

基于 SIFT 算法的红外图像拼接方法改进^①

陆园园, 张 明

(上海海事大学 信息工程学院, 上海 201306)

摘 要: 针对红外图像拼接误匹配点过多、耗时过长等问题, 对基于 SIFT 算法的红外图像拼接方法进行改进. 首先利用高斯差分金字塔建立尺度空间, 然后利用 FAST 算法对高斯差分金字塔图像进行特征点提取, 提高了算法运行效率, 随后以特征向量的欧式距离作为特征点的相似性度量, 从而找到初始匹配点对, 并利用结合了方向一致性判断的 Ransac 算法剔除错误匹配点对, 最后用加权平衡算法实现图像的快速融合. 通过红外人物图像拼接实验, 证明改进后的算法在旋转、缩放、光照等情况下更稳定、效率更高, 有较大的理论和应用价值.

关键词: SIFT; 红外图像; Ransac; 图像拼接; 特征匹配

Improved Algorithm Based on SIFT Infrared Image Stitching Algorithm

LU Yuan-Yuan, ZHANG Ming

(College of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To solve the problems of long registration time and many wrong registrations in using the infrared image stitching algorithm. This paper improves the infrared image stitching algorithm which based on SIFT algorithm. Firstly, the improved algorithm uses the Gaussian difference pyramid to establish the scale space. Secondly, this algorithm uses FAST algorithm to extract the feature points from the Gaussian pyramid difference images. In order to find the initial matching point pairs, the method of this paper calculates the feature vectors distance to measure the similarity of feature points. Thirdly, RANSAC algorithm and direction consistency method are used to remove the wrong matching point pairs. Finally, this algorithm uses weighted average method to mosaic images. The result of the infrared image mosaic experiments shows that the improved method is more stable and more rapid.

Key words: SIFT; infrared images; Ransac; image stitching; feature matching

1 引言

图像拼接是目前数字图像处理和计算机视觉领域的研究热点, 已被广泛运用于目标识别、医学图像处理、遥感图像分析、图像检索等领域. 随着该拼接技术的应用领域不断扩展, 普通可见光图像已不能满足诸多应用需求, 此时红外成像技术因其具有抗干扰能力强、能昼夜连续探测、抗雷达干扰等优点而得到了广泛的运用, 在红外制导、红外地面跟踪、海上搜救等领域都发挥着巨大的作用, 所以研究红外图像拼接具有重要的意义.

国内外对图像拼接的研究已取得了不少的成果.

1996 年, Richard Szeliski 提出了基于运动的全景拼接模型^[1], 该方法首先利用 Levenberg-Marquardt 迭代非线性最小化方法求出图像间的几何变换参数, 然后通过所求得的参数进行图像配准. 该算法在处理具有旋转、平移等多种变换的待拼接图像方面效果好. 2004 年, Lowe 等人提出了对图像具有旋转、放射、光照不变的 SIFT 算法^[2], 降低了算法的复杂程度. 利用该算法提取图像的局部特征, 对视角变化、仿射变换、噪声也保持一定程度的稳定性, 该算法同时具有匹配精度高等优点. 2005 年, 侯舒维, 郭宝龙提出了一种图像自动拼接的快速算法^[3], 采用边缘信息阈值法提取基准

^① 基金项目: 国家自然科学基金(61171126); 上海重点支撑项目(12250501500)

收稿时间: 2014-12-09; 收到修改稿时间: 2015-01-12

特征块, 并采用金字塔式分层搜索策略搜索块, 该算法大大提高了图像拼接的精度和速度. 2007 年, 杨占龙等提出了基于兴趣点维泽尼克矩的图像拼接技术^[4], 利用 Harris 角检测器获取图像中的兴趣点通过比较兴趣点领域伪泽尼克矩的欧式距离来找到匹配对, 该算法对任意角旋转、平移、噪声等情况都具有鲁棒性, 由其对小尺度图像也有较好的拼接效果. 2010 年, 王书民等人对剪裁处理后的图像利用 SIFT 算法进行快速拼接, 尽量减少了人工操作, 实现自动拼接图像^[5]. 减少了图像的补拍, 同时阐明了 SIFT 特征点航拍序列图像拼接的高效性和鲁棒性.

以往的研究虽然优化了图像拼接的效果, 但要运用在对速率要求较高的红外图像拼接中是远远不够的. 传统 SIFT 算法存在计算量过大的问题, 即使少数的几个物体也能产生较多的 SIFT 特征向量, 算法耗时较长. 本文利用较为高效的 FAST 算法提取了高斯金字塔图像的特征点, 大大减少了特征点提取的用时, 并结合了方向一致性判断的 Ransac 算法剔除了大量的错误匹配点对. 在提高拼接效率的同时提高了拼接质量, 实验证明改进后的算法相比原算法更有优势, 可以运用在实际项目中.

2 红外图像拼接算法实现

2.1 算法流程

图像拼接的大体流程如图 1 所示主要分为采集图像、图像配准、图像融合. 即首先通过红外设备获取红外图像, 然后依据图像之间的对应关系, 求得几何变换参数, 最后利用融合算法实现图像最后拼接. 各个图像之间的相似性是图像拼接的重要依据.



图 1 图像拼接流程

2.2 图像采集

采集到合适的图像是完成图像拼接的前提, 本次实验通过定制相机获取红外图像, 拍摄地点在室内. 其中探测器的像元数是 640×512 , 像元尺寸为 $17 \mu\text{m} \times 17 \mu\text{m}$, 响应波段为 $7.5 \mu\text{m} \sim 13.5 \mu\text{m}$. 像元坏点率 $\leq 1\%$. 工作温度为 $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$, 存储温度为 $-45^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$. 所以本次实验条件符合相机拍摄的要求, 操作正确, 所得图像有实验价值.

2.3 图像配准

2.3.1 SIFT 特征匹配算法

① 尺度空间极值检测

SIFT 算法在由高斯模糊获得的不同尺度空间上查找关键点^[6], 将 $L(x, y, \sigma)$ 定义为一个变化尺度的高斯函数 $G(x, y, \sigma)$ 与原图像 $I(x, y)$ 的卷积, 运算公式(1)和公式(2)如示:

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

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-m/2)^2 + (y-n/2)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

σ 为决定图像平滑程度的高斯滤波器, m 和 n 为高斯模板的维度, (x, y) 为图像的坐标. SIFT 算法中用更高效的高斯差分算子 DOC 来代替拉普拉斯算子 LOC, 提高了算法效率.

② 关键点定位

关键点初查通过同一组内相邻两层图像之间进行比较完成. 如图 3 所示, 中间的检测点和相邻的 26 个点进行比较, 选取极大或极小值为关键点. 通过拟合模型能更加精确的确定关键点的位置和尺度.

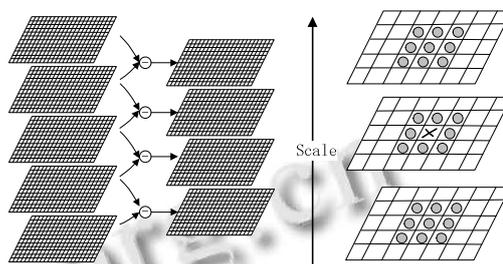


图 2 极值点检测

③ 确定特征点主方向

基于图像局部的梯度方向, 分配给每个关键点位置一个或多个方向, 对图像数据的操作都相对于关键点的方向、尺度和位置而变换, 提供了对于这些变换的不变性, 在 (x, y) 处梯度的模值和方向计算如公式(3)所示, L 所用的尺度为每个关键点各自所在的尺度:

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2} \quad (3)$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1}((L(x, y+1) - L(x, y-1)) / (L(x+1, y) - L(x-1, y)))$$

④ 特征点描述

最后利用特征向量为特征点建立描述符. 如图 4 所示, 一个关键点有 2×2 共 4 个种子点组成, 每个种子点有 8 个方向向量信息, 每个特征点用 4×4 个种子来描

述,即共 $4 \times 4 \times 8=128$ 维向量表示.其中每个小格代表像素的梯度方向,箭头长度代表该像素的梯度幅值.

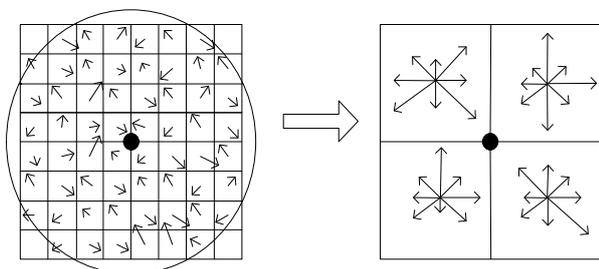


图 3 SIFT 描述子生成

2.3.2 改进 SIFT 特征点匹配

SIFT 算法虽然在旋转不变、光照不变、尺度不变等方面具有巨大的优越性.但该算法本身也存在一些问题,如计算复杂度过高、运算时间过长、误匹配点对较多等,这些都在很多方面限制了 SIFT 算法的运用^[7],本文通过以下两种方法对算法进行改进.

1) 利用 FAST 算法提取差分金字塔图像的特征点

作为图像拼接技术的第一步,特征点检测直接影响整个算法的执行效率.传统 SIFT 算法在建立高斯金字塔后要每一层进行极值点检测、关键点定位等操作,计算量较大,而 FAST 算子通过计算一个像素点与周围像素点是否有较大的灰度差来确定该像素点是否为一个极值点,简化了极值点检测的过程,是公认的比较快速的特征点检测方法.

本文将 FAST 算法应用到 SIFT 图像匹配技术中,首先选择任意一个像素点 P,再做半径为 3 的圆,对在圆周上的 16 个像素点进行比较.如果这 16 个点的像素值中四分之三满足公式 4,那么就将 P 点认作角点.其中 I_x 为圆周上任意一点的灰度值, I_p 为 P 点的灰度值, t 为给定的阈值常数.如式所示, N 为符合界定条件的像素个数.如果 N 大于给定阈值,则认为 P 是一个特征点.

$$N = \sum_{x \in \text{circle}(p)} C_i, \quad C_i = \begin{cases} 1 & |I_i - I_p| > t \\ 0 & |I_i - I_p| < t \end{cases} \quad (4)$$

利用 FAST 算法对高斯差分金字塔图像进行特征点提取的具体步骤如下:

① 先算出中心 P 点像素值与圆周上的编号为 1 和为 9 的像素点的图像灰度差值,如果两值的绝对值均大于给定的阈值 t ,则认为该像素 P 为候选特征点,并进行下一步算法计算.

② 计算中心 P 点像素值与圆周上编号为 5 点和 13 的像素点的图像灰度差值,如果 1、9、5、13 这四点其中至少要有三项的差值都大于阈值 t 或者小于 $-t$,则认为像素点 P 为候选特征点,算法进一步执行.

③ 照步骤 1 和 2 的判断准则反复执行,直到检测完圆周上 16 个像素点.

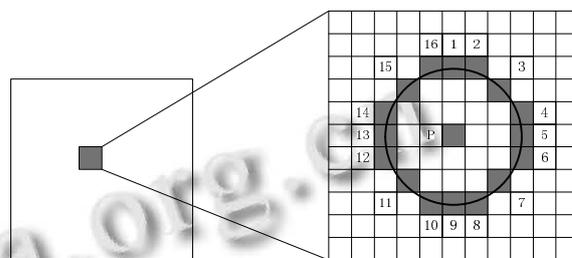


图 4 FAST 特征点检测模板图

2) 利用改进的 Ransac 算法剔除错误匹配点对

传统 SIFT 算法通过计算 SIFT 特征向量的欧氏距离^[8]作为两幅图像中关键点的相似性判定度量,即计算欧式距离的最小值和次最小值的比值,如比值小于一个特定的阈值则为一对合格的匹配点对,这种方法有较多的误匹配对.

普通 Ransac 算法在外点较多的情况下会构造错误的模型,本文在执行 Ransac 算法之前首先判断特征点是否具有相同的运动方向,提高匹配点对的精度. Ransac 算法的基本思想是:对象样本一般包含正确数据和由于各种原因而产生的异常数据,正确数据可以建立一个正确的模型^[8-10],同时异常数据偏离这个模型较远, Ransac 算法通过迭代的方式估计数学模型参数从而等到有效的样本数据,本文求取精确匹配点对的算法实现步骤如下:

① 首先计算所有匹配对中特征点的方向差,然后在 0° 到 360° 之间建立一个含有 36 个区的直方图,每个区为 10° .统计落入每个区匹配点对的数量,将最大区的匹配点对作为候选匹配点对.

② 从先前得到的匹配点对中随机选取 4 对匹配点线性估计变换矩阵 H ,如公式 5 所示:

$$k \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_4 & h_7 \\ h_2 & h_5 & h_8 \\ h_3 & h_6 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\tau \\ y_\tau \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 (x_τ, y_τ) 和 (x', y') 为一对匹配的特征点对,通过

矩阵变换, (x_τ, y_τ) 变换后得到对应特征点为 (x'_τ, y'_τ) , 如果变换矩阵正确, 则有 $x'_\tau = x_\tau$ 和 $y'_\tau = y_\tau$.

③ 计算所有匹配点对到 H 的垂直距离 d . 根据 $d < \text{阈值 } t$ 的原则, 判断所有匹配点对的内点对, 通过不断的实验对比, 发现当阈值取 0.6 时拼接效果最佳, 阈值取值越小越稳定. 当正确匹配点对数占所有匹配点对的 95% 时, 即得到了最佳匹配点集合.

④ 依次重复 1、2、3 步骤 N 次, 直到得出最大的内点对集合, 并记下此时的 H , 即为所求矩阵.

算法流程如图 6 所示.

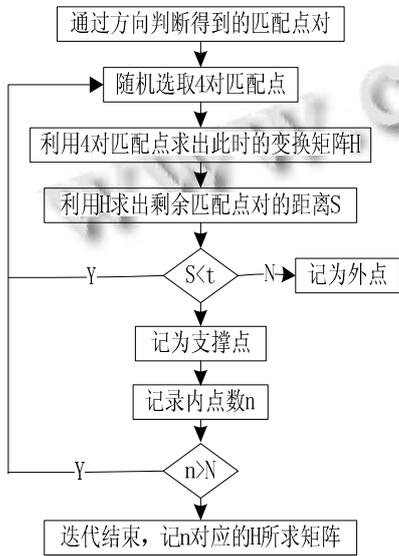


图 5 算法流程图

2.4 图像融合

图像的质量受到光照和曝光时间等因素的影响, 为使融合后的图像没有明显的接缝、提高图像的质量, 本文利用加权平滑算法实现对目标图像的拼接, 该算法通过其权值由 0 到 1 逐渐变化, 可以实现融合图像的平滑过渡. 其中 f_1 和 f_2 分别代表待拼接的两幅图像, f 代表拼接完成的图像, 则 f 可表示为:

$$f(x, y) = \begin{cases} f_1(x, y) & (x, y) \in f_1 \\ w_1 f_1(x, y) + w_2 f_2(x, y) & (x, y) \in (f_1 \cap f_2) \\ f_2(x, y) & (x, y) \in f_2 \end{cases} \quad (6)$$

其中 w_1 和 w_2 表示权值, 且 $w_1 + w_2 = 1$, 运算过程中 w_1 由 1 变到 0, w_2 由 0 变到 1, 从而实现了两幅图像的平滑过渡. 权值的计算方式如图 7 所示.

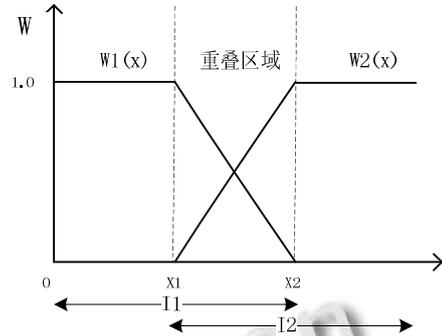


图 6 权值计算方

3 实验结果及分析

3.1 实验说明

为证明改进后的算法的可行性, 我们将在 CPU 为 Intel Pentium、内存为 2GB、主频为 2.2GHZ 的 PC 机上进行仿真, 使用的运行平台为 Matlab 2010b. 实验选取的素材是在室内拍摄的一系列红外图像.

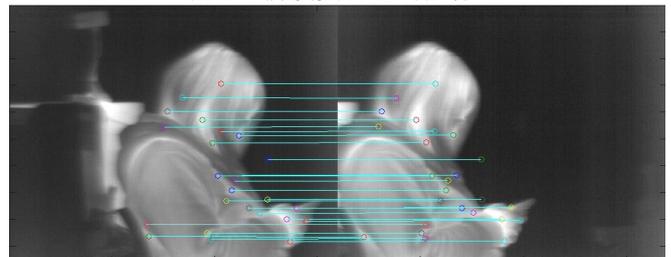
3.2 红外图像拼接实现

选取有重叠区域的两张图像进行拼接, 其中两幅图像之间的连线代表一组匹配对, 图 8(a)和图 8(b)分别为拼接所用的原始图像, 图 9(a)和图 9(b)分别为用原 SIFT 算法和改进后的算法进行特征点配准的实验结果, 图 9(c)和图 9(d)为最后拼接效果, 该实验具体运行结果数据如表 1 所示, 每次实验重复五次, 所得数据为多次实验均值:



(a)拼接左图 (b)拼接右图

图 7 拼接实验选用图像



(a)原 SIFT 算法配准结果

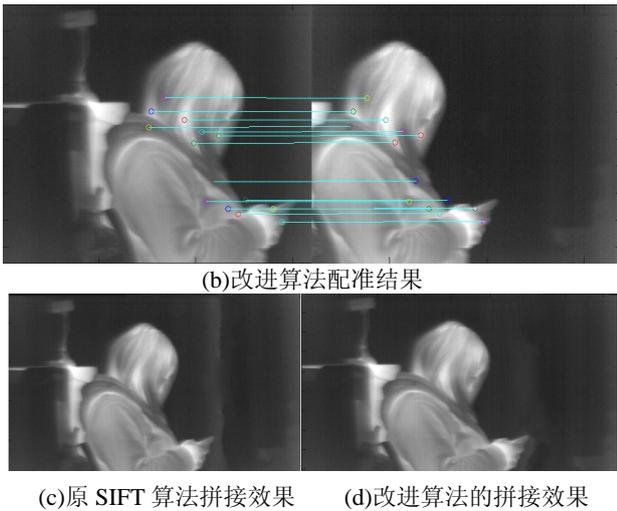


图 8 正常情况下传统 SIFT 算法和改进算法匹配结果

表 1 正常情况下拼接实验数据

拼接方法	特征点(个)		匹配点(个)	匹配时间(s)	融合时间(s)	正确率(%)
	N1	N2				
SIFT	160	117	50	2.76	3.79	90.5
改进	183	126	33	1.37	2.31	95.8

改进后的算法提高了运算效率。由表 1 可知，两种算法完成拼接的用时分别为 3.79s 和 2.31s，算法的效率提高了 15%左右。这是因为原算法需对每层高斯差分金字塔进行特征点提取操作，运算时间较长；而改进后的算法利用 FAST 特征点检测算法，较快速的完成了特征点检测，大大提高了算法的效率。

改进后的算法同时提高了匹配的正确率。由表 1 可知，两种算法匹配的正确率分别为 90.5% 和 95.8%，改进后算法的正确率较高。两种算法所得到的特征点匹配对数分别为 50 对和 33 对，改进算法提取到对数较少。从图 9(a)中我们可以看前图中女生的上臂到后图中女生的胳膊肘有一对明显的误匹配点对，而图 9(b)中改进后的算法将这一误匹配点剔除。这是因为改进后的算法首先判断了特征点对的方向特征，然后利用 Ransac 算法建立了较为正确的判断模型，从而剔除了大量的误匹配点对，提高了匹配精度。同时从图 9(c)和图 9(d)的对比可以看出，用原 SIFT 算法拼接的图像存在明显的条纹，而改进算法拼接效果较好。这说明误匹配点过多会直接造成图像对应关系错位，最后导致融合效果不理想。

3.3 特殊条件下红外图像拼接实现

实验分别在图像旋转、缩放、光照变化等情况下

对原始的 SIFT 算法和本文改进后的算法进行对比。实验对比结果如下：图 10(a)和图 10(b)为在配准图顺时针旋转 45 度角时用两种算法进行配准的结果；图 11(a)和图 11(b)为将配准图缩放为原图 1/2 的情况下两种算法的配准结果；图 12(a)和图 12(b)为在配准图光照变化时两种算法的配准结果，两种算法比较运行的具体数据如表 2 至表 4 所示，表中数据均为实验 5 次所得数据的平均值。

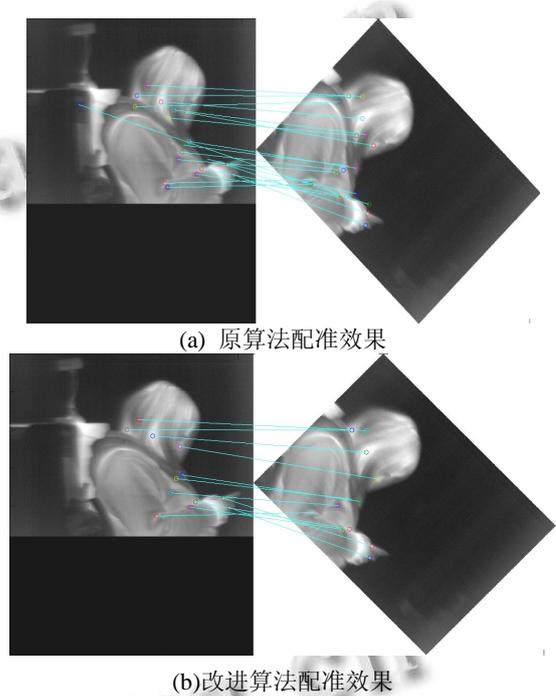


图 9 配准图旋转 45 度角时两种算法配准结果

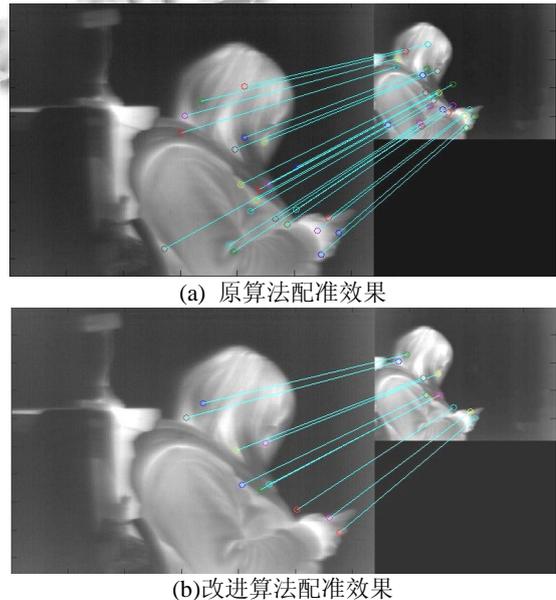


图 10 配准图像缩放 1/2 时两种算法配准结果

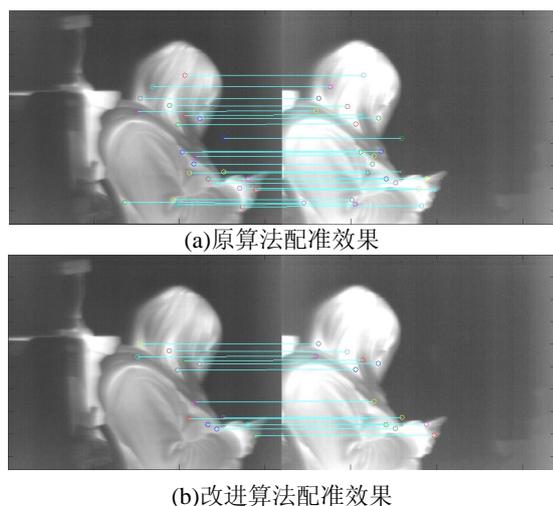


图 11 配准图光照变化时两种算法配准结果

表 2 图像旋转时实验数据

拼接方法	特征点(个)		匹配点(个)	匹配时间(s)	融合时间(s)	正确率(%)
	N1	N2				
SIFT	160	169	42	2.52	3.39	88.5
改进	203	197	28	1.23	2.12	92.6

表 3 图像缩放时实验数据

拼接方法	特征点(个)		匹配点(个)	匹配时间(s)	融合时间(s)	正确率(%)
	N1	N2				
SIFT	160	108	43	2.52	4.29	82.4
改进	130	123	35	1.19	2.09	86.9

表 4 图像光照变化时实验数据

拼接方法	特征点(个)		匹配点(个)	匹配时间(s)	融合时间(s)	正确率(%)
	N1	N2				
SIFT	160	108	30	2.42	3.29	90.5
改进	215	138	21	1.34	2.18	93.1

由图 10 和图 11 可知,在图像发生旋转和缩放的情况下,改进算法提取到的特征点对数要远小于原算法,从图 10(a)可看出,前图中女生背后处的特征点和后图有明显的误匹配,而改进后的算法将其剔除,这说明在图像发生旋转的情况下,改进算法也能有效的剔除误匹配点对。由表 1 数据可知,在两种特殊情况下,改进算法的配准效率都提高了 50%左右,配准正确率分别提高了 4.1%和 4.5%。由此可见在图像发生形变时,改进算法有较好的稳定性。这是因为原算法为每个关键点指定了方向,该方向为关键点领域像素的梯度方向特征,此法来保证算法稳定性。而改进后的算法不但沿用了该方法,而且用较快的 FAST 特征点提取算法提高了匹配速度,对于很多在图像的边缘轮廓处提取的特征点,能保持良好的匹配性。

由图 12 和表 4 可知,在光照变化的情况下,改进后的算法配准效率平均提高了 48%,配准正确率平均提高了 2.6%,改进算法提取到的特征点对数要比原算法平均少 9 个左右。这说明在图像的亮度发生变化时,改进算法同样也具有稳定性。这是因为改进后的算法继承了原算法的归一化操作,光照变化相当于在每个像素上加一个值,这些对图像归一化的梯度没有影响,所以改进后的算法能在光照情况下保持匹配算法的稳定性。

4 总结

针对原 SIFT 算法在实际应用中存在的运算速度较慢和误匹配点对过多的问题,本文利用较为高效的 FAST 算法提取了高斯金字塔图像的特征点,提高了运算的速度,通过减少匹配时间来减少总体图像拼接时间。并利用结合了方向一致性判断的 Ransac 算法剔除了大量的错误匹配点对,从而提升了算法的精确度,减少误匹配率。最后通过加权平衡算法实现图像融合。通过在光照、旋转、缩放等情况下用两种算法进行实验比较,结果证明改进后的算法比原 SIFT 算法更加快捷、更加稳定、有较强的鲁棒性。该算法运用到红外图像拼接中将有现实价值。

参考文献

- 1 Szeliski R. Video mosaics for virtual environments. *Computer Graphics and Applications*, 1996, 16(2): 22-30.
- 2 Lowe DG. Distinctive image feature form scale-invariant key points. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-31.
- 3 侯舒维,郭宝龙.一种图像自动拼接的快速算法. *计算机工程*, 2005, 31(15): 70-72.
- 4 杨占龙,郭宝龙.基于兴趣点伪泽尼克矩的图像拼接. *中国激光*, 2007, 34(11): 1548-1552.
- 5 王书民,张爱武,崔营营,任芳,骆云飞.面向全局坐标变换的点云配准实现及精度评价. *工程勘察*, 2011, (11): 62-65.
- 6 闫志,王黎明,陈平.基于多目标优化的 SIFT 特征匹配算法. *现代电子技术*, 2010, 33(12): 99-102.
- 7 熊自明,闫鹤.改进 SIFT 小型无人机视频序列图像自动拼接方法. *测绘科学*, 2013, 38(5): 133-136.
- 8 邹北骥,阮鹏,向遥,贺加贝.一种精确匹配的全景图自动拼接算法. *计算机工程与科学*, 2010, 32(8): 60-63.
- 9 常青,张斌,邵金玲.基于 SIFT 和 RANSAC 的特征图像匹配方法. *华东理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 38(6): 747-751.
- 10 张朝伟,周焰,吴思励,林洪涛.基于 SIFT 特征匹配的监控图像自动拼接. *计算机应用*, 2008, 28(1): 191-194.