

结合边缘检测的快速 SIFT 图像拼接方法

蔡怀宇, 武晓宇*, 卓励然, 黄战华, 王星宇

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为了对身管内壁序列图像进行精确配准与融合拼接, 得到大视场高分辨率待检测图像, 根据图像特点提出了一种结合边缘检测的快速 SIFT 图像拼接方法。该方法充分考虑待处理图像的特点, 首先对感兴趣区域的图像进行边缘检测, 分割出细节信息最丰富的子区域, 再对分割出的子区域提取 SIFT 特征点并进行配准。然后, 使用基于 Sigmoid 型函数权重的图像融合方法, 实现图像之间的无缝融合, 最大程度地保证了融合图像的清晰度和细节信息的完整性。实验结果表明: 改进的方法和传统 SIFT 算法相比, 在特征点提取阶段的平均效率提高了 80% 左右, 且整体配准阶段的效率也有较大提高。图像融合结果在主观评价和各种客观评价上都能满足工程实际需求。

关键词: 图像拼接; 边缘检测; 快速 SIFT; Sigmoid 函数权重

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1126003

Fast SIFT image stitching algorithm combining edge detection

Cai Huaiyu, Wu Xiaoyu*, Zhuo Liran, Huang Zhanhua, Wang Xingyu

(Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology(Tianjin University), Ministry of Education, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to accurately register and stitch the sequence images of the inner wall of the barrel, and get a image with high field of view and high resolution, a fast SIFT image stitching method with edge detection according to the characteristics of the overlap region of the images was proposed. It took full account of the characteristics of the images and could quickly segment the sub-region that possessed the most abundant anomalous information by detecting the edge of the region of interest. Then, it extracted SIFT feature points of the sub-region and matched them accurately by RANSAC. After that, a novel fusion method based on the weight of Sigmoid function weight was used to realize the seamless fusion between sequence images. This method can maximize the clarity of the fused image and the integrity of the detailed information. Experimental results show that the improved algorithm is much less time-consuming than that of traditional SIFT algorithm. Its computational efficiency has improved about 80% in feature points extraction process and the efficiency of the whole registration process has been also improved. The subjective evaluation and the various objective evaluation values of the fusion results by this fusion method are superior to other fusion methods.

Key words: image stitching; edge detection; fast SIFT; Sigmoid function weight

收稿日期: 2017-10-30; 修订日期: 2017-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(61475113)

作者简介: 蔡怀宇(1965-), 女, 教授, 博士, 主要从事光学技术与仪器、信息光学和图像处理等方面的研究。Email: hycai@tju.edu.cn

0 引言

火炮武器是军事领域中相当重要的武器之一，而火炮身管则是整个火炮十分关键的部件，其内壁质量在一定程度上会影响火炮的主要技术指标，更与火炮武器在整个使用过程当中的安全可靠存在直接联系^[1]，所以，定期对身管内表面进行成像检测，测定炮膛内壁的瑕疵，对后续火炮寿命评定等工作具有重要的意义。

为了得到大视场、高分辨率、高清晰度的身管内壁二维图像，需要将多幅小视场的序列图像进行拼接融合。目前应用最广泛的图像拼接方法为基于尺度不变特征 (Scale Invariant Feature Transform, SIFT) 的方法^[2]，该方法对图像旋转、缩放、尺度变换及光照差异等都具有很强的鲁棒性，但也存在原理复杂、计算量大、耗时长等缺点^[3-4]，导致其不能满足工程上图像拼接的实时性要求。

对于多幅序列图像而言，图像拼接的难点在于加快拼接速度、提高拼接质量。近年来，针对 SIFT 算法拼接速度而进行的改进不断涌现。何宾等^[5]提出一种基于子图像块的 F-SIFT 算法，提高了系统运算速度和实时性；Y.H.Zhang 等^[6]提出一种改进的 GA-SHIFT 方法，利用几何代数方法来对航拍图像进行新的尺度空间表征，充分利用图像的光谱和空间信息，进行快速特征点检测及匹配。陈月等^[7]对图像分块并确定局部特征类型，对不同类型区域采用不同的简化方法提取特征点，有效提高了图像拼接效率。A. Laraqui 等^[8]则利用泰森多边形对匹配图像进行约束，实现了快速、精确的图像拼接。

对拼接后的静态图像进行融合处理时一般采用加权平均法，渐入渐出法等^[9]，其中加权平均法权重固定，融合之后的拼接缝隙比较明显；渐入渐出法权重基于距离变化，融合后的图像在重叠区域过渡相对自然，但结果还存在人眼可见的拼接缝隙；参考文献^[9]利用三角函数作为权重因子，权值大小随着像素位置变化更加缓慢，图像过渡更自然；目前流行的最佳缝合线算法^[10]利用动态规划的思想减小融合中的“鬼影”和重影等现象，但该方法计算量较大，对小分辨率的图像也会有较长的耗时。

为满足工程上实时性要求，文中根据身管内壁

序列图像的特点，从时域角度出发，提出一种结合边缘检测的快速 SIFT 图像拼接方法，在保证拼接质量的前提下提高了拼接速度；根据图像特点使用一种基于 Sigmoid 型函数权重因子对拼接后的图像进行融合，在不增加计算复杂度的前提下获得了良好主观效果和客观评价。

1 图像获取原理及成像特点

1.1 成像系统的硬件构成

图 1 为身管内壁成像系统原理图，它主要由光学成像模块、机械运动模块、集成控制模块和终端计算机组成。其中光学成像模块由 CMOS 相机和环形 LED 照明光源组成，机械运动模块由测量车和爬行驱动器组成，CMOS 相机安装于测量车车头安装座上，成像方式为旋转扫描成像，管内壁一周全景图像由多幅小视场图像拼接得到，最大程度地保证了图像的分辨率要求。所有的控制器件集成于一个控制模块中，能够实现各单元的同步控制。CMOS 相机采集到的图像数据通过 GIGE 千兆网线实时回传到终端计算机当中，用于后续的图像拼接处理。

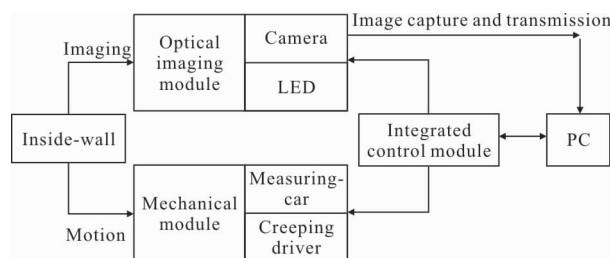


图 1 旋转扫描成像系统结构图

Fig.1 Schematic diagram of rotating scanning imaging system

1.2 序列图像成像特点

由于成像系统获取的每幅图像大小、每周成像帧数可以人工设定，故相邻两幅序列图像之间的重叠区域可以通过硬件初步确定。文中示例图大小为 600×400，展示图像均经过一定的尺寸压缩。基于硬件系统的支持及成像对象的特点，文中获得的图像具有如下特性：

(1) 图像间重叠区域大小可以通过硬件设置进行初步确定；

(2) 图像重叠区域包含烧蚀、裂缝等瑕疵，但瑕疵大小、数目及明显程度有所不同；

(3) 相邻两幅图像重叠区域清晰程度并非完全一致,越靠近中心的部分越清晰。

2 图像拼接与融合

传统 SIFT 算法主要包含 4 个步骤^[2]:尺度空间极值点检测、不稳定特征点剔除、特征点主方向确定及特征描述子生成。但传统 SIFT 方法中直接对整幅图像进行特征点提取,不仅加大了算法的运算负荷,同时也增大了特征匹配过程中的计算复杂度^[11]。文中相邻图像间的重叠区域可以通过硬件支持初步获取,若能在重叠区域中分割出有效的待检测子区域,就可以进一步缩小特征检测范围,充分利用有限的特征点对计算出有效的变换矩阵,避免不必要的特征检测和配准计算,进而加快拼接速度。

2.1 结合边缘检测的快速 SIFT 图像配准

一幅较为平滑的图像中轮廓信息丰富而细节信息不显著,若相邻两幅图像的重叠区域中出现瑕疵,则会在平滑的图像中引入一些突起、凹陷等异常信息,在图像上表现为瑕疵区域的像素灰度值与其周边区域的灰度值出现显著性差异,灰度值梯度会出现明显变化^[12]。为有效分割出图像重叠区域灰度值梯度变化最明显即图像细节信息最丰富的子区域,将其作为目标区域替代整幅图像进行特征检测以提高运算效率^[13],采用 Robert 边缘检测算子^[14-15]求取待检测区域每个像素点的方向梯度幅值,再对该区域进行分块,计算各子区域内的方向梯度幅值总和占整体检测区域梯度幅值总和的比重,将占比最大的子区域作为后续 SIFT 配准区域。具体步骤如下:

(1) 计算待检测区域内每个像素点的方向梯度幅值 G ,计算公式如下:

$$G(x, y) = \sqrt{[f(x, y) - f(x-1, y-1)]^2 + [f(x, y-1) - f(x-1, y)]^2} \quad (1)$$

式中: $f(x, y)$ 为图像像素点灰度值。

(2) 图像区域分块,参考文献[11]表明,取 128×128 的区域尺寸即可满足要求,文中为了提高算法的准确性,采用 200×150 的区域尺寸对图像进行分块,步长为 100;

(3) 计算各子区域方向梯度幅值总和占整体检测区域梯度幅值总和的比重,计算公式如下:

$$\eta_l = \frac{D_l}{D} = \frac{\sum_{i=1}^{200} \sum_{j=1}^{150} G(i, j)}{\sum_{i=1}^{200} D_i} \quad (l=1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

式中: D_l 为第 l 个子区域的梯度幅值总和; D 为整个重叠区域的梯度幅值总和; η_l 则为每个子区域占比大小。

(4) 找出占比最大即最显著的子区域

$$D_{lMax} = \text{Max}\{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_l\} \quad (3)$$

通过上述步骤求出方向梯度幅值总和最大的区域 D_{lMax} 作为目标子区域,由于文中相邻图像在轴向位置没有偏移量,故可以在待拼接图像中自动分割出对应的目标区域 D_{lMax} 。使用 SIFT 特征提取原理对 D_{lMax} 、 D'_{lMax} 两目标子区域提取特征点并进行特征匹配,通过 RANSAC 算法对错误的匹配点进行剔除,最终求得变换矩阵。由于该系统获取到的图像之间没有尺度和旋转角度的变化,故变换矩阵可以简化为下式:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_1 \\ 0 & 1 & t_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: t_1 、 t_2 分别为待配准图像相对于参考图像的水平方向位移量和垂直方向位移量。

分割目标子区域的过程中,如图 2 所示,若两幅相邻图像的粗配准重叠区域为 A ,最终选取的边缘检测区域为 A' 。若在 A' 中检测到的目标区域为 B ,则对应相邻图像的目标区域可标定为 B' 。 B 和 B' 在理论上没有轴向位移变化。

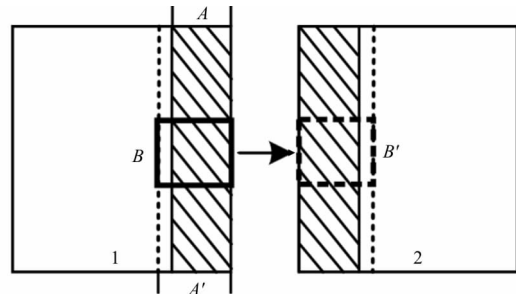


图 2 特征检测区域示意图

Fig.2 Diagram of image overlap region and saliency detection region

2.2 基于 Sigmoid 型函数权重的图像融合

拼接后的图像在重叠区域的拼接处会产生较为

明显的边界痕迹,这对炮膛内表面的观察产生了一定的影响,故而需要对拼接后的重叠区域做图像融合处理。假设左右两幅图像重叠区域分别为 $I_1(i_1, j_1)$ 、 $I_2(i_2, j_2)$,则融合后重叠区域 C 中的像素点的灰度值为:

$$C(i, j) = \omega \times I_1(i_1, j_1) + \nu \times I_2(i_2, j_2) \quad (5)$$

式中: ω 、 ν 为融合权重因子, ω 、 ν 的变化趋势对最后的融合结果有重要的影响^[9]。

文中成像对象为炮膛内壁,管内特殊的成像环境使得成像相机的视场相对较小,最终所成的每幅图像在边缘都会有一定的模糊。如图 3 所示,若将重叠区域分为两部分,则 I 区较 I' 区更清晰, II' 区较 II 区更清晰。为尽量保证清晰度,在融合过程中,取重叠区域的部分作为 ROI 区域,对该区域进行融合处理。

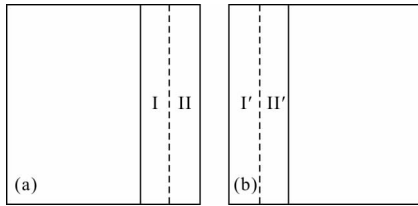


图 3 重叠区域图像特性示意图

Fig.3 Characteristic of overlap region image

文中使用权重可调 Sigmoid 型函数作为融合权重因子对拼接后的重叠区域进行融合,该函数表达式为:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-kx}} \quad (6)$$

图像融合过程中,首先把每列像素点坐标按照公式(7)进行变换:

$$p = j + \frac{\min + \max}{2} \quad (7)$$

式中: j 为原图像中某列像素点横坐标值; \min 和 \max 分别表示重叠区域中最小和最大的像素列横坐标值。

然后按照公式(8)求参考图像和目标图像的权重,两权重之和为 1:

$$\begin{cases} \omega = 1 - \frac{1}{1 + e^{-kp}} = 1 - \frac{1}{1 + e^{-k(j - \frac{\min + \max}{2})}} \\ \nu = \frac{1}{1 + e^{-kp}} = \frac{1}{1 + e^{-k(j - \frac{\min + \max}{2})}} \end{cases} \quad (8)$$

图 4 为当 p 取值范围为 $[-50, 50]$ 时,不同 k 值

下的 Sigmoid 型函数曲线。由图 4 结果可知,当取值范围一定时, k 值越小,函数曲线越趋于线性;而当 k 值一定时,取值范围越大,函数曲线越趋于非线性。所以, k 值的选取需要由融合 ROI 区域大小和实际融合权重因子的需求共同确定。

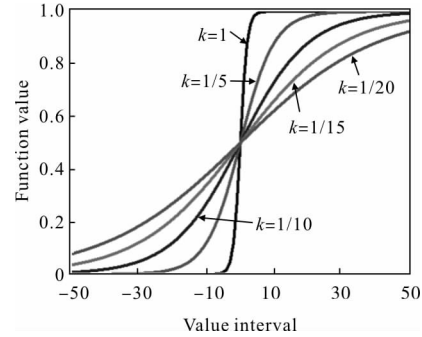


图 4 不同 k 值下 S 函数变化趋势

Fig.4 Variation trend of S function of different k

文中通过限定融合边界权重值来确定 k 值。为了使融合后的图像在重叠区域的过渡更加自然,结合 Sigmoid 型函数的特点,文中的融合左边界权重值 ω 取为 0.99,根据公式(6)即可求出相应的 k 值,文中最终 k 值为 0.1313。图 5 为文中融合权重因子随像素位置的变化情况。

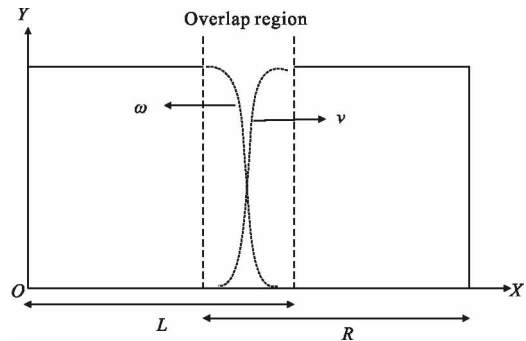


图 5 文中算法权重变化图

Fig.5 Weight changing of the presented method

3 实验与结果分析

文中从算法时间效率、图像融合结果客观评价等方面进行分析,通过对多组图像进行试验来验证算法性能。文中图像处理使用的计算机 CPU 为 Inter(R) Pentium(R), 2.8 GHz, 内存为 4.00 GB, 操作系统为 Windows 7。仿真平台为 MATLAB2014a, 加入开源库 vl_feat_9.20。

3.1 时间效率统计分析

设置 3 组对比试验,对模拟的内壁图像进行处理,比较文中算法与传统 SIFT 算法特征点检测效率及整体匹配效率,文中改进算法包含目标子区域寻找及特征点检测配准两个过程,图像处理区域仅为图 6 中红框选中的重叠区域。对每组图像进行 3 次实验操作,表中给出的时间均为 3 次的平均值,两种方法各阶段的耗时情况如表 1、表 2 所示。由表中结果可知,文中方法与传统 SIFT 方法相比,特征点提取时间大大缩短,平均提高了 80%以上;从整体配准过程来看,文中算法较传统 SIFT 算法时间效率提高了 35%左右,提高了算法实时性。

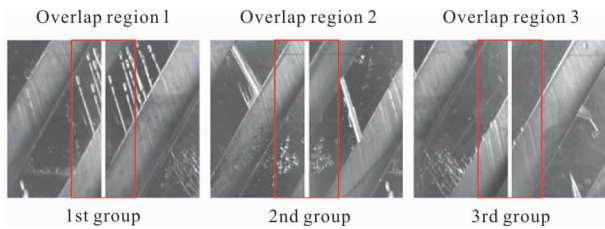


图 6 用于比较的序列图像

Fig.6 Sequence images for comparison

表 1 特征点提取时间比较(单位:s)

Tab.1 Comparison of feature extraction(Unit:s)

Images	SIFT	Proposed	Accelerated percentage
1st group	0.208	0.037	82.2
2nd group	0.225	0.052	76.9
3rd group	0.237	0.042	82.3

表 2 整体配准过程的时间比较(单位:s)

Tab.2 Comparison of the whole registration process(Unit:s)

Images	SIFT	Proposed method		Accelerated percentage
		Addressing	Registration	
1st group	0.239	0.108	0.049	34.3
2nd group	0.242	0.106	0.065	34.7
3rd group	0.265	0.106	0.056	38.9

3.2 图像融合效果分析

针对文中使用的基于 Sigmoid 型函数权重的图像融合方法,分别与加权平均法、渐入渐出法、三角函数权重法的融合结果进行比较,图 7 是以序列图

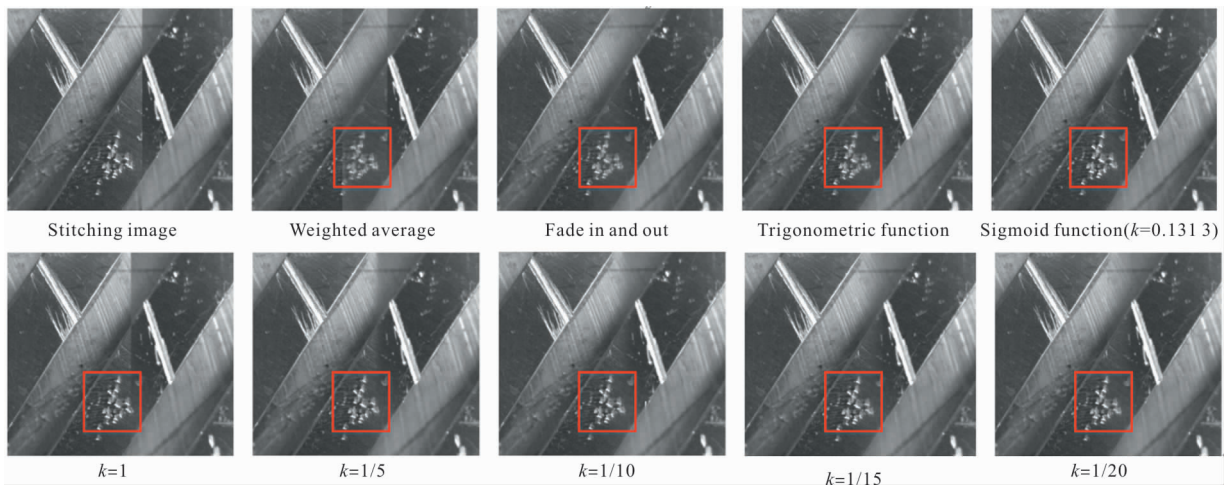


图 7 图像融合结果示例

Fig.7 Examples of image fusion results

像中的两幅为例进行的融合结果比较。通过分别求取融合图像的平均梯度(AG)、信息熵(IE),融合后图像与原图像之间的结构相似性(SSIM)和均方根误差(RMSE)来从客观上进行评价^[16]。AG 表征图像清晰度,AG 越大说明融合图像越清晰;IE 越大说明融合图像包含的信息越丰富;SSIM 越大表明融合后图像与源图像相似度越高;RMSE 表征融合图像与

标准参考图像之间的差异程度,其值越小,则表明融合的效果越好。

在主观上,4 种融合结果当中,红框选中的部分,加权平均法融合后的图像效果较差,拼接痕迹十分明显,渐入渐出法和三角函数权重法融合的结果都相对模糊,而文中方法融合的结果在主观上最清晰。在客观上,文中使用的融合方法在各种客观

评价值中都有良好的结果,且该方法最适合文中图像,如表 3 所示。

表 3 4 种方法融合质量客观评价价值比较

Tab.3 Comparison of objective evaluation value among four methods

Evaluation value	AG	IE	SSIM	RMSE
Weighted average	4.400 3	6.904 3	0.966 3	0.013 0
Fade in-out	4.450 6	6.910 4	0.956 4	0.014 7
Trigonometric function	4.485 6	6.920 2	0.952 3	0.015 4
Sigmoid function (k=0.131 3)	4.634 9	6.950 8	0.970 3	0.011 3
S function(k=1)	4.672 6	6.958 9	0.964 3	0.012 4
S function(k=1/5)	4.647 9	6.954 2	0.968 1	0.011 7
S function(k=1/10)	4.625 3	6.947 7	0.972 3	0.010 9
S function(k=1/15)	4.609 3	6.943 5	0.975 3	0.010 3
S function(k=1/20)	4.599 9	6.941 3	0.977 4	0.009 9

同时,当 k 取值不同时,主观评价和各客观评价价值都有所变化。在主观上,随着 k 值不断增大,清晰度逐渐增大,但图像过渡拼接痕迹却越来越明显。客观上, k 值越大图像包含的信息越丰富,但与源图像的相似性逐渐减小,且与源图像均方根误差逐渐加大。而通过文中方法确定的 k 值下的融合图像则处在一个比较平衡的状态,既确保了图像的清晰度较高,图像信息较丰富,又与源图像具有较高的相似性和较低的均方根误差,证明了文中融合方法的有效性和科学性。

4 结 论

文中根据炮管内壁序列图像的拼接要求,提出一种结合边缘检测的快速 SIFT 图像拼接算法,在已知粗配准重叠区域的条件下,通过寻找细节信息最丰富的目标子区域进一步对待精确配准的区域进行定位,缩短了特征点检测时间,提高了配准效率及图像拼接效率。充分系统获取的序列图像的特点,使用基于 Sigmoid 型函数权重的图像融合方法,对拼接后的图像进行融合。实验结果表明:在特征点检测阶段,文中改进方法与传统 SIFT 算法相比,时间效率提高了 80% 左右,整体配准过程时间效率提高了 35% 左右。融合后得到的结果图像,其主观评价和各

种客观评价价值与常用的融合方法相比,其主观和客观评价价值均优于对比方法。整体图像拼接与融合过程可以满足实时性要求,具有较高的工程实用价值。

参考文献:

- [1] Zhang Peilin, Li Guozhang, Fu Jianping. Self-propelled Gun's Fire System [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2002. (in Chinese)
张培林, 李国章, 傅建平. 自行火炮火力系统 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2002.
- [2] Brown M, Lowe D G. Automatic panoramic image stitching using invariant features [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2007, 74(1): 59-73.
- [3] Li Yufeng, Li Guangze, Gu Shaohu, et al. Image mosaic algorithm based on area blocking and SIFT [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(5): 1197-1205. (in Chinese)
李玉峰, 李广泽, 谷绍湖, 等. 基于区域分块与尺度不变特征变换的图像拼接算法 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(5): 1197-1205.
- [4] Wang Xinhua, Huang Wei, Ouyang Jihong. Real-time image registration of the multi-detectors mosaic imaging system [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 211-219. (in Chinese)
王新华, 黄玮, 欧阳继红. 多探测器拼接成像系统实时图像配准 [J]. *中国光学*, 2015, 8(2): 211-219.
- [5] He Bin, Tao Dan, Peng Bo. High real-time F-SIFT image mosaic algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S2): 440-444. (in Chinese)
何宾, 陶丹, 彭勃. 高实时性 F-SIFT 图像拼接算法 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S2): 440-444.
- [6] Zhang Y H, Jin X, Wang Z J. A new modified panoramic UAV image stitching model based on the GA-SIFT and adaptive threshold method [J]. *Memetic Comp*, 2017, 9: 231-244.
- [7] Chen Yue, Zhao Yan, Wang Shigang. Fast image stitching method based on SIFT with adaptive local image feature [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(4): 415-422. (in Chinese)
陈月, 赵岩, 王世刚. 图像局部特征自适应的快速 SIFT 图像拼接方法 [J]. *中国光学*, 2016, 9(4): 415-422.
- [8] Laraqui A, Baataoui A, Saaidi A, et al. Image mosaicing using voronoi diagram [J]. *Multimed Tools*

- Appl*, 2017, 76: 8803–8829.
- [9] Wang Dan, Liu Hui, Li Ke, et al. An image fusion algorithm based on trigonometric functions[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(1): 53–57. (in Chinese)
汪丹, 刘辉, 李可, 等. 一种三角函数权重的图像拼接算法[J]. 红外技术, 2017, 39(1): 53–57.
- [10] Chon J, Kim H, Lin C S. Seam-line determination for image mosaicking: A technique minimizing the maximum local mismatch and the global cost[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2010, 65(1): 86–92.
- [11] Zhao Yan, Chen Yue, Wang Shigang, et al. Corrected fast SIFT image stitching method by combining projection error [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(6): 1645–1651. (in Chinese)
赵岩, 陈月, 王世刚, 等. 结合投影误差校正的快速 SIFT 图像拼接[J]. 光学精密工程, 2017, 25(6): 1645–1651.
- [12] Gonzalez Rafael C, Woods Richard E. Digital Image Processing[M]. 3rd ed. Translated by Ruan Qiuqi, Ruan Yuzhi, et al. Beijing: Electronic Industry Press, 2011. (in Chinese)
Gonzalez Rafael C, Woods Richard E. 数字图像处理[M]. 第三版. 阮秋琦, 阮宇智, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [13] He Linyang, Liu Jinghong, Li Gang, et al. Fast image registration approach based on improved BRISK [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2722–2727. (in Chinese)
何林阳, 刘晶红, 李刚, 等. 改进 BRISK 特征的快速图像配准算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2722–2727.
- [14] Singh S, Singh R. Comparison of various edge detection techniques [C]//Proceedings of 2nd International Conference on Computing for Sustainable Global Development, IEEE, 2015: 393–396.
- [15] He Li, Luo Yanfang. Research on face detection algorithm based oil digital image processing technology [J]. *Computer Measurement & Control*, 2017, 25(7): 273–281. (in Chinese)
何莉, 罗艳芳. 基于数字图像处理技术的人脸检测算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(7): 273–281.
- [16] Kong Weiwei, Wang Binghe, Li Binbing, et al. Image Fusion: Multiresolution Non-subsampled [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2015. (in Chinese)
孔韦韦, 王炳和, 李斌兵, 等. 图像融合技术: 基于多分辨率非下采样理论与方法 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2015.