

基于改进 BRISK 的图像拼接算法

董 强 刘晶红* 王 超 周前飞

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

(中国科学院大学 北京 100049)

(解放军 77110 部队 什邡 618400)

摘 要: 为了获得精准的航空拼接图像,更好地解决图像拼接中经常出现的尺度变化、角度旋转、光照差异以及传统的 BRISK(Binary Robust Invariant Scalable Keypoints)算法匹配正确率较低,图像拼接精度低等问题,该文提出一种全新的基于有向线段的 BRISK 特征的图像拼接模型。首先,使用 BRISK 算法进行图像匹配,得到粗匹配点对,再构造有向线段及其 BRISK 特征进行邻近线段匹配,通过概率统计模型进行特征点的精匹配,最后进行加权融合和亮度均衡化进行图像融合完成图像拼接。实验结果表明,该文算法针对图像的光照条件不同、角度旋转、分辨率低、尺度变化等均有良好的鲁棒性和稳定性,该文算法是一种耗时短、精确度高、拼接效果良好的图像拼接方法。

关键词: 图像配准; 图像拼接; BRISK 特征; 邻近线段

中国分类号: TP7221

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)02-0444-07

DOI: 10.11999/JEIT160324

Image Mosaic Algorithm Based on Improved BRISK

DONG Qiang

LIU Jinghong

WANG Chao

ZHOU Qianfei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Unit 77110 of People's Liberation Army, Shifang 618400, China)

Abstract: In order to obtain accurate aerial stitching images, this paper proposes a novel image mosaic method based on Binary Robust Invariant Scalable Keypoints (BRISK) feature of directed line segment, aiming to resolve incident scaling, rotation, changes in lighting condition, the low correct matching rate and low accuracy using conventional BRISK algorithm in image mosaic. This method firstly uses BRISK algorithm to match in order to acquire rough point matching. Secondly, it constructs directed line segments, describes them with BRISK feature, and matches those directed segments. The method is used to purified point matching based on statistical voting. Finally, weighted fusion and luminance equalization are used to image fusion to accomplish image mosaic. The experiment results show that the method has strong robustness and stability for lighting, rotation, resolution and scaling. The proposed method has high precision, and can achieve fine image mosaic results.

Key words: Image registration; Image mosaic; Binary Robust Invariant Scalable Keypoints (BRISK) feature; Nearest-neighbor line segments

1 引言

近年来,随着计算机技术的飞速发展,图像处

理技术也得到空前的提升,作为其重要组成部分的图像拼接已经广泛应用于图像压缩、虚拟现实、医学图像处理等领域。图像拼接主要分为图像预处理、图像配准和图像融合3个步骤^[1-3]。

图像配准技术是图像拼接的关键。其方法大体分为两类:基于灰度信息的配准方法和基于特征的配准方法。基于灰度的图像配准方法较为简单,直接计算图像间的灰度值关系来匹配图像,这种方法虽然简单、易实现,但其稳定性差,对光照变化敏

收稿日期:2016-04-05;改回日期:2016-10-11;网络出版:2016-12-02

*通信作者:刘晶红 liu1577@126.com

基金项目:吉林省重大科技攻关项目(11ZDGG001),国家林业公益性行业科研专项(201204515)

Foundation Items: The Key Science and Technology Project of Jilin Province (11ZDGG001), The Forestry Industry Scientific Research for National Public Welfare Projects (201204515)

感。相比之下,基于局部特征的方法具有良好的稳定性,在克服图像的光照、尺度、旋转等变化上比基于灰度的方法有更好的鲁棒性,是目前主流的图像配准方法^[4-9]。

SIFT(Scale Invariant Feature Transform)特征检测算法是 Lowe 于 1999 年提出并在 2004 年完善的,该算法对于尺度缩放、平移旋转、光照变化都具有良好的不变性,对于图像的仿射变换及噪声也具有一定的稳定性,但其描述算子复杂,运行时间过长,很难满足实时性要求^[10,11]。针对 SIFT 算法在低分辨率图像中出现的误匹配点对较多的问题,文献[12,13]引入一种有向线段匹配方法,能够有效的提高 SIFT 的匹配正确率,但其增加了算法的复杂度,运行时间较 SIFT 算法更长。BRISK(Binary Robust Invariant Scalable Keypoints)算法解决了 SIFT 算法在实时性方面的不足,极大的提高了匹配速度,但相较于 SIFT 算法,该算法的鲁棒性明显降低,误匹配率较高^[14,15]。

兼顾配准精度及运行时间,本文引入一种有向线段 BRISK 特征的图像配准算法。该算法通过构造有向线段 BRISK 特征的方法,充分利用图像细节信息,对匹配点进行精确定位,能够有效剔除误匹配点,提高配准的准确率和精度,同时,由于 BRISK 特征的提取匹配时间较短,本文增加的时间开销很少。实验表明本文算法匹配准确率高于 SIFT 算法和 BRISK 算法,运行时间远远小于 SIFT 算法,经过本文算法获得的遥感拼接图像无明显错位,拼接精度高。

2 BRISK 算法

BRISK 算法主要包含 3 步:角点检测、特征描述、特征匹配。首先,构建尺度空间金字塔,并通过 AGAST(Adaptive and Generic Accelerated Segment Test)角点检测算子提取连续尺度空间中亚像素级精度的稳定极值点。然后,利用局部图像邻域内随机采样点对的灰度大小关系来建立局部图像的二值特征描述子。最后,采用汉明距离进行特征匹配。

3 改进 BRISK 算法

本文针对 BRISK 存在的问题,对 BRISK 的匹配算法提出改进,首先采用 BRISK 算法进行基于特征的图像匹配,在寻找到匹配点对后,利用匹配点建立有向线段和线段特征进行邻近线段匹配,采用概率统计方法精确寻找正确的匹配点对,提高匹配精度,增强算法的鲁棒性和稳定性。

3.1 构造线段特征

对于参考图像 I 与待配准图像 I' ,使用 BRISK 算法进行粗配准,可得到 n 组匹配点对。

构造两组定向图形 $G = (V, E)$ 和 $G' = (V', E')$, 定义 $V = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 和 $V' = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ 分别是参考图像 I 与待配准图像 I' 匹配的特征点, E 和 E' 是定向图形 G 和 G' 的端点,这里 $E = \{(a_i, a_j), i < j\}$, $E' = \{(b_i, b_j), i < j\}$, 对于有向线段 e_{ij} (线段起点 a_i , 终点 a_j), 取 3 个采样点 (p_1, p_2, p_3) , 其计算公式为

$$\begin{cases} p_1 = a_i \\ p_2 = (a_i + a_j) / 2 \\ p_3 = a_j \end{cases} \quad (1)$$

提取 3 个点的 BRISK 特征描述 $S = (s_1, s_2, s_3)$, 作为有向线段的特征描述。 S 中的每一列为 BRISK 描述子。

3.2 邻近线段匹配

本文构造一种邻近线段匹配模型,假定在参考图像 I 和待配准图像 I' 中构造了 m 条有向线段,表示为 $L = [l_1, l_2, \dots, l_m]$ 和 $L' = [l'_1, l'_2, \dots, l'_m]$ 。记:有向线段 l_i 的特征描述为 S_i , 有向线段 l'_i 的特征描述为 S'_i 。

因为本文采用矩阵作为有向线段的特征描述,故计算矩阵的 F-范数进行邻近线段匹配,即: $d(l_i, l'_i) = \|S_i - S'_i\|_F$ 。得到长度为 m 的向量 d , 对 d 进行归一化,当 d_i 小于给定的阈值 T_F 时, l'_i 即为 l_i 的邻近线段。本文阈值 T_F 取 0.6。

定义向量长度为 m 的向量 K , K 中元素值计算方法如下:

$$K(i) = \begin{cases} 1, & l'_i \text{ 是 } l_i \text{ 的邻近线段} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $i = 1, 2, 3, \dots, m$ 。

3.3 特征点匹配

利用邻近线段匹配准则得到了有向线段的匹配,为了得到精确的拼接图像,有必要得到更精确的匹配点。对于给定的两幅图像的匹配点 $V = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 和 $V' = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$, 使用统计模型来获得匹配点的出现频率,从而进行点的匹配。

如果两条有向线段匹配,那么这两条线段的起点和终点是两对匹配点。首先建立统计矩阵 $G \in R^{2 \times m}$, G 的计算过程如下:

(1) 初始化空矩阵 $G \in R^{2 \times m}$ 。

(2) $i = 1, 2, 3, \dots, m$:

(a) 如果 $K(i) = 1$;

(b) 有向线段 l_i 是 $a_p \rightarrow a_q$, l'_i 是 $b_p \rightarrow b_q$, $G(1, i)$ 表示对应点对 (a_p, b_p) , $G(2, i)$ 表示对应点对 (a_q, b_q) ;

(c) $G(1, i) = G(1, i) + 1, G(2, i) = G(2, i) + 1$ 。

(3) 输出矩阵 G 。

矩阵 G 中元素为每对匹配点出现的频数, 由此可以得到每对匹配点的频率矩阵 F :

$$F(p, q) = \frac{G(p, q)}{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^m G(i, j)}, p = 1, 2, q = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

对于给定的阈值 T_p , 如果 $F(p, q) > T_p$, 即选取

为匹配点对。 T_p 值取值越小, 则保留匹配点数越多, 同时可能保留误匹配点, T_p 值取值越大越能够有效地剔除误匹配点, 但是匹配点对数会相对减少。如图 1 所示。

通过大量实验, $T_p = 0.0025$ 时, 能够有效地剔除误匹配点, 同时能够保留足够的匹配点, 故本文 T_p 取值为 0.0025。

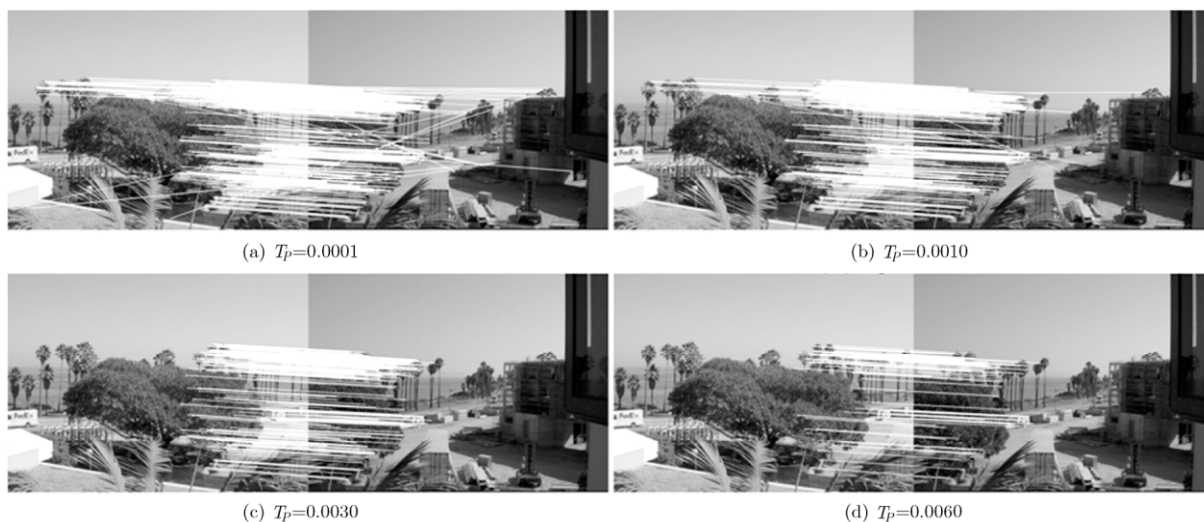


图 1 T_p 值对匹配的影响

利用经典 BRISK 算法匹配图像后, 易产生大量误匹配点对。本文通过构造有向线段的方法, 充分利用匹配点间的图像信息, 能够有效地剔除误匹配点对。如图 2 所示, (a, b, c) 与 (a', b', c') 是参考图像与待配准图像中的 3 组匹配点对, 其中, (b, b') 为一组误匹配点对。分别在两幅图像中利用本文算法构造有向线段 l_1, l_2, l_3 和 l'_1, l'_2, l'_3 。 d, e, f 分别为有向线段 l_1, l_2, l_3 的中点, d', e', f' 分别为有向线段 l'_1, l'_2, l'_3 的中点。由图 2 可以看出 (d, d') 与 (f, f') 在图像中的位置不同, 像素点周围的图像信息差异较大, (e, e') 点在图像中的位置一致, 其周围的纹理信息相同。故以两端点及中点的 BRISK 特征作为有向线段描述进行邻近线段匹配时, l_2 和 l'_2 能够有效地进行匹配, l_1, l_3 和 l'_1, l'_3 由于特征差异较大, 不能够进行匹配, 从而误匹配点对 (b, b') 得以剔除。

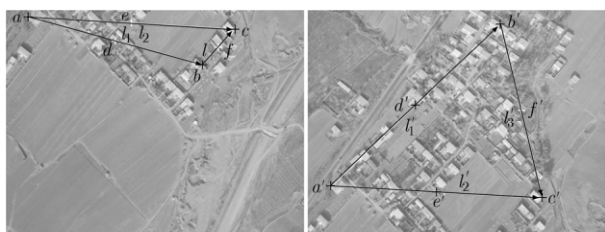


图 2 误匹配点剔除

4 图像拼接及融合算法

在获得两幅图像的精确匹配特征点对后, 由式 (4) 图像变换关系可以求解出变换矩阵 H , 将待配准图像 I' 通过 H 进行变换后与参考图像 I 进行叠加。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 & h_2 \\ h_3 & h_4 & h_5 \\ h_6 & h_7 & h_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, (x', y') 和 (x, y) 是待配准图像 I' 和参考图像 I 的匹配点对。

由于输出图像存在亮度等方面的差异, 在完成图像配准叠加后, 在得到的拼接图像上一般会存在明显的缝合线, 不利于视觉观察, 本文可以采用加权平滑算法来实现两幅图像间的融合过渡^[16]。融合方法如下:

$$f(x, y) = \begin{cases} f_1(x, y), & (x, y) \in R_1 \\ d_1 f_1(x, y) + d_2 f_2(x, y), & (x, y) \in R_2 \\ f_2(x, y), & (x, y) \in R_3 \end{cases} \quad (5)$$

式中, R_1 为图像 1 的非重合区域, R_3 为图像 2 的非重合区域, R_2 为两幅图像的重叠区域, d_1 和 d_2 分别为加权值, 与重叠区域有关, 并且: $d_1 + d_2 = 1$,

$0 < d_1 < 1$, $0 < d_2 < 1$ 。在重叠区域, d_1 由 1 平滑变到 0, d_2 由 0 平滑变到 1, 这样就实现了两幅图像的融合。

5 实验结果及分析

本文基于改进的BRISK算法图像拼接流程如图3所示。

针对本文提出的改进BRISK算法, 采用了大量图像进行实验, 并将本文算法与BRISK算法、SIFT算法进行比较, 对其匹配性能和拼接精度进行了定量评价与分析。

5.1 运行环境

算法运行环境为: CPU为Intel core i5, 3.20 GHz, 内存为4 GB的PC机, 32位Win7操作系统, Matlab版本为Matlab 8.1.0.604(R2013a)。

5.2 评价指标

本文采用3个参数对实验结果进行综合评价。

(1)采用运行时间对匹配速度进行评价。

(2)采用一种客观评价指标——匹配正确率CMR (Correct Matching Rate), CMR值越大, 匹配性能越好, CMR 定义为

$$CMR = N_c / N \quad (6)$$

式中, N 为所有匹配点对数, N_c 为匹配正确点对数。

(3)采用均方根误差RMSE (Root Mean Square Error)进行参考图像与待配准后图像之间的距离度量, 两者距离越小, 则RMSE 的值越大, 说明精度越低, 拼接效果越差, 反之, 拼接效果越好。RMSE 计算公式如式(7):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \|(x_i, y_i) - f(x'_i, y'_i)\|^2} \quad (7)$$

式中, M 为监测点总数, (x'_i, y'_i) 为待配准图像中监测点的坐标, (x_i, y_i) 为参考图像中监测点的坐标, $f(\bullet)$ 为仿射变换模型。

5.3 配准性能评价

图4 为实验图像, 分别对本文算法的抗光照、抗旋转、分辨率低、及抗尺度变化性能进行测试, 并且与 BRISK 算法和 SIFT 算法进行对比。图4 中各图像对大小为 748×534 像素、696×524 像素、710×536 像素、708×410 像素。

表1 给出使用 BRISK 算法、SIFT 算法和本文算法对上述 4 组图像进行配准实验的正确匹配点对数、匹配正确率及算法运行时间。表2 给出本文算法的各个步骤的耗时。

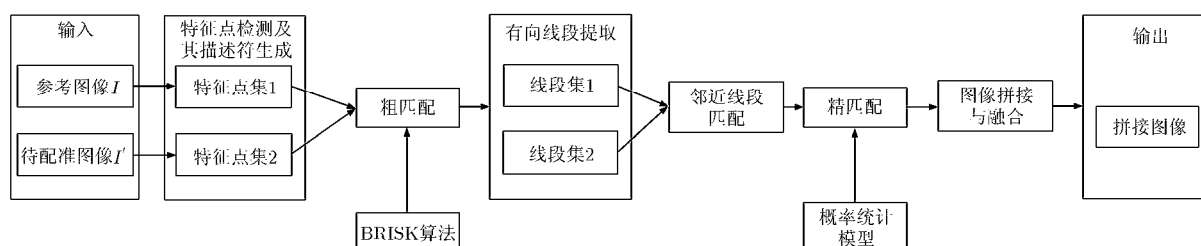


图3 图像拼接流程图



图4 测试图像

表 1 3 种方法的匹配结果对比

图像 编号	方法	匹配点 对数	正确点 对数	CMR(%)	时间 (s)
图 4(a)	BRISK	145	132	91.03	0.0612
	SIFT	164	162	98.78	2.5837
	本文 方法	113	113	100	0.2773
图 4(b)	BRISK	166	141	84.93	0.0435
	SIFT	189	184	97.35	2.9909
	本文 方法	130	128	98.46	0.3732
图 4(c)	BRISK	35	25	71.42	0.1023
	SIFT	38	31	81.58	1.7813
	本文 方法	15	15	100	0.1146
图 4(d)	BRISK	129	118	91.47	0.0459
	SIFT	213	210	98.59	5.5589
	本文 方法	99	99	100	0.1937

表 2 本文算法时间分析(s)

图像编号	图 4(a)	图 4(b)	图 4(c)	图 4(d)
粗匹配	0.0612	0.0435	0.1023	0.0459
有向线段及特征	0.1641	0.2504	0.0093	0.1122
精匹配	0.0520	0.0793	0.0030	0.0356
总运行时间	0.2773	0.3732	0.1146	0.1937

由表 1 比较可以看出,本文算法对图像的光照变化、旋转、分辨率低及尺度变化都有较强的鲁棒性和稳定性。相较与 BRISK 算法,虽然本文算法运行时间略长,但匹配正确率获得极大的提高。相较与 SIFT 算法,本文算法获取的匹配特征点数略少,但运行时间大大减少,匹配正确率也有所提高。

由表 2 可以看出,本文算法相较与 BRISK 算法增加的时间消耗主要集中在有向线段的构造与特征提取部分,且增加的时间与 BRISK 算法中的匹配点对数有关,增加的时间消耗与匹配点对数成二次方关系,这是因为提取的有向线段数为 $n(n-1)/2$, n 为粗匹配点对数。虽然本文算法较 BRISK 算法用时增加,但精度大大提高,同时算法时间仍远远少于 SIFT 算法用时。

均衡时间与精度两方面,本文算法较前两种算法更具优越性。

5.4 图像拼接结果

分别不同的图像配准算法对图像进行拼接,放大拼接边缘,拼接结果如图 5 所示,图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)分别为 BRISK 算法、SIFT 算法、本文方法的拼接图像,图 5(d)、图 5(e)、图 5(f)为上述 3 种方法的拼接边缘放大图像,即图中标注区域。由图 5(d)可以看出,BRISK 算法拼接图像精度最差,有明显错位,由图 5(e)可以看出,SIFT 算法拼接图像精度良好,明显错位较少,拼接精度较 BRISK 算法

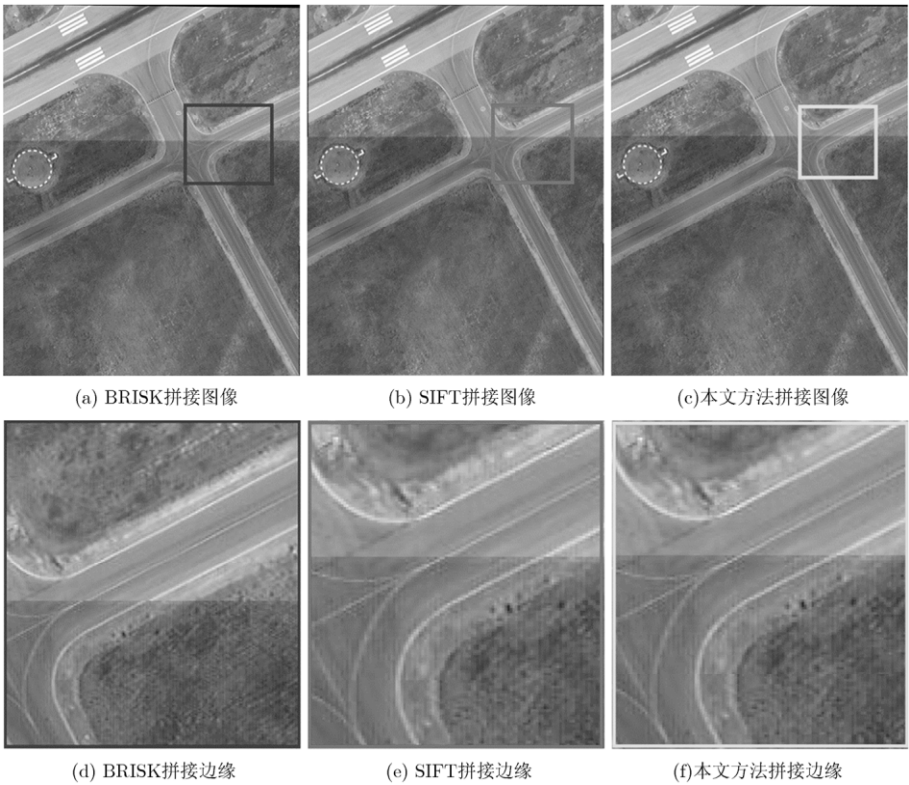


图 5 图像拼接比较

有很大提高,图 5(f)可以看出,本文算法无明显的接缝,拼接精度较前两种算法均有显著提高。

最后,针对两图像亮度差异产生的明显接缝,采用如前所述的加权平滑算法对图像进行处理,得到亮度变化均匀,无明显接缝,无鬼影,保真度高的拼接图像,如图 6 所示。



图 6 拼接图像

6 结论

针对基于 BRISK 的拼接算法误匹配率高、拼接精度低的问题,本文提出一种全新的基于有向线段 BRISK 特征的图像拼接方法,并与 BRISK 算法和 SIFT 算法进行对比。首先利用 BRISK 算法进行粗匹配,再利用匹配点构造有向线段及其特征,采用邻近线段匹配法及概率统计模型进行特征点的精确匹配,最后利用加权融合算法和亮度均衡化实现图像的融合拼接。实验结果表明,本文算法对于图像拼接中经常出现的光照强度差异、角度旋转、分辨率低及尺度变化等问题都具有较强的鲁棒性和稳定性。相较于 BRISK 算法,本文算法能够有效地剔除误匹配点,提高匹配正确率,为图像拼接提供更为准确的变换模型,因此,本文算法的拼接精度较 BRISK 算法更高。相较于 SIFT 算法,本文算法精度有所提高,但运行时间大大减少。综合权衡时间及精度两方面,本文算法较上述两种算法更具优越性。综上所述,本文提出了一种耗时短、精确度高、拼接效果良好的图像拼接方法。

参 考 文 献

- [1] GHOSH D and KAABOUC N. A survey on image mosaicing techniques[J]. *Journal of Visual Communication & Image Representation*, 2015, 34(C): 1-11. doi: org/10.1016/j.jvcir.2015.10.014.
- [2] 张宝龙, 李洪蕊, 李丹, 等. 一种针对车载全景系统的图像拼接算法的仿真[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(5): 1149-1153. doi: 10.11999/JEIT141185.
- [3] ZHANG Baolong, LI Hongrui, LI Dan, *et al.* A simulation of image mosaic algorithm based on vehicle panorama system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(5): 1149-1153. doi: 10.11999/JEIT141185.
- [4] XIE X, XU Y, LIU Q, *et al.* A study on fast SIFT image mosaic algorithm based on compressed sensing and wavelet transform[J]. *Journal of Ambient Intelligence & Humanized Computing*, 2015, 6(6): 835-843. doi: org/10.1007/s12652-015-0319-2.
- [5] 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. doi: 10.3788/OPE.20132111.2960.
- [6] YU Xianchuan, LÜ Zhonghua, and HU Dan. Review of remote sensing image registration technique[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2960-2972. doi: 10.3788/OPE.20132111.2960.
- [7] AGHAJANI K, YOUSEFPOUR R, SHIRPOUR M, *et al.* Intensity based image registration by minimizing the complexity of weighted subtraction under illumination changes[J]. *Biomedical Signal Processing & Control*, 2016, 25: 35-45. doi: org/10.1016/j.bspc.2015.10.009.
- [8] 赵春阳, 赵怀慈. 多模态鲁棒的局部特征描述符[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5): 1474-1483. doi: 10.3788/OPE.20152305.1474.
- [9] ZHAO Chunyan and ZHAO Huaici. Multimodality robust local feature descriptors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1474-1483. doi: 10.3788/OPE.20152305.1474.
- [10] 颜雪军, 赵春霞, 袁夏. 一种鲁棒的基于图像对比度的局部特征描述方法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(4): 882-887. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00846.
- [11] YAN Xuejun, ZHAO Chunxia, and YUAN Xia. A robust local feature descriptor based on image contrast[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(4): 882-887. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00846.
- [12] WANG Weixing, CAO Ting, LIU Sheng, *et al.* Remote sensing image automatic registration on multi-scale harris-laplacian[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2015, 43(3): 501-511. doi: org/10.1007/s12524-014-0432-2.
- [13] LOWE D G. Object recognition from local scaleinvariant features[C]. *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Vision*, Corfu, Greece, ICCV, 1999, 2: 1150-1157.
- [14] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant key points[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110. doi: org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
- [15] CALONDER M, LEPETIT V, STRECHA C, *et al.* BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features[C]. *European Conference on Computer Vision*, Springer Berlin Heidelberg, Germany, 2010: 778-792. doi: org/10.1007/978-3-642-15561-1_56.

- [12] LEUTENEGGER S, CHLI M, and SIEGWART R Y. BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints[C]. International Conference on Computer Vision, Barcelona, Spain, 2011: 2548-2555. doi: org/10.1109/ICCV.2011.6126542.
- [13] KASHIF M, DESERNO T M, HAAK D, *et al.* Feature description with SIFT, SURF, BRIEF, BRISK, or FREAK? A general question answered for bone age assessment[J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2015, 68: 67-75. doi: org/10.1016/j.compbiomed.2015.11.006.
- [14] ZHU Jun and REN Mingwu. Image mosaic method based on SIFT features of line segment[J]. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2014, 2014(6): 926312. doi: org/10.1155/2014/926312.
- [15] ZHAO Chunyang, ZHAO Huaici, LÜ Jinfeng, *et al.* Multimodal image matching based on multimodality robust line segment descriptor[J]. *Neurocomputing*, 2016(177): 290-303. doi: org/10.1016/j.neucom.2015.11.025.
- [16] 黄立勤, 陈财淦. 全景图拼接中图像融合算法的研究[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(6): 1292-1298. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01220.
- HUANG Liqin and CHEN Caigan. Study on image fusion algorithm of panoramic image stitching[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(6): 1292-1298. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01220.
- 董 强: 男, 1989 年生, 博士生, 研究方向为遥感图像拼接技术.
- 刘晶红: 女, 1967 年生, 研究员, 研究方向为机载光电成像测量设备.
- 王 超: 男, 1983 年生, 工程师, 研究方向为无人机技术.
- 周前飞: 男, 1989 年生, 博士生, 研究方向为航空光电成像畸变校正技术.