

文章编号 1004-924X(2016)05-1197-09

## 基于区域分块与尺度不变特征变换的图像拼接算法

李玉峰<sup>1</sup>, 李广泽<sup>2\*</sup>, 谷绍湖<sup>3</sup>, 龙科慧<sup>2</sup>

- (1. 沈阳航空航天大学 电子信息工程学院, 辽宁 沈阳 110136;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
3. 长沙航空职业技术学院, 湖南 长沙 410124)

**摘要:**针对图像匹配算法计算量大, 实时性差的问题, 提出了一种基于区域分块与尺度不变特征变换(SIFT)相结合的图像拼接算法。该算法利用图像能量的归一化互相关系数快速分割出匹配图像与待匹配图像间的相似区域, 利用 SIFT 算法在重叠区域中搜索出能用于匹配的图像特征点并实现快速精确配准。然后, 通过对图像进行了几何校正和图像融合来实现图像序列间的无缝拼接。实验结果表明, 该算法减少了传统 SIFT 算法的大量无用搜索, 改善了图像的几何失真, 降低了算法复杂度, 提高了图像匹配的速度, 在保证 90% 以上的匹配准确率的基础上, 计算时间较传统 SIFT 算法减少了近 50%。提出的算法可准确、快速地实现有形变和尺度变换图像的无缝拼接。

**关键词:**尺度不变特征变换(SIFT); 区域分块; 图像匹配; 图像拼接; 归一化互相关

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162405.1197

## Image mosaic algorithm based on area blocking and SIFT

LI Yu-feng<sup>1</sup>, LI Guang-ze<sup>2\*</sup>, GU Shao-hu<sup>3</sup>, LONG Ke-hui<sup>2</sup>

- (1. School of Electronics and Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
  2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
  3. Changsha Aeronautical Vocational and Technical College, Changsha, 410124)
- \* Corresponding author, E-mail: lgzandrew@tom.com

**Abstract:** For a large amount of calculation and poor real-time performance of image matching algorithms, this paper proposes a novel image mosaic algorithm based on area blocking and Scale Invariable Feature Transformation (SIFT). This algorithm uses a normalized cross-correlation coefficient from the image energy to search the similar region between the reference image and the image to be matched, and then it takes the SIFT algorithm to extract image feature points in a overlapped region to implement the rapid and accurate image registration. Finally, it performs the image geometry adjustment and image fusion to get a seamless image. The experimental results show that the algorithm reduces the large number of useless search of the traditional SIFT algorithm,

收稿日期: 2015-06-30; 修订日期: 2015-08-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61171081); 辽宁省自然科学基金资助项目(No. 2013024008); 中航工业航空科学基金资助项目(No. 20122654004)

overcomes the image geometric distortion, lowers algorithm complexity, and improves the speed of image matching. With ensuring the accuracy of image matching over 90%, its computation time has decreased by nearly 50% than that of the traditional SIFT algorithm. In conclusion, the algorithm implements accurately and rapidly seamless mosaicking for the images with deformation and scale transform.

**Key words:** Scale Invariable Feature Transformation(SIFT); area blocking; image matching; image mosaic; normalized cross correlation

## 1 引言

图像拼接是将相互有重叠区域的图像进行配准、融合,从而得到一幅大视野,高分辨率的新图像。图像拼接的主要步骤分为图像预处理、图像匹配和图像融合,核心过程为图像匹配,即确定两幅图像中的重叠位置,匹配的精确性将直接决定拼接成功与否。匹配精度高、速度快的匹配算法在红外遥感、模式识别等众多领域都具有十分重要的意义<sup>[1-2]</sup>。

当前,图像匹配算法主要有基于灰度相关和基于特征的两类算法。前者对图像旋转、尺度缩放等不稳定,而基于局部不变特征的算法对多种图像变换具有较好的适应性而逐渐成为研究热点,相关理论的研究取得快速发展,相继提出了 MORAVEC 算法、Harris 算法、SURF 算法等等<sup>[4-5]</sup>。

2004 年,加拿大学者 David G. Lowe 总结并正式提出了 SIFT (Scale Invariable Feature Transform)算法<sup>[6]</sup>,该算法对图像旋转、缩放和尺度变换等具有很好的鲁棒性,逐步成为基于特征点匹配算法的研究热点<sup>[7-8]</sup>。但该算法最大的缺点是计算复杂,难以满足工程实际中实时性的要求<sup>[9]</sup>。针对这一问题,国内外学者做了一系列的研究<sup>[9-13]</sup>,如 Mikolajczyk<sup>[10]</sup>提出的一种扩展 SIFT 算法 GLOH (Gradient Location and Orientation Histogram),国内学者何宾<sup>[11]</sup>等提出的 F-SIFT 算法等。总的来说,大部分改进都集中在 SIFT 算法的性能方面,但 SIFT 算法性的复杂性仍然很高,难以很好地应用于工程实际。

本文提出了一种基于区域分块与 SIFT 特征的图像拼接算法,能够准确、快速、稳定地实现有

形变、尺度变换图像的无缝拼接。该算法可以在保证图像匹配准确率的前提下,减小图像的几何失真,提高图像的匹配速度。

## 2 图像拼接的总体框架

图像拼接的整体流程包括图像获取、预处理、图像配准、图像融合等环节,具体流程如图 1。

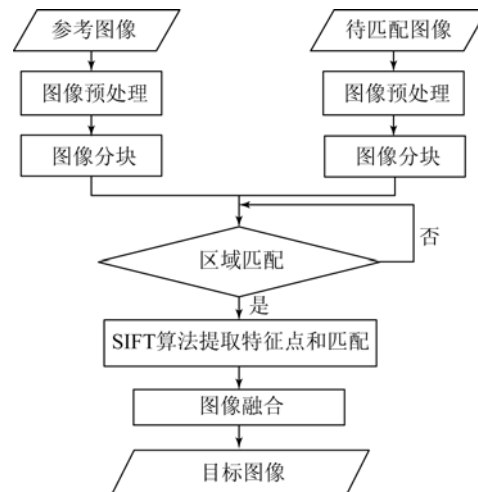


图 1 图像拼接的整体流程图

Fig. 1 Flowchart of image mosaic

第一步,图像预处理。由于不同的图像获取方式对图像质量造成的干扰不同,因此首先需采取相应的预处理操作;第二步:图像配准。这是图像拼接算法中最关键的步骤,也是本文研究的重点。本文将图像配准分为两部分:图像分块匹配和 SIFT 特征点检测与匹配。本文主要思想是通过先搜索出两幅图像的相似区域,然后利用 SIFT 算法实现特征点的检测与匹配,以提高 SIFT 算法的搜索效率;再对图像进行几何校正;最后,进行图像融合、重构,得到无缝拼接的图像。

### 3 图像 SIFT 特征点匹配

图像匹配的目的是利用某种度量标准确定匹配图像和待匹配图像的对应关系,从而求出两幅图像的变换参数,将来自不同视角、不同传感器的具有重叠场景的两幅或多幅图像变换到同一坐标系下。

#### 3.1 SIFT 特征匹配

SIFT 算法利用图像尺度空间理论进行特征点集的提取,对图像旋转、噪声等都具有很好的鲁棒性,主要步骤有<sup>[2-3]</sup>:利用图像金字塔和高斯差分初步找出图像极值点;剔除低对比度和边缘处的极值点;根据邻域内的像素进行关键点描述,生成特征向量;利用特定度量标准进行特征点匹配。

#### 3.2 检测尺度空间的极值点

图像尺度空间理论的基本思想为:引入一个尺度空间因子的参数,通过连续变化该尺度参数来获得不同尺度空间的图像序列,对这些序列的图像进行主轮廓的提取,并以该轮廓作为特征向量实现边缘、角点和不同分辨率上的特征提取。

一幅二维图像  $I(x, y)$  的尺度空间  $L(x, y, \sigma)$  可以表示为  $I(x, y)$  与高斯卷积核  $G(x, y, \sigma)$  的卷积和,即:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) \otimes I(x, y), \quad (1)$$

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (2)$$

其中  $\sigma$  为尺度空间因子。为有效地检测出图像特征点的位置,在尺度空间中,建立高斯差分尺度空

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2}, \quad (6)$$

$$\theta(x, y) = \arctan\left[\frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)}\right]. \quad (7)$$

直方图统计得到的特征点邻域像素点的梯度方向的峰值所在方向就代表该特征点的主方向。

#### 3.5 生成关键点描述子

先将坐标轴旋转为关键点的方向,再选取  $16 \times 16$  的像素区域,并且将该邻域分成  $4 \times 4$  的子区域,计算每个子区域 8 个方向的梯度信息,生成具有独特性的向量。因此每个关键点的描述子为  $4 \times 4 \times 8 = 128$  维向量,该特征向量是此区域图像信息的一种抽象,具有唯一性。

生成特征点的特征向量后,利用最近邻和次近邻算法,比较特征点的欧氏距离<sup>[14]</sup>,在某阈值

间(Difference of Gaussian, DOG),即相邻两尺度空间函数之差  $D(x, y, \sigma)$ :

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma). \quad (3)$$

$k$  为相邻两个尺度间的比例因子。为检测尺度空间的极值,需要令 DOG 尺度空间中间层的每个像素跟其同层相邻的 8 个像素点及上、下两侧的各 9 个相邻像素点共 26 个点进行比较,以确保尺度空间和 2 维图像空间都检测出极值点,这些局部极值点即为尺度空间的图像极值点。

#### 3.3 去除不稳定的特征点

得到图像极值点后,为得到精确的关键点位置,对尺度空间  $D(x, y, \sigma)$  进行曲线拟合,得到其二次 Taylor 展开式为:

$$D(X) = D + \frac{\partial D^T}{\partial X} X + \frac{1}{2} X^T \frac{\partial^2 D}{\partial X^2} X. \quad (4)$$

对上式求导并让方程等于零,可得:

$$D(\hat{X}) = D + \frac{1}{2} \frac{\partial D^T}{\partial X} \hat{X}. \quad (5)$$

根据参考文献[6],在  $|D(\hat{X})| < 0.03$  时,图像易受噪声的干扰而不稳定,故取 0.03 为剔除阈值。设定阈值  $r$ ,利用特征点处的 Hessian 矩阵,若主曲率满足  $\frac{\text{tr}(H)^2}{\det(H)} < \frac{(r+1)^2}{r}$ ,则保留关键点,反之剔除。

#### 3.4 为关键点指定方向

为关键点指定方向是 SIFT 算法中的关键步骤,利用特征点邻域像素的梯度模值与方向,确保描述符具有旋转不变性,该描述公式为:

范围内的点即可作为图像的匹配点。

## 4 基于区域分块与 SIFT 特征的图像拼接算法

SIFT 算法对旋转、尺度变换等都具有很好的鲁棒性,3.3、3.4 部分的耗费时间较长且占用整个算法时间的 80% 以上<sup>[15]</sup>,尽管众多学者不断对其进行改进,但仍不能完全满足工程中实时性的要求。根据 Brown 理论,大部分匹配方法都是特征空间、相似性度量、搜索空间和搜索策略这 4

个关键要素的提高与组合<sup>[16]</sup>。为缩短图像特征点检测和匹配时间,本文针对传统 SIFT 算法在无效区域耗费了较多时间的缺点,提出了一种新的搜索策略——基于区域分割的 SIFT 匹配算法。

#### 4.1 区域分块

通过分析 SIFT 算法的搜索特征点过程和匹配过程,可以知道:只有分布在重叠区域的特征点才是用于匹配的有用特征点,因此传统的 SIFT 算法对图像区域进行搜索的策略将大大增加算法的运算时间。

将匹配图像均匀分为  $n$  小块,每块区域特征点的提取时间为  $t = t_s/n$ ,在待匹配图像子块中搜索与匹配图像中具有最多相似特征点子块的过程称为单边分块法则。一般场景中,用于拼接图像序列中相邻图像的相似比例不低于 40%<sup>[2,17]</sup>。因此,为节省在无用区域的搜索时间,可以将参考图像和待匹配图像分为 4 等份(如图 2),对两幅图中的不同区域,分别求出相关性系数最大的区域即为相似区域,用于特征点的选取与匹配。这样可以大大缩短传统 SIFT 算法在无效区域搜索所消耗的时间,且提高匹配精度。

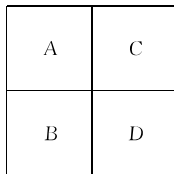


图 2 分块示例图

Fig. 2 Framework of area blocking

由图 2 可以看出,假设图像中符合条件的特征点为均匀分布,传统 SIFT 算法提取一幅图像特征点的时间为  $t_s$ ,则搜索两幅图像特征点的总时间  $t = 2t_s$ 。在确定相似区域后,搜索出参考图像和待匹配图像中相似区域特征点的总时间为:

$$t = \frac{t_s}{4} + \frac{t_s}{4} = \frac{t_s}{2} \ll 2t_s. \quad (8)$$

由上式可知,分块搜索策略利用 SIFT 算法搜索、描述关键点的时间仅为传统算法的 1/4。因此,若能快速判断出参考图和待匹配图的相似区域,则基于分块的 SIFT 匹配算法的时间将大大缩短,这部分将在后面进行论述并在实验数据中具体验证。

#### 4.2 区域相关性度量

若要在参考图像和待匹配图像的不同块中,确定相似区域最大的块,则相关性的度量标准就显得尤为必要了。

通过比较不同的匹配算法可知,归一化积相关算法对图像噪声、光照等都不敏感,具有很好的鲁棒性和精准性,经过众多学者的不断研究改进,已取得了很好的研究成果<sup>[18-19]</sup>。假设参考图像和待匹配图像都均分为 4 部分,每部分的大小为  $M \times N$ ,则相应的归一化互相关系数(Normalized Cross-Correlation, NCC)为:

$$\rho(r, c) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (g_{ij} - \bar{g})(f_{ij} - \bar{f})}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (g_{ij} - \bar{g})^2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f_{ij} - \bar{f})^2}}. \quad (9)$$

式中: $g, f$  分别代表参考图像、待匹配图像; $\bar{g}, \bar{f}$  分别代表对应区域的像素平均值。整理该式可得如下形式<sup>[18]</sup>:

$$\rho(r, c) = \frac{S_{gf} - S_g S_f / MN}{\sqrt{(S_{gg} - S_g^2 / MN)(S_{ff} - S_f^2 / MN)}}, \quad (10)$$

式中:

$$\begin{aligned} S_{gf} &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g_{ij} f_{ij}, \\ S_{ff} &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f_{ij}^2, \\ S_f &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f_{ij}, \\ S_{gg} &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g_{ij}^2, \\ S_g &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g_{ij}. \end{aligned}$$

上述各式中, $S_{gf}, S_f, S_{gg}$  和  $S_g$  统一称为图像的能量。综上所述,要快速搜索出两幅图像的相似区域,只需要提高归一化积相关系数  $\rho(r, c)$  的求取速度即可。而该过程的算法已经非常成熟,如参考文献<sup>[18]</sup>是其中较为经典的算法之一,此处便不再赘述。

图像能量是图像的一种固有属性,具有唯一性和鲁棒性。不同区域块的图像能量差值越小,说明两块区域的相似度越高,把该区域作为有效区域进行图像特征点的提取和匹配,将减少无效特征点的提取时间,并提高有效特征点的正确匹配率。

### 4.3 图像几何校正

拍摄图像时,图像传感器的运动方式决定了不同图像将具有不同特征,通常表现为明显位移、旋转和尺度变换等情况。为实现图像的无缝拼接,必须对图像进行坐标变换,即将两幅图像变换到同一坐标系上。

图像传感器在某些特定运动模式下获得的图像上的像素坐标系之间的关系可由图像之间的变换模型确定。图像之间的变换模型则主要有刚体变换、仿射变换和投影变换。变换模型的选择与图像变形特性有关,投影变换考虑了所有的运动模式,其变换模型为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

根据匹配的图像点对,便可求出两幅图像的变换矩阵  $\mathbf{H}$ ,通过投影变换便可达到几何校正的目的。

### 4.4 图像融合

针对大场景的多幅源图像序列拼接生成的图像,需要利用图像融合方法对缝合重叠区的边缘进行处理。设两幅图像的重叠区域分别为  $A$  和  $B$ ,“淡入淡出”融合算法利用加权方法对图像进行融合的原理为:

$$I(x, y) = \begin{cases} I_1(x, y), & (x, y) \in I_1 \\ A(x, y) \times (1 - \mu) + B(x, y) \times \mu, & (x, y) \in (I_1 \cap I_2) \\ I_2(x, y), & (x, y) \in I_2 \end{cases}. \quad (12)$$

其中: $A$  和  $B$  分别为参考图像、待匹配图像的重叠区域, $\mu$  为加权系数。重叠区域的宽度为  $d$ ,当生成的全景图从左至右过渡时, $\mu$  的取值由  $0 \rightarrow 1$ ,从而实现了重叠区域的均匀过渡,达到无缝拼接的效果。

## 5 实验结果与分析

本文从算法鲁棒性检验、区域分块可行性、时间效率 3 部分进行了仿真实验,对多组图像进行了运算仿真以验证算法性能。

### 5.1 实验条件

CPU: Intel (R) Core (TM) i5-3470; 主频: 3.20 GHz; 软件平台: MATLAB7.11 (R2010b),

32 bit; 原始图像大小为 500 pixel  $\times$  500 pixel。

### 5.2 本文算法鲁棒性检验

由于获取照片的过程中,会经常发生噪声、平移、旋转和尺度变换等情况,为此本文对上述情况做了测试性实验,来验证本文算法的鲁棒性。部分实验截图及数据如下。

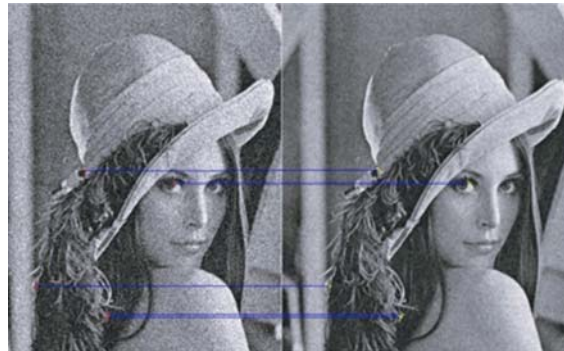


图 3 高斯白噪声攻击后的匹配图  
Fig. 3 Matching result of image attacked by Gauss white noise



图 4 旋转后的匹配图  
Fig. 4 Matching results of image after rotation

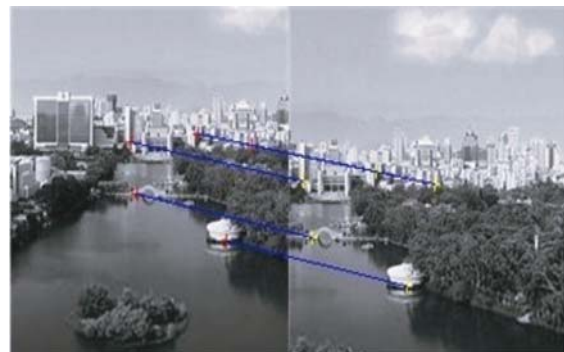


图 5 上下位移的匹配图  
Fig. 5 Matching results of image with translation

从上述结果可以看出,本文算法在不同干扰

下,仍具有很好的鲁棒性。因此在确定出匹配和待匹配图像块后,能稳定地检测出用于匹配的特征点。

### 5.3 区域分块相关性验证

为验证本文提出的基于能量的图像分块原理的准确性,本文针对 100 组图像进行了相关测试,并与区域内的平均灰度值进行了比较。仅取试验中的一组图像,按照本文提出的四等分区域分块法则,将参考图像和待匹配图像分块,结果如图 6 所示。

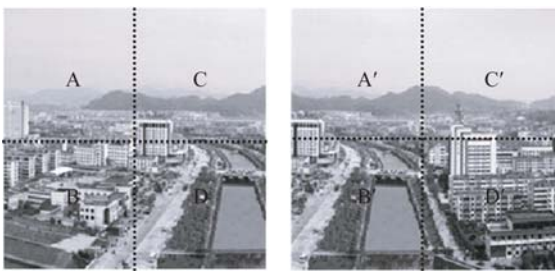


图 6 分块示例图

Fig. 6 Diagrams of area blocking

为验证本文基于能量的归一化积向量度量标准的精确性,试验利用传统的区域灰度平均值作为辅助验证方法,结果如图 7 所示。

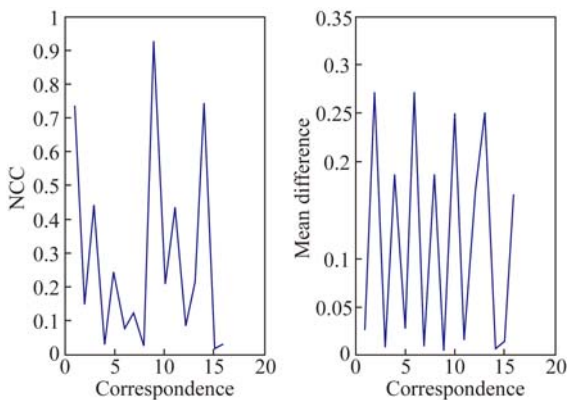


图 7 区域相似度测量图

Fig. 7 Experiment of area similarity

图中横坐标对应关系数值依次代表已分块的匹配和待匹配图像中的  $A-A', A-B', \dots, B-A', B-B', \dots$ ;左图纵坐标代表对应块的归一化系数,右图纵坐标为对应块的像素灰度值的均值差。

归一化积系数越大的区域相似度越高,此时

灰度值和的差值应该最小<sup>[20]</sup>。在图 6 中,归一化系数最大的两个值 0.934 6、0.764 0 分别对应于 9、14 配对块,与均值差最小的两个值 0.003 1、0.005 2 对应的图像区域完全一致。第 9、14 对应于图 6 中的  $C-A', D-B'$ ,从图中可以看出,此区域正是两幅图像重叠最多的部分。

本文将 100 组图像分为 5 组(20 对/组)进行实验,并将归一化积系数与区域像素灰度值的均值差进行对比,数据统计如表 1 所示。

表 1 区域分块匹配情况统计表

Tab. 1 Statistics of image matching by area blocking

图像组	正确匹配数	正确匹配率/%
A	18	90
B	19	95
C	17	85
D	19	95
E	18	90
平均值	18.2	91

在表 1 中,在归一化积系数度量标准下,不同分块正确匹配的正确率达到了 90% 以上,是较为稳定的算法,能满足工程需求。

### 5.4 算法时间效率统计分析

在 4.1 节中,理论上分析了基于区域分割的 SIFT 算法的高效性,现将实验数据列表,如表 2 所示。

表 2 几种算法时间对比表

Tab. 2 Comparison of time-consuming for different methods

图像	传统 SIFT 算法	基于区域分块的算法		
		区域分块	相似区域匹配时间	总时间
A	2.977 9	0.308	0.854 6	1.162 6
B	2.473 0	0.508	0.985 9	1.493 9
C	3.368 6	0.506	1.056 2	1.562 2
D	2.394 2	0.316	0.978 4	1.294 4
E	3.795 4	0.277	1.002 3	1.279 3
均值	3.001 8	0.383	0.975 5	1.358 5

通过表 2 可以清晰看出,本文提出的基于区域分块的 SIFT 算法较传统 SIFT 算法的计算时间提高了 54.74%,大大改善了 SIFT 算法的运算复杂度。

### 5.5 图像拼接结果

为验证算法的适应性和鲁棒性,本文对多组具有重叠区域的图像进行了实验,鉴于篇幅限制,下面给出两组不同方法获取图像的实验结果。



(a) 航拍图像 1

(a)Aerial photograph 1



(b) 航拍图像 2

(b)Aerial photograph 2

图 8 2 幅航拍图像

Fig. 8 Two frames of aerial photographs



(a)手持相机拍摄图 1

(a)The first picture shot by hand-held camera



(b)手持相机拍摄图 2

(b)The second picture shot by hand-held camera

图 9 手持相机拍摄图

Fig. 9 Pictures shot by hand-held cameras

利用本文算法对以上两组图像进行拼接,拼接效果图分别如图 10、11 所示。



图 10 航拍图像的拼接图像

Fig. 10 Mosaic image of aerial photographs



图 11 手持相机的拼接图像

Fig. 11 Mosaic image of pictures shot by hand-held cameras

## 6 结 论

图像拼接是当前计算机视觉领域的研究热点,在遥感图像处理、远程监控、灾害预测等领域已有广泛的应用。本文针对图像匹配算法计算量大,实时性差的问题,利用图像能量的归一化积系

数快速搜索出图像的重叠区域,避免了传统 SIFT 算法对大面积无用区域的搜索,优化了搜索策略,降低了算法复杂度。实验结果表明,本文提出的

基于区域分块的 SIFT 匹配算法在保证 90% 以上的匹配准确率的基础上,计算时间较传统 SIFT 算法提高了近 50%,验证了算法的有效性。

#### 参考文献:

- [1] SU M S, WANG L, CHENG K Y. Analysis on multiresolution mosaic images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(7):952-959.
- [2] 杜京义,胡益民,刘宇程. 基于区域分块的 SIFT 图像匹配技术研究[实现][J]. *光电工程*, 2013, 40(8): 52-58.
- DU J Y, HU Y M, LIU Y CH. Research and implementation of matching technique of image based on SIFT algorithm of area blocking [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(8):52-58. (in Chinese)
- [3] 刘志文,刘定生,刘鹏. 应用尺度不变特征变换的多源遥感影像特征点匹配[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(8):2146-2153.
- LIU ZH W, LIU D SH, LIU P. SIFT feature matching algorithm of multi-source remote image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8): 2146-2153. (in Chinese)
- [4] 唐永鹤,陶华敏,卢焕章,等. 一种基于 Harris 算子的快速图像匹配算法[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2012, 37(4):406-409.
- TANG Y H, TAO H M, LU H ZH, *et al.*. A fast image matching algorithm based on Harris operator [J]. *Geometrics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(4):406-409. (in Chinese)
- [5] 曾峦,王元钦,谭久彬. 改进的 SIFT 特征提取和匹配算法 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(6): 1391-1397.
- ZENG L, WANG Y Q, TAN J B. Improved algorithm for SIFT feature extraction and matching[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6):1391-1397. (in Chinese)
- [6] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision (S0920-5691)*, 2004, 60(2): 91-100.
- [7] 许佳佳. 结合 Harris 与 SIFT 算子的图像快速配准算法[J]. *中国光学*, 2015, 8(4):574-581.
- XU J J. Fast image registration method based on Harris and SIFT algorithm [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4):574-581. (in Chinese)
- [8] 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):211-218.
- WANG X H, HUANG W, OUYANG J H. Real-time image registration of the multi-detectors mosaic imaging system [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 211-218. (in Chinese)
- [9] 邱男,李桂菊,魏雅娟. 采用 SIFT 的末制导图像匹配技术[J]. *红外激光工程*, 2011, 40(8):1499-1593.
- DI N, LI G J, WEI Y J. Image matching technology based on SIFT for terminal-guiding system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8):1499-1593. (in Chinese)
- [10] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. A performance evaluation of local descriptors [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(10):1615-1630.
- [11] LIU R, ZHANG J SH. Application of the extraction of the image feature points by improved SIFT algorithm [C]. *IEEE International Conference on Communications, Budapest, Hungary, June 9 - June 13, 2013*:946-949.
- [12] 李军民,王进戈,周文天. 基于相对位置不变性的 SIFT 高效匹配算法研究[J]. *四川大学学报:工程科学版*, 2013, 45(6):105-109.
- LI J M, WANG J G, ZHOU W T. Efficient matching algorithm of SIFT based on relative position invariance [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2013, 45(6):105-109. (in Chinese)
- [13] 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.
- HE B, TAO D, PENG B. High real-time F-SIFT image mosaic algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S2):440-444. (in Chinese)
- [14] 王灿进,孙涛,陈娟. 局部不变特征匹配的并行加速技术研究 [J]. *液晶与显示*, 2014, 29(2): 266-274.
- WANG C J, SUN T, CHEN J. Speeding up local invariant feature matching using parallel technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(2):266-274. (in Chinese)
- [15] 刘立,彭复员,赵坤,等. 采用简化 SIFT 算法实现快速图像匹配[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(1): 181-184.

- LIU L, PENG F Y, ZHAO K, *et al.*. Simplified SIFT algorithm for fast image matching [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 181-184. (in Chinese)
- [16] 汪松, 王俊平, 万国挺, 等. 基于 SIFT 算法的图像匹配方法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2013, 43(增刊): 279-282.
- WANG S, WANG J P, WAN G T, *et al.*. Image matching method based on SIFT algorithm [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2013, 43(Supp.): 279-282. (in Chinese)
- [17] 严大勤, 孙鑫. 一种基于区域匹配的图像拼接算法[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 749-755.
- YAN D Q, SUN X. Image mosaics algorithm based on area matching [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(6): 749-755. (in Chinese)
- [18] 韩冰, 王永明. 基于一种快速归一化积相关算法的图像匹配研究 [J]. 兵工学报, 2010, 31(2): 160-165.
- HAN B, WANG Y M. Research of image matching based on a fast normalized cross correlation algorithm [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(2): 160-165. (in Chinese)
- [19] 陈卫兵. 几种图像相似性度量的匹配性能比较[J]. 计算机应用, 2010, 30(1): 98-110.
- CHEN W B. Comparison of matching capabilities in similarity measurements [J]. *Journal of Computer Applications*, 2010, 30(1): 98-110. (in Chinese)
- [20] 韩冬松, 何昕, 魏仲慧, 等. 采用区域特征匹配的三维弹痕自动配准[J]. 液晶与显示, 2014, 29(5): 761-767.
- HAN D S, HE X, WEI ZH H, *et al.*. Automatic registration of 3-D bullet marks by matching regional features [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5): 761-767. (in Chinese)

#### 作者简介:



李玉峰(1969—),男,吉林德惠人,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为航空电子技术、图像处理与传输技术等。E-mail: li\_yufeng@126.com



李广泽(1976—),男,吉林长春人,硕士生导师,研究员,主要从事空间遥感相机嵌入式控制系统应用与视频图像处理方面的研究。E-mail: Lgzandrew@tom.com

(版权所有 未经许可 不得转载)