

文章编号 1004-924X(2011)06-1391-07

改进的 SIFT 特征提取和匹配算法

曾 峦^{1,2*}, 王元钦^{1,2}, 谭久彬¹

(1. 哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 装备指挥技术学院, 北京 101416)

摘要:针对月球影像和尺度不变特征变换(SIFT)算法的特点,在改进 SIFT 特征提取算法的基础上,提出了一种稳健的图像自动匹配策略。首先,自动调整 SIFT 算法中的对比度控制系数,提高关键点提取的均衡性;然后,用 SIFT 描述向量之间的欧氏距离最小值与次小值的比值作为阈值,进行粗匹配,并利用匹配对主方向角度差直方图剔除部分伪匹配;最后,自动计算随机采样次数、误差容忍度等参数,使用改进的随机选取一致性(RANSAC)方法确定透视变换模型初始参数,并用该模型和误差容忍度对匹配集中的匹配对进行校验,选取出正确的匹配对。实验结果表明,在图像有一定程度的视点、光照、旋转、比例、模糊和对比度变化等情形下,该算法稳定、可靠。该方法能有效解决图像匹配门限的选择问题,真正实现了无人工干预的自动匹配。

关键词:图像处理;月球图像;SIFT 特征;图像匹配

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111906.1391

Improved algorithm for SIFT feature extraction and matching

ZENG Luan^{1,2*}, WANG Yuan-qin^{1,2}, TAN Jiu-bin¹

(1. *Institute of Ultra-precision Optical & Electronic Instrument Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150008, China;*
2. *Academy of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China*)

* *Corresponding author, E-mail: zenglun@sina.com*

Abstract: A robust automated image matching strategy based on an improved SIFT feature extraction algorithm was proposed according to the characteristics of SIFT algorithm and lunar images. Firstly, the extraction equilibrium of key points was improved by automatically adjusting the coefficient of controlling contrast in the SIFT algorithm. Then, the coarse matching was carried out by using the ratio of the minimum and the second minimum Euclidean distance between the description vectors of SIFT as a threshold and the part incorrect matching of the coarse matching set was removed by principal direction angle difference histogram of matches. Finally, the initial parameters of perspective transformation model were determined by using modified RANSAC method, automatically calculated random sampling numbers, and parameters of error tolerance. Moreover, the model and the error tolerance were used to calibrate the matching pairs in the matching set and to select the correct matching pairs. The experimental results prove that the proposed method is stable and reliable under some variations

收稿日期:2010-12-29;修订日期:2011-01-25.

基金项目:总装备部试验技术研究项目(No. 2009SY4110005)

for view points, illumination, rotation, scale and out of focus and it can select the matching threshold of images automatically without manual intervention.

Key words: image processing; lunar image; Scale Invariant Feature Transform (SIFT) feature; image matching

1 引言

2003年3月,我国正式启动了名为“嫦娥工程”的月球探测计划。随着探月工程的进一步深入,月球影像拼接在探月工程中愈发重要,需要不断探索新的技术和方法来进一步提高拼接处理的精度和稳定性。这些方法和技术主要指(1)特征点自动提取技术,进一步提高算法的准确性和稳定性;(2)同名像点自动识别技术,进一步提高识别率,并提高自动删除误匹配同名像点的稳定性;(3)卫星轨道及姿态校准技术,进一步提高数据处理精度;(4)图像自动拼接与镶嵌技术,做到在任何情况下可进行无缝拼接,一次性生成月球全图^[1]。

由于月球上没有植被,只有月面高地、环形山和低凹地带,月面高地和环形山的反照率(为17%)比低凹地带(反照率为6%)要高得多,所以其影像除纹理特征不明显外,同一轨道的影像其亮度和对比度也有较明显的差别,加上相邻轨道的影像受阳光投影方向的影响,影像左半部分比右半部分的亮度和对比度明显要高一些,使得月球图像不易提取到特征点,使用区域灰度匹配也比较困难,因此拼接过程中需要对亮度进行归一化处理,从而增加了相邻两轨影像的拼接难度。因此,要稳定地提取特征点,准确地进行同名像点的自动匹配,精确地实现图像自动拼接,需要对月球图像特征提取、自动匹配和平滑拼接技术进行深入研究。

本文针对月球影像的特点,在改进 SIFT 特征提取算法的基础上,提出了一种稳健的图像自动匹配方法。该方法能在图像匹配过程中根据图像质量自动计算匹配阈值,从而提高算法的稳健性和自动化水平。

2 特征提取和匹配

图像配准是图像拼接的核心,它一般可分为

两大类^[2]:一类是基于频率域的配准方法,如 Fourier 变换和小波变换方法等;另一类是基于空间域的配准方法,它主要包括基于区域的配准算法和基于特征的配准算法。随着一些良好特征提取算子的出现,基于特征的配准算法应用更加广泛,对于图像的变形,亮度变化具有较好的鲁棒性,且计算量小、速度较快,是目前研究最多、应用最广的匹配方法。但当前已有的基于特征的图像配准方法存在一个共同的问题^[3],即它们所采用的特征点的不变性一般较差,通常不具备对仿射或透视投影变换的不变性。SIFT 方法所提取的特征点不仅对图像缩放、平移和旋转变换具有不变性,且对光照变化以及仿射和投影变换也具有部分不变性,非常适合于遥感图像的配准^[4]。但 SIFT 方法对低对比度的图像提取的特征点很少,匹配阶段通常使用关键点之间的欧式距离最小值与次小值之比作为匹配阈值,该阈值需要人工根据图像质量来确定,不能完全实现自动配准。

有不少人提出了双向匹配的策略^[5-6],它虽可以进一步提高 SIFT 特征匹配的准确性,但这种方法仍需人工选择双向的两个匹配阈值,无法实现阈值的自动选择。文献[7]提出基于置信度的匹配算法,其实质仍是特征对的欧式距离最小值与次小值之比作为匹配阈值。文献[8]加入了全局信息来提高匹配准确率,但也需人工选择匹配阈值。由 Fishler 和 Bolles 提出的随机选取一致性(RANSAC)算法^[9],虽然能有效地估计匹配点的内点和外点,剔除伪匹配,但误差容忍度、随机抽取样本集的次数和一致集的大小等参数仍需人工根据图像质量和特征点数量来确定。

针对月球影像和 SIFT 方法的特点,本文提出一种稳健的匹配策略,具体如下:

第一步,自动调整 SIFT 算法中对对比度阈值控制系数,提高算法对低对比度图像的适应性。由于归一化图像熵(用 e 表示)能够比较好地表示图像的灰度分布特性,而 SIFT 算法中通常把 DOG 金字塔分为 n 阶,每阶又分为 $s+2$ 个用于检测极值的层,检测到的候选特征点的对比度与 s 有关, s 越大候选特征点的对比度越低。考虑到

SIFT 算法中,当 $s=3$ 时,对比度阈值控制系数一般取值在 $0.01\sim 0.03$ 之间,故可用下式来计算对比度阈值控制系数 ct 。

$$ct = \begin{cases} e/10s(2-e) & , ct > 0.01 \\ 0.01 & , ct \leq 0.01 \end{cases} \quad (1)$$

即图像对比度较大时,加大对对比度阈值控制系数,使提取到的特征点不会过多;相反,则减小对比度阈值控制系数,保持适当的特征点数目;由于图像对比度太低时,使用了固定阈值,故当归一化图像熵小于 0.2 时提取到的特征点就很少。

第二步,使用欧式距离最小值与次小值的比率进行粗匹配,选取一个基本阈值来剔除非常有疑义的匹配对。根据 Lowe 的实验^[10],比率值取 0.8 时,可以去除 90% 的误匹配,但正确匹配也会丢失 5% 左右,此值增大时,误匹配数量急剧上升;此值取 0.7 时,可以去除 96% 的误匹配,而正确匹配则丢失 8% 左右,此值减少时,误匹配数量降速减缓,正确匹配数量降速增加。因此,粗匹配时,比率值可在 $0.6\sim 0.8$ 之间选择,本文选择比率值为 0.8 对特征进行匹配,以尽可能多地保留正确匹配对。

第三步,计算粗匹配集合中每对特征向量的主方向角度差,统计其直方图。在理想情况下,如果匹配对是正确的,其主方向差值应该基本相同,考虑到各种变换关系带来的误差,在直方图最大值处规定一个邻域作为匹配判据之一,匹配对的主方向角度差值落入此范围,认为是可能的匹配对,本文以主方向角度差直方图主峰值所在的包络为邻域范围,用于剔除部分伪匹配,提高正确匹配的概率。

第四步,使用改进的 RANSAC 方法,自动稳健估计透视变换模型初始参数,具体过程见下一节。

第五步,用初始透视变换模型对粗匹配集合中所有的匹配对进行校验,如果特征点的变换坐标与实际坐标之间的距离值小于某一阈值时(此阈值自动计算,方法见下一节),认为是正确匹配对,将该点保留;否则,将该点剔除,从而得到正确匹配对集合。

3 变换参数稳健估计方法

3.1 图像变换参数的线性求解

图像拼接一般是采用对应匹配(homographic mapping)模型。即原始图像是由针孔相机拍摄的投射图像,主要存在绕光学中心的透视、平移、

旋转和缩放变换。本文选择透视投影变换作为图像变换模型,把它写成 8 参数方程组的形式,变换关系为:

$$\begin{cases} x_2 = \frac{m_1 x_1 + m_2 y_1 + m_3}{m_7 x_1 + m_8 y_1 + 1} \\ y_2 = \frac{m_4 x_1 + m_5 y_1 + m_6}{m_7 x_1 + m_8 y_1 + 1} \end{cases} \quad (2)$$

这是一个有 8 个参数的非线性方程,可以通过直接线性变换来求解。构建误差函数如下式所示:

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{m_1 x_1 + m_2 y_1 + m_3 - m_7 x_2 x_1 - m_8 x_2 y_1 - x_2}{m_7 x_1 + m_8 y_1 + 1} \\ \Delta y = \frac{m_4 x_1 + m_5 y_1 + m_6 - m_7 y_2 x_1 - m_8 y_2 y_1 - y_2}{m_7 x_1 + m_8 y_1 + 1} \end{cases} \quad (3)$$

记: $m_7 x_1 + m_8 y_1 + 1 = A$, 上式化为

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{x_1}{A} m_1 + \frac{y_1}{A} m_2 + \frac{1}{A} m_3 - \frac{x_2 x_1}{A} m_7 - \frac{x_2 y_1}{A} m_8 - \frac{x_2}{A} \\ \Delta y = \frac{x_1}{A} m_4 + \frac{y_1}{A} m_5 + \frac{1}{A} m_6 - \frac{y_2 x_1}{A} m_7 - \frac{y_2 y_1}{A} m_8 - \frac{y_2}{A} \end{cases} \quad (4)$$

误差方程用矩阵表示为:

$$\mathbf{V} = \mathbf{C}\mathbf{A} + \mathbf{L} \quad (5)$$

其中:

$$\mathbf{V} = [\Delta x \quad \Delta y]^T \quad \mathbf{L} = -\frac{1}{A} [x_2 \quad y_2]^T$$

$$\mathbf{C} = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_2 x_1 & -x_2 y_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -y_2 x_1 & -y_2 y_1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = [m_1 \quad m_2 \quad m_3 \quad m_4 \quad m_5 \quad m_6 \quad m_7 \quad m_8]$$

对应的法方程为:

$$\mathbf{C}^T \mathbf{C} \mathbf{A} + \mathbf{C}^T \mathbf{L} = 0 \quad (6)$$

使用 4 对以上的匹配点坐标,通过最小二乘法求解相应的正规方程组来解算出这 8 个参数。

$$\mathbf{A} = -[\mathbf{C}^T \mathbf{C}]^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{L} \quad (7)$$

由于这个方程组是非线性方程组,求解时,先令 $A=1$, 求出 $m_1 \sim m_8$ 的初值;再用此初值,求出新的 A 值,进行多次迭代,求出稳定的 $m_1 \sim m_8$ 值,一般迭代 $3\sim 5$ 次即可得到变换参数的稳定值,本文选择迭代 5 次。直接线性变换法求解过程相当稳定,避免了一般非线性方程求解时初值选取不恰当会引起迭代发散的问题。

为了减少随机选取的 4 对点位于同一平面的可能性,而 SIFT 匹配对通常较多,故采用随机选择 8 对匹配点来求解模型变换参数初值的做法。初始模型参数计算出来后,用于对其他匹配对的校验,得到在一定容忍度下符合该模型的所有匹配对,然后再用这些匹配对求得最终的图像变换

模型参数。

3.2 改进的 RANSAC 算法提纯数据

RANSAC 算法的特点是充分利用了所有的测量数据,并根据阈值把它们分成内点和外点,利用内点数据比较准确的特点来进行参数估计而剔除了不准确的数据,RANSAC 算法需要事先确定 3 个量^[11]:随机采样的次数、误差容忍度(即内点与外点的距离阈值)和一致集的大小(即多大的内点总数)。

3.2.1 随机采样的次数

在估计模型参数的最佳值时,理想情况是搜索所有可能的组合,找到误差最小一组,但计算量过大。实际中可以通过确定一个适当的采样次数 N ,使得采样的 s 对匹配点都是内点的概率 P 足够高(通常取 95%)。设计算模型参数需要的匹配点对为 s ,任何一对匹配点是内点的概率为 P_1 ,任何一对匹配点是外点的概率为 $\epsilon = 1 - P_1$ 。那么采样到 N 次时有

$$(1 - P_1)^N = 1 - P, \quad (8)$$

需要采样的次数 N 为

$$N = \log(1 - P) / \log(1 - (1 - \epsilon)^s), \quad (9)$$

本文取 $s = 8, P = 0.99, \epsilon = 0.3$,则 $N = 78$ 。

3.2.2 误差容忍度的确定

通常的做法是假设特征点提取误差是符合均值为 0,标准差为 σ 的高斯分布,而距离误差的平方是符合自由度为 m 的 χ^2 分布,那么阈值计算方法为

$$t^2 = F_m^{-1}(\alpha)\sigma^2, \quad (10)$$

式中 α 表示符合条件的匹配对是内点的先验概率,一般取值 0.95,通过 χ^2 分布的查值表可得 $t = 2.45\sigma$,即利用模型参数变换得到的特征点坐标值与实际坐标的距离差值小于 t 时,为内点。

但实际图像很难完全满足假设条件,故本文采用根据图像的实际情况来确定误差容忍度。随机选取 8 个匹配对,计算这 8 个匹配对的变换坐标与实际坐标的距离标准差,重复 78 次,取标准差最小的那一组匹配对,用于计算变换模型初始参数,其距离标准差记为 σ 。按照上述准则,选择 2.45σ 作为基本的判断阈值。

由于最好的 8 个匹配对往往会集中在图像的某一区域中,用这 8 个匹配对求解出来的变换模型参数去计算图像其他区域的匹配对变换坐标时,会有较大误差,校验时就需增加判断阈值的误

差门限,如果这 8 个匹配对能均匀分布在整个图像区域,判断阈值就取 3σ ,如果集中在某个小的区域,就适当扩大判断阈值,取为 $k \times 3\sigma$,匹配对越集中 k 值就应该越大。

计算 8 个匹配对分别在两幅图像中 y 方向(或者 x 方向)的最大分布范围 h ,再与两幅图像 y 方向(或者 x 方向)的最大宽度 w 相比较,令 $k = w/h$ 。

3.2.3 一致集大小的确定

通常的做法是假设特征点总数为 n 对,则内点数为 $(1 - \epsilon)n$ 。通过 78 次运算,寻找内点数接近 $(1 - \epsilon)n$ 的那次组合,来计算变换模型参数,并通过多次地迭代直到内点的数目基本趋于一致。这种方法每 78 次都要计算粗匹配集合中的所有匹配对的距离误差值,以确定哪些是内点,当粗匹配对较多时,耗时较长。

本文的做法是 78 次随机选取 8 个匹配对,取距离误差最小的那组用于计算初始变换模型参数,利用该模型对粗匹配集合中的所有匹配对进行校验,若匹配对的变换坐标与实际坐标之间的距离值小于 $3k\sigma$ 时,认为是正确匹配对,将该匹配对保留;否则,将该匹配对剔除。此方法耗时较少,且能根据图像的质量和特征点的情况自动计算相应的阈值。

4 实验结果与分析

按上述匹配方法,用流行的测试图像^[12],对图 1 所示的 4 种典型的情况进行了测试,图 1(a)是旋转了 75° 和缩小了 2 倍的图像,图 1(b)是亮度和对比度有大幅度变化的图像,图 1(c)是发生了模糊变化的图像,图 1(d)是相机视角发生了 40° 变化的图像,分辨率均为 $800 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$ 。重复进行了 5 次测试,图 2 是其中一次的匹配结果,表 1 是测试数据。

图 2(a)的正确匹配对数平均为 790,匹配对数最大变化值为 3.0,平均匹配效率为 80.78%;图 2(b)的正确匹配对数平均为 315,匹配对数最大变化值为 2.0,平均匹配效率为 72.67%;图 2(c)的正确匹配对数平均为 565,匹配对数最大变

化值为 3.0,平均匹配效率为 86.79%;图 2(d) 的正确匹配对数平均为 72.2,匹配对数最大变化值为 3.2,平均匹配效率为 34.55%。从表 1 的测试数据可以看出,本文的方法对图像的旋转、比例、光强、对比度、模糊和视角的变化都有较强的适应性,一致集大小比较稳定,最大变化值在 3.2 个左右,算法稳定可靠。



(a)



(b)



(c)



(d)

图 1 测试图像
Fig. 1 Test images



(a)

(b)



(c)

(d)

图 2 测试结果
Fig. 2 Test results

表 1 测试图像匹配结果

Tab. 1 Matching results of test images

	Sequence	Fig. 1(a)	Fig. 1(b)	Fig. 1(c)	Fig. 1(d)
	Original matching	978	434	651	209
1	Final matching	787	317	568	70
	Matching efficiency	80.5%	73.0%	87.3%	33.5%
	Original matching	978	434	651	209
2	Final matching	790	316	564	74
	Matching efficiency	80.8%	72.8%	86.6%	35.4%
	Original matching	978	434	651	209
3	Final matching	793	315	563	69
	Matching efficiency	81.1%	72.6%	86.5%	33.0%
	Original matching	978	434	651	209
4	Final matching	790	313	566	74
	Matching efficiency	80.8%	72.1%	86.9%	35.4%
	Original matching	978	434	651	209
5	Final matching	790	314	564	74
	Matching efficiency	80.8%	72.4%	86.6%	35.4%

作者对 60 对实际拍摄的月球影像进行了实验,图像尺寸均为 512 pixel×512 pixel,初始匹配阈值为 0.8,匹配结果统计曲线如图 3 所示。图中横坐标为图像对序号,纵坐标为匹配对数目,虚线所示为初始匹配对数,实线所示为最终正确匹配对数目,经人工对匹配结果进行校验,误匹配数均为 0 对。60 对图像粗匹配对数的平均值为

153.4, 正确匹配对数的平均值为 144.0, 正确匹配效率为 93.87%。

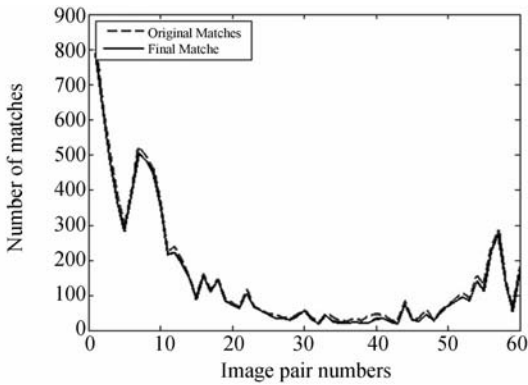


图 3 匹配数据曲线

Fig. 3 Curves of matching data

图 4 所示为其中 4 组月球影像的匹配结果, 图 4(a)是亮度和对比度都较高的情况, 初始匹配对有 810 对, 最终正确匹配对有 787 对; 图 4(b)的亮度和对比度比图 4(a)差一些, 初始匹配对有 224 对, 最终正确匹配对有 216 对; 图 4(c)的对比度比图 4(a)差得多, 初始匹配对有 46 对, 最终正确匹配对只有 44 对; 图 4(d)的亮度和对比度是整个轨道中最差的一对, 初始匹配对有 27 对, 最

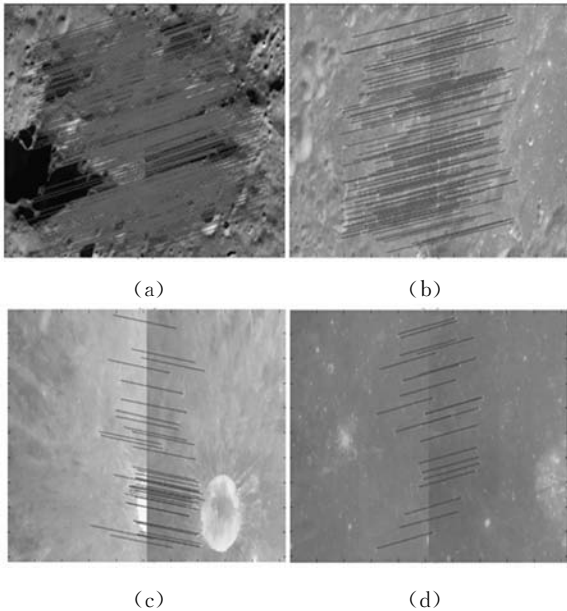


图 4 月球图像匹配结果

Fig. 4 Matching results of lunar images

终正确匹配对只有 20 对。从实验结果可以看出, 本文的方法在整个轨道中都能找到满足拼接要求的正确匹配对, 体现了算法的稳健性。

为了便于比较, 把直接使用 SIFT 算法对上述 4 组图像进行匹配的结果示于图 5, 最小和次小欧氏距离的比值为 0.7 时可完全剔除伪匹配点。图 5(a)有 786 个正确匹配对, 图 5(b)有 67 个正确匹配对, 图 5(c)只有 2 个正确匹配对, 图 5(d)有 11 个正确匹配对(有 5 对是多尺度匹配对), 在对比度较差时, 其结果比本文算法的匹配结果要差得很多。

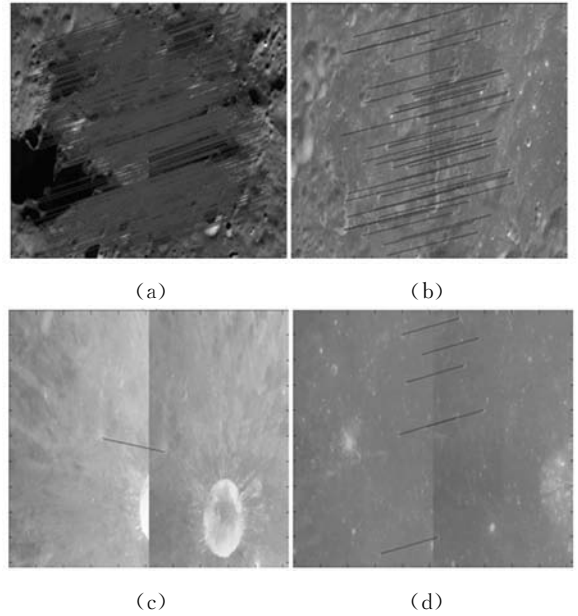


图 5 原始算法匹配结果

Fig. 5 Matching results for original algorithm

5 结 论

本文分别对 SIFT 特征提取和 RANSAC 方法进行了改进, 使得在匹配过程中, 能根据图像质量自动计算匹配阈值, 增加了算法的稳健性和自动化水平。实验结果表明, 即使在有比较大的比例、旋转、平移、模糊、光强变化和透视变换, 以及图像本身自相似性很强和对比度较低的情况下, 本文的方法也能稳定、可靠地实现自动配准, 所用实验图像都达到了很高的匹配准确率。

参考文献:

[1] 沈荣骏, 李学军. 自动制图—月球遥感数据处理的新方向[J]. 装备指挥技术学院学报, 2010, 21(1):

1-5.
SHEN R J, LI X J. Automatic selenograph production- new direction of the lunar remote sensor data

- processing[J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2010, 21(1): 1-5. (in Chinese)
- [2] 王成儒,赵娜,张丽丽. 基于三角形几何相似性的图像配准与拼接[J]. *光电工程*, 2007, 34(8): 87-92.
WANG CH R, ZHAO N, ZHANG L L. Image registration and stitching based on triangle geometry similarity[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(8): 87-92. (in Chinese)
- [3] 高超,张鑫,王云丽,等. 一种基于 SIFT 特征的航拍图像序列自动拼接方法[J]. *计算机应用*, 2007, 21(11): 2789-2792.
GAO CH, ZHANG X, WANG Y L, *et al.*. Automatic stitching approach of aerial image sequence based on SIFT features[J]. *Computer Applications*, 2007, 21(11): 2789-2792. (in Chinese)
- [4] 李晓明,郑链,胡占义. 基于 SIFT 特征的遥感影像自动配准[J]. *遥感学报*, 2006, 10(6): 885-892.
LI X M, ZHENG L, HU ZH Y. SIFT Based automatic registration of remotely-sensed imagery[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(6): 885-892. (in Chinese)
- [5] 刘焕敏,王华,段慧芬. 一种改进的 SIFT 双向匹配算法[J]. *兵工自动化*, 2009, 28(6): 89-91.
LIU H M, WANG H, DUAN H F. A bidirectional matching SIFT algorithm[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2009, 28(6): 89-91. (in Chinese)
- [6] 骞森,朱剑英. 基于改进的 SIFT 特征的图像双向匹配算法[J]. *机械科学与技术*, 2007, 26(9): 1179-1182.
QIAN S, ZHU J Y. Improved SIFT-based bidirectional image matching algorithm[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2007, 26(9): 1179-1182. (in Chinese)
- [7] 杨晓敏,吴炜,卿鄰波,等. 图像特征点提取及匹配技术[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9): 2276-2282.
YANG X M, WU W, QING L B, *et al.*. Image feature extraction and matching technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2276-2282. (in Chinese)
- [8] 纪华,吴元昊,孙宏海,等. 结合全局信息的 SIFT 特征匹配算法[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2): 439-444.
JI H, WU Y H, SUN H H, *et al.*. SIFT feature matching algorithm with global information [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 439-444. (in Chinese)
- [9] FISCHLER M, BOLLES R. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography [J]. *Communication Association Machine*, 1981, 24(6): 381-395.
- [10] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [11] 赵向阳,杜利民. 一种全自动稳健的图像拼接融合算法[J]. *中国图象图形学报*, 2004, 9(4): 417-422.
ZHAO X Y, DU L M. An automatic and robust image mosaic algorithm [J]. *Journal of Image and Graphic*, 2004, 9(4): 417-422. (in Chinese)
- [12] Download from <http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/research/affine>

作者简介:



曾 峦(1963—),男,广东梅县人,教授,1983年于中国人民解放军国防科技大学获得学士学位,2007年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事图像信号处理及光电测量仪器等方面的研究。E-mail: zengluan@sina.com



王元钦(1963—),男,黑龙江牡丹江人,教授,1983年、2007年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事雷达信号处理及深空探测等方面的研究。E-mail: wangyqin@126.com

导师简介:



谭久彬(1955—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1982年、1987年、1991年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,现为哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所所长,主要从事超精密光电仪器工程、光电信息检测与处理技术、纳米测量技术与仪器工程等方面的研究。E-mail: jbtan@hit.edu.cn