域的灰度分布存在差

异,单纯利用 SIFT 特征无法实现精确匹配。对于 SRSIFT 算法,其在 SIFT 算法结果的基础上,除去了一定量的误匹配特征点对,但是由于 SIFT 算法的精度较差,造成 SRSIFT 无法获得更高的精度。而对于 FAST 算法来说,受背景区域的影响较大,为了获得高质量的特征点,可以设置较小阈值进行特征点提取,但是低阈值将使该算法在纹理均一的背景区域选取较多的点,同时由于红外图像中对应的背景区域呈现的纹理特性与红外图像差异很大,导致匹配精度降低。对于 RNGM 算法,由于图像背景纹理较弱,通过边缘增强后,大量的特征点位于飞机与机场边缘,所以获得了较高的匹配精度。

第二种情况:红外图像与可见光图像采集的角度与位置均不同,但红外图像中包含可见光图像中全部的 ROI。如图 8 所示,红外图像与可见光图像对应的区域之间存在平移变换,其中红外图像尺寸为  $320 \times 256$ ,可见光图像尺寸为  $1024 \times 1024$ 。图 8(a)为利用 SIFT 算法求得的特征点匹配结果,图 8(b)为利用 SRSIFT 算法求得的特征点匹配结果,其中尺度范围为  $0.01 \sim 1.63$ ,图 8(c)为利用 FAST 与 EOH 算法求得的特征点匹配结果,其中 MC 值为 0.05,图 8(d)为利用 RNGM 算法求得的特征点匹配结果,图 8(e)为利用本文方法求得的结果。从结果可以看出,本文方法获得了精确的特征点匹配结果。对于 SIFT 与 FAST 以及基于 SIFT 的 SRSIFT 算法,尽管红外与可见光图像间平移量较小,但是由于两图像背景区域的纹理特性存在差异,导致误匹配率增大。对于 RNGM 算法,由于图像背景纹理较弱,通过边缘增强后,大量的特征点位于道路

边缘,所以获得了较高的匹配精度。

第三种情况:红外图像与可见光图像采集的角度与位置均不同,红外图像中包含可见光图像中部分的 ROI。如图 9 所示,红外图像拍摄的区域只占可见光图像中较少的部分,且采集角度差异较大,其中红外图像的尺寸为  $256 \times 320$ ,可见光图像的尺寸为  $2420 \times 1916$ 。图 9(a)为利用 SIFT 算法求得特征点匹配结果,图 9(b)为利用 SRSIFT 算法求得特征点匹配结果,其中尺度范围为  $0.03 \sim 1.45$ ,图 9(c)为利用 FAST 与 EOH 算法求得特征点匹配结果,其中 MC 值为  $0.1$ ,图 9(d)为利用 RNGM 算法求得特征点匹配结果,图 9(e)为利用本文方法求得的结果。从结果可以看出,由于可见光图像中包含大量的与红外图像相似但并不对应的区域,使得 SIFT 与 FAST 算法的误匹配率增大。对于 RNGM 算法,尽管边缘增强后,可见光图像中房屋以及道路得到凸显,但是由于图像纹理单一且存在大量相似纹理,故增加了误匹配率,降低了匹配精度。而对于本文算法,在公路或街道附近,即 ROI 区域,重点提取特征点,但在房屋区域,即纹理较单一的背景区域,则选择较大阈值,筛选高质量的背景特征点。同时本文方法在计算特征点 EOH 特征时,包含了其与 ROI、NROI 的相对位置信息,所以在匹配特征点时,尽管红外图像并不完全包含可见光图像中的 ROI 区域,但是依然获得了较高的匹配精度。

特征点匹配率与整体运算时间对比如表 1 所示,其中特征点匹配正确率为正确匹配的特征点占有所有特征点的比率。通过 3 种情况的数据测试知,本文算法在匹配准确性方面明显优于其它 4 种算法。尤其是对于第三组数据,在红外与可见光图像的采集角度与位置存在较大差异时,本文算法可以在 ROI 与 NROI,自适应选择窗宽的大小,增加了特征点间的区分度,所以本文算法仍可以保证  $74.21\%$  的匹配正确率,受图像纹理单一且存在大量相似纹理的影响,其他算法的特征匹配率较低。这表明本文方法鲁棒性强、稳定性高。但是由于本文需要首先求解可见光图像的显著图,而求解显著图的耗时与图像大小有关,所以当可见光图像尺寸较大时,本文方法所需时间也将增大。

根据本文算法求解的 3 组数据特征点匹配结果,求解仿射形变矩阵,将红外图像与可见光图像

进行配准。图 10(a~c)分别展示了 3 组图像的配准结果。对于第一组与第二组数据,红外图像中包含可见光图像中全部的 ROI,故最终的匹配效果较好,而对于第三组数据,由于本文方法匹配的特征点主要集中于公路周围,所以最终的匹配结果只在公路周围的效果较好。3 组匹配结果对应的 RMSE 值分别为  $0.078, 0.109$  和  $0.274$ 。

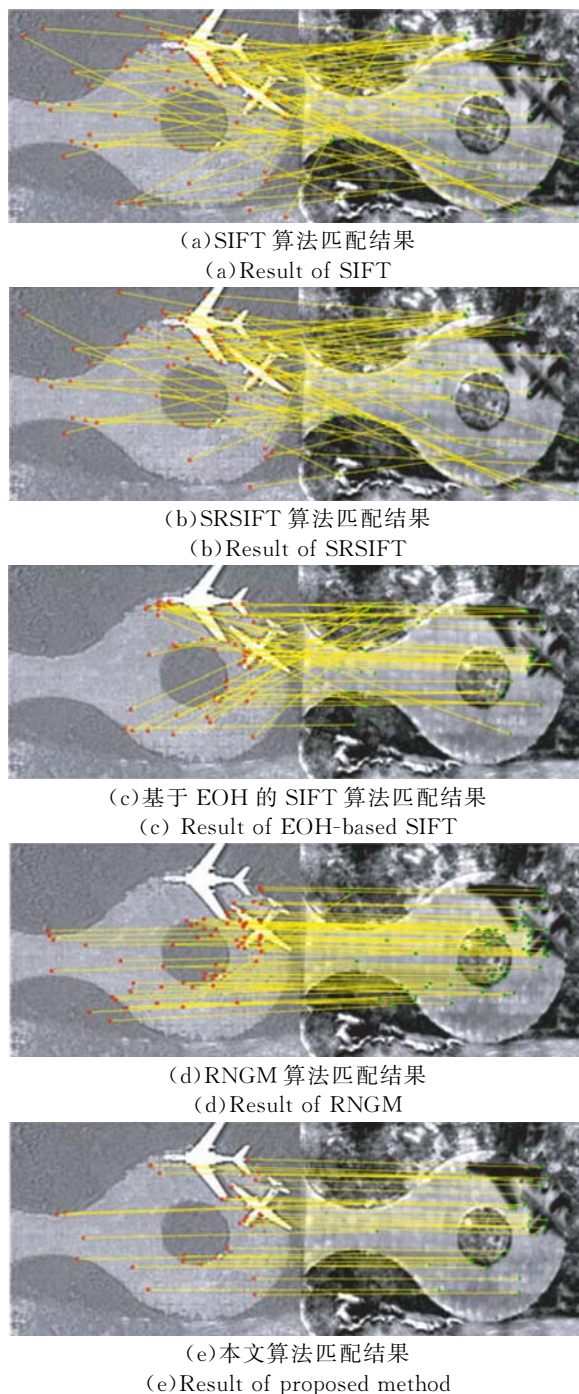
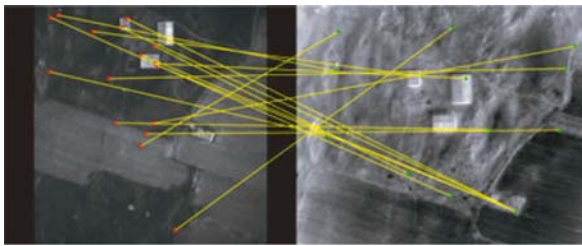
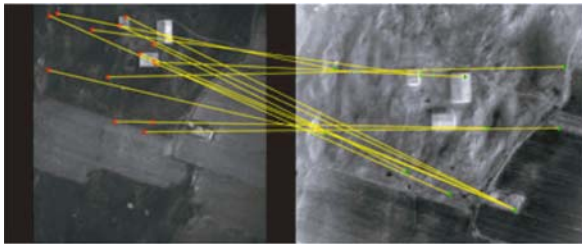


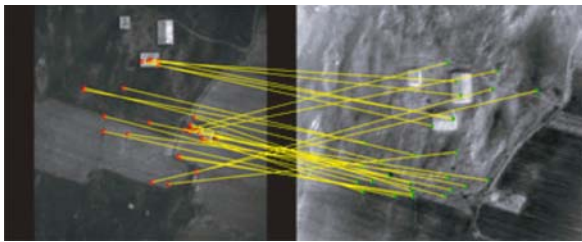
图 7 3 种方法在第一组数据集上的特征点匹配结果  
Fig. 7 Feature points matching results of three methods on the first data set



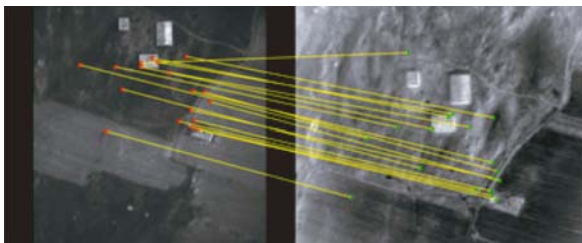
(a)SIFT 算法匹配结果  
(a)Result of SIFT



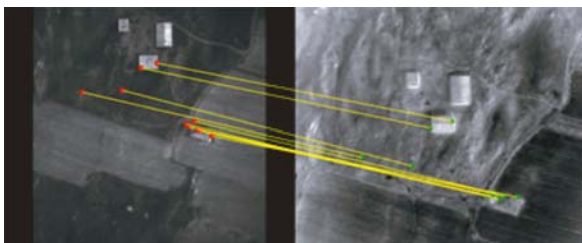
(b)SRSIFT 算法匹配结果  
(b)Result of SRSIFT



(c)基于 EOH 的 SIFT 算法匹配结果  
(c) Result of EOH-based SIFT

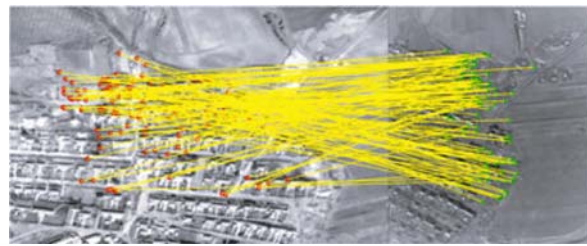


(d)RNGM 算法匹配结果  
(d)Result of RNGM

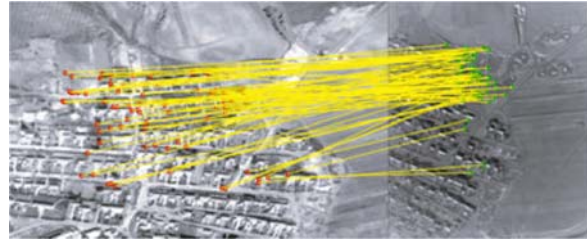


(e)本文算法匹配结果  
(e)Result of proposed method

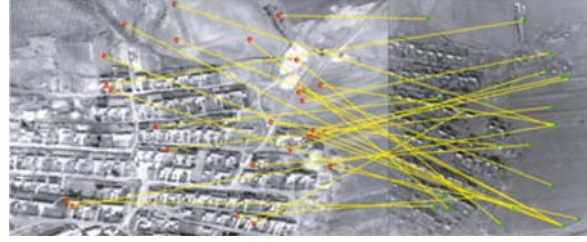
图 8 3 种方法在第二组数据集上的特征点匹配结果  
Fig. 8 Feature points matching results of three methods on the second data set



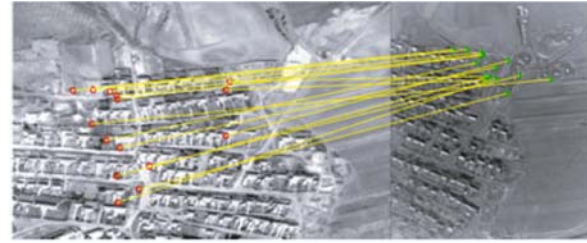
(a)SIFT 算法匹配结果  
(a)Result of SIFT



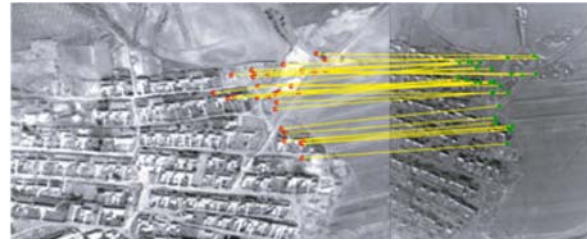
(b)SRSIFT 算法匹配结果  
(b)Result of SRSIFT



(c)基于 EOH 的 SIFT 算法匹配结果  
(c) Result of EOH-based SIFT



(d)RNGM 算法匹配结果  
(d)Result of RNGM



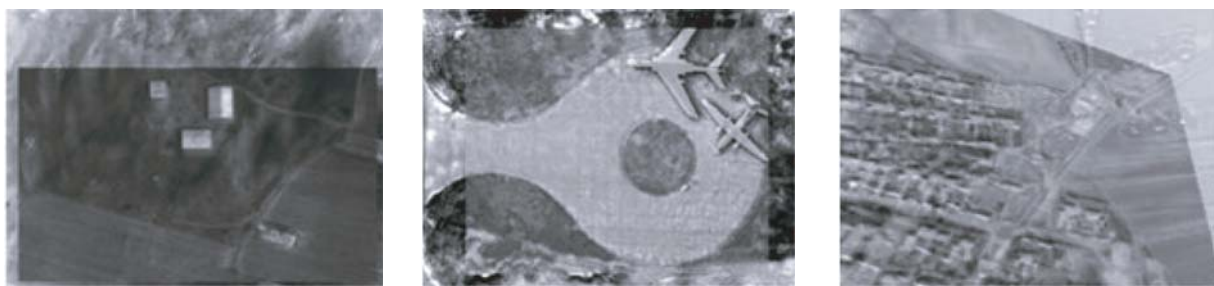
(e)本文算法匹配结果  
(e)Result of proposed method

图 9 3 种方法在第三组数据集上的特征点匹配结果  
Fig. 9 Feature points matching results of three methods on the third data set

表 1 特征匹配率与整体运算时间对比

Tab. 1 Comparison of feature matching rates and total operation times

方法	特征点匹配正确率/%			整体运算时间/s		
	第一组数据	第二组数据	第三组数据	第一组数据	第二组数据	第三组数据
SIFT	10.21	2.12	1.02	7.2	22.2	11.0
SRSIFT	12.32	14.28	10.10	7.3	22.3	11.3
FAST+EOH	21.34	15.32	2.47	4.8	8.3	7.6
RNGM	94.36	82.32	5.13	7.1	10.2	12.3
本文算法	96.55	80.00	74.21	6.5	8.7	10.1



(a)第一组数据配准结果 (b)第二组数据配准结果 (c)第三组数据配准结果  
 (a)Registration results of the first data (b)Registration results of the second data (c)Registration results of the third data

图 10 通过本文方法求得的 3 组数据配准结果

Fig. 10 Registration results of proposed method on three data sets

## 7 结 论

本文利用显著性分析、自适应阈值的 FAST 特征点识别以及改进的 EOH 特征实现多光谱图像匹配。实验证明,本文提出的算法在处理不同

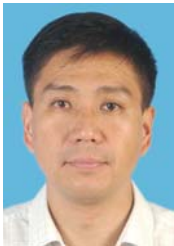
的红外与可见光图像时,均获得较好的匹配效果,尤其适用于红外与可见光图像信息融合等图像位置角度差异较小的场合。而对于角度发生较大改变或场景范围差异较大时,利用本文方法,在 ROI 区域仍可以实现稳定的特征点提取与可靠的特征点匹配。

### 参考文献:

- [1] AGUILERA C, BARRERA F, LUMBRERAS F, et al.. Multispectral image feature points [J]. *Sensors*, 2012, 12(9): 12661-12672.
- [2] 蒋宏,任章. 红外与可见光图像配准和融合中的关键技术[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(增): 7-12.  
JIANG H, REN ZH. Key technologies in registration and fusion for infrared and visible images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35 (Suppl.): 7-12. (in Chinese)
- [3] 柏连发,韩静,张毅,等. 采用改进梯度互信息和粒子群优化算法的红外与可见光图像配准算法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 248-254.
- [4] 李新城,班皓,沙巍,等. 一种大视场 TDICCD 相机的多传感器图像配准方法[J]. *液晶与显示*, 2014, 29(4): 644-648.
- [5] 臧丽,王敬东. 基于互信息的红外与可见光图像快速配准 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37 (1):
- BAI L F, HAN J, ZHANG Y, et al.. Registration algorithm of infrared and visible images based on improved gradient normalized mutual information and particle swarm optimization [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 248-254. (in Chinese)
- LI X E, BAN H, SHA W, et al.. Registration method of large field view and multi-sensor images of TDICCD cameras [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Display*, 2014, 29(4): 644-648. (in Chinese)

- 164-168.
- ZANG L, WANG J D. Infrared and visible light image fast registration based on mutual information [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 164-168. (in Chinese)
- [6] 杨枕, 童涛, 陆松岩, 等. 基于多特征的红外与可见光图像融合 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 489-496.
- YANG G, TONG T, LU S Y, *et al.*. Fusion of infrared and visible images based on multi-features [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 489-496. (in Chinese)
- [7] 程国华, 王阿川, 陈舒畅, 等. 多源遥感影像高精度自动配准方法研究 [J]. *液晶与显示*, 2016, 31(6): 604-612.
- CHENG G H, WANG A CH, CHEN SH CH, *et al.*. High accuracy-automatic registration method research on multi-source remote sensing image [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Display*, 2016, 31(6): 604-612. (in Chinese)
- [8] 谭东杰, 张安. 方向相关与互信息加权组合多模图像配准方法 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(3): 836-841.
- TAN D J, ZHANG A. Multi-model image registration based on weighted orientation correlation and mutual information [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 836-841. (in Chinese)
- [9] 余先川, 吕中华, 胡丹. 遥感图像配准技术综述 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(11): 2960-2972.
- YU X CH, LV ZH H, HU D. Review of remote sensing image registration techniques [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2960-2972. (in Chinese)
- [10] 丘文涛, 赵建, 刘杰. 结合区域分割的 SIFT 图像匹配方法 [J]. *液晶与显示*, 2012, 27(6): 827-831.
- QIU W T, ZHAO J, LIU J. Image matching algorithm combining SIFT with region segmentation [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Display*, 2012, 27(6): 827-831. (in Chinese)
- [11] 刘畅, 崔桐, 贺成龙, 等. 基于高曲率特征点匹配的红外可见光图像配准 [J]. *指挥信息系统与技术*, 2016, 7(1): 13-17.
- LIU CH, CUI T, HE CH L, *et al.*. Infrared-visible image registration based on high-curvature feature matching [J]. *Command Information System and Technology*, 2016, 7(1): 13-17. (in Chinese)
- [12] 李健, 王滨海, 李丽, 等. 基于 SIFT 的电力设备红外与可见光图像的配准和融合 [J]. *光学与光电技术*, 2012, 10(1): 75-78.
- LI J, WANG B H, LI L, *et al.*. Electrical equipment IR and visible images registration and fusion based on SIFT [J]. *Optic & Optoelectronic Technology*, 2012, 10(1): 75-78. (in Chinese)
- [13] 尹志, 支吉成, 杨鑫. 多光谱遥感图像配准基于 SIFT [J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(2): 107-108.
- [14] HUANG Q, GAO Q, YANG J, *et al.*. Visible and infrared image registration algorithm based on NSCT and gradient mirroring [C]. *Conference on Multi-spectral, Hyperspectral, and Ultra-spectral Remote Sensing Technologies and Applications V*, 2014.
- [15] GOFERMAN S, ZELNIK-MANOR L, TAL A. Context-aware saliency detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2011, 34(10): 1915-26.
- [16] 丁尤蓉, 王敬东, 邱玉娇, 等. 基于自适应阈值的 FAST 特征点提取算法 [J]. *指挥控制与仿真*, 2013, 35(2): 47-53.
- DING Y R, WANG J D, QIU Y J, *et al.*. FAST feature detection algorithm based on self-adaptive threshold selection [J]. *Command Control & Simulation*, 2013, 35(2): 47-53. (in Chinese)

#### 作者简介:



徐 军 (1970—), 男, 云南楚雄人, 96658 部队工程师, 现为武汉大学博士研究生, 主要从事航天摄影测量、遥感图像处理、打击效果评估等方面的研究。E-mail: junxu70@163.com



付天宇 (1991—), 男, 北京人, 博士研究生, 2013 年于山东大学获得学士学位, 主要从事图像配准算法研究。E-mail: fty0718@163.com