

Doi:10.3969/j.issn.1672-0105.2017.02.009

# 阈值自适应的SIFT全景图像拼接算法\*

马无锡

(浙江工贸职业技术学院, 浙江温州 325003)

**摘要:** 针对SIFT (Scale Invariant Feature Transform) 算法中阈值影响着图像匹配的成功率, 提出了一种阈值自适应的匹配算法。该方法首先对SIFT算法中的阈值系统地研究, 发现检测局部特征点的阈值 $\alpha$ 和图像匹配时最近距离与次近距离的比值的阈值 $\beta$ 对图像是否能够成功匹配起着决定性的作用, 然后利用控制 $\alpha$ 的大小来检测特征点, 生成特征描述符。再利用广义紧互对原型的基础上, 自动调整 $\beta$ 的大小来控制匹配的对数, 最后结合RANSAC和最小二乘法求出图像间的映射关系得到拼接后的图像。实验结果表明, 该算法通过自动调整阈值和利用RANSAC剔除误匹配点, 加快了图像的匹配速率, 开发了全景图像拼接软件。

**关键词:** 阈值自适应; SIFT; 匹配速率; RANSAC; 全景图拼接软件

中图分类号: TP312

文献标识码: A

文章编号: 1672-0105(2017)02-0035-06

## Adaptive Threshold SIFT Panorama Image Matching Algorithm

MA Wu-xi

(Zhejiang Industry & Trade Vocational College, Wenzhou, 325003, China)

**Abstract:** Aimed to the success rate of image matching which is affected by thresholds of the SIFT (Scale Invariant Feature Transform) algorithm, a thresholds of adaptive matching algorithm was proposed. Thresholds were first systematically investigated and found that the thresholds of local feature points ( $\alpha$ ) and the ratio of distances (closest/next closest) ( $\beta$ ) had influence on successfully matching images. Then, controlled  $\alpha$  was used to detect feature points and generate feature descriptors, and based on the generalized tight interaction of the prototype, automatically adjusted  $\beta$  to control matched pairs. Last, RANSAC and least-squares method derived mapping relations between images image stitching. Experiments show that the algorithm can automatically adjust the threshold so that accelerate the image matching rate, a panoramic image matching software have been developed.

**Key words:** adaptive threshold; SIFT; match rate; RANSAC; panorama matching software

目前, 国内外很多学者对图像匹配作了大量的研究, 主要包括三类: 第一是基于灰度的匹配算法, 其中基于面积和模板的算法研究的较多, 周天宏<sup>[1]</sup>等人提出了基于图像映射法的快速拼接, 提高了计算效率, 洪春勇<sup>[2]</sup>等人引入了信息熵的概念, 建立相应的塔形结构, 它们都属于基于灰度的匹配算法。二是基于变换域的算法, 基于变化域的匹配算法主要是基于相位相关的匹配算法, 胡社教<sup>[3]</sup>等人利用了互功率谱中的相位信息进行配准, 具有一定的抗干扰能力和匹配精度。第三是基于特征的匹配。Huttenlocher 等人<sup>[4]</sup>和 Kwon Oh-Kyu<sup>[4]</sup>等人提出先

提取出图像的边缘信息特征, 再利用 Hausdorff 距离匹配图像, 可以匹配出平移、旋转、缩放变化甚至遮挡的物体, 但是此方法要求有基准图像。Moravec 算子<sup>[5]</sup>、Harris<sup>[6]</sup>算子及 Susan 算子也经常用来检测角点, 利用角点之间的相关性进行图像匹配, 但抗干扰能力较弱。

基于特征的匹配算法当中, David Lowe<sup>[7-8]</sup>提出的 SIFT 算法的匹配能力是最强的, 他在 1999 年提出的尺度不变特征变换 SIFT 算法, 并且在 2004 年进行了改进, 使其对尺度、旋转、亮度、仿射、噪音等都具有不变性。由于 SIFT 算法本身复杂, Yan-

收稿日期: 2016-12-25; 修回日期: 2017-04-28

基金项目: 2016 年浙江工贸职业技术学院院级项目 (G160108)

作者简介: 马无锡, 男, 硕士, 浙江工贸职业技术学院工程师, 主要研究方向: 图像处理技术。

Ke<sup>[9]</sup>在2004年提出了PCA-SIFT降维的算法,加快了算法计算时间,但对于实时情况并不理想。虽然很多学者在不断的改进此算法,但是并没有得到较大的改进。Lowe和Brown<sup>[10]</sup>在2006年用SIFT算法进行了自动全景图像拼接。

本文针对SIFT算法中阈值影响着图像能否快速成功地匹配,提出了一种阈值自适应的匹配算法。对SIFT算法中的阈值系统地研究,发现检测局部特征点的阈值 $\alpha$ 和图像匹配时最近距离与次近距离的比值的阈值 $\beta$ 对图像是否能够成功匹配起着决定性的作用,然后利用控制 $\alpha$ 的大小来检测特征点,生成特征描述符,再利用广义紧互对原型的基础上,自动调整 $\beta$ 的大小来控制相互匹配成功对数,最后利用最小二乘法和RANSAC算法求出两幅图像之间的映射关系,根据映射原理拼接图像。与传统图像拼接方法相比,该方法提高了图像的匹配速率和图像匹配成功率。

## 1 SIFT算法

SIFT算法实现图像匹配主要包含以下六个步骤:尺度空间的建立和极值点的检测、关键点的精确定位、关键点主方向的确定、关键点描述符的构造、特征点的匹配、图像的融合。

### 1.1 尺度空间的建立和极值点的检测

尺度空间变化主要是为获取图像的本质特征而进行的一种变化。此处将原图与一个高斯函数进行卷积:

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

其中 $G(x,y,\sigma)$ 是尺度可变的高斯函数,

$$G(x,y,\sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad I(x,y) \text{ 为图像的空间坐标, } \sigma \text{ 为尺度坐标。}$$

将原图像在不同尺度做高斯模糊,生成一组对应的尺度空间图像,再将尺度空间图像进行降采样,即利用相邻的尺度空间图像的差,重新生成一组高斯差分DOG图像 $D(x,y,\sigma)$ 。

$$D(x,y,\sigma) = (G(x,y,k\sigma) * I(x,y)) - L(x,y,\sigma) \quad (2)$$

$k$ 为相邻两层的尺度空间图像之间的比例,选择高斯差分DOG函数的极值点作为候选特征点。

### 1.2 精确关键点

利用三维二次函数拟和方法,精确并确定关键点的位置和尺度,用泰勒展开式得出在候选特征点处方程:

$$D(x) = D + \frac{\partial D^T}{\partial X} X + \frac{1}{2} X^T \frac{\partial^2 D}{\partial X^2} X \quad (3)$$

由于高斯差分DOG对图像对边缘响应较敏感,利用每个兴趣点领域的Hessian矩阵 $H$ 的特征值,进一步分析判断兴趣点领域的特征结构,剔除稳健性差的点。

$$H = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{xy} & D_{yy} \end{bmatrix} \quad (4)$$

如果 $\frac{Tr(H)}{Det(H)} < \frac{(r+1)^2}{r}$ ,则该点是边缘上的点,

在Lowe的文章中, $r = 10$ 。

### 1.3 确定关键点的主方向

根据每个关键点周围邻域像素梯度方向的分布特性,确定每个关键点的主方向,使SIFT算子保持旋转不变性,SIFT采用方向直方图确定它的主方向,具体的做法:对每一个特征点,计算以该点为中心领域内的每个点的梯度方向,选出梯度方向最大所对应的方向作为该点主方向。

### 1.4 构造关键点描述符

在构造关键点的特征描述符时,主要分为三个步骤:

1) 将特征点邻域的局部区域旋转至该点的主方向,确保旋转不变性。

2) 在旋转后的区域内,获取以关键点为中心的 $8 \times 8$ 窗口,在图1中选取 $8 \times 8$ 的窗口,其中央黑点做为关键点位置,箭头的方向则为该像素的梯度方向,用箭头的长度来表示其梯度模值,图中黑色的圈是用来表示高斯加权的范围。

3) 在 $4 \times 4$ 的每个小方块上计算8个方向的梯度方向直方图,计算每个梯度方向的累加值作为一个种子点,如图2所示。

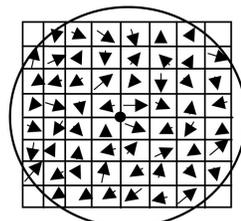


图1 图像梯度方向

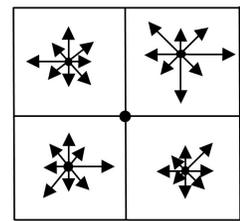


图2 关键点描述

### 1.5 特征点的匹配

两幅图像的SIFT特征点生成以后,并采用关键点特征向量的欧氏距离大小来判断两幅图像的相似程度。选取一幅图像中某个关键点,通过全局范围地去遍历第二幅图像,并找到与它欧氏距离最近的

两个点,若最近的距离与次近的距离比值小于某个阈值,则接受匹配,否则剔除。阈值的大小直接影响着匹配点的稳健性和精确性。

### 1.6 图像融合

对以上算法得出的匹配特征点,由于本文所用的图像是在水平方向采集的,几乎不存在旋转变换,所以只需对图像进行上下、水平的融合。采用渐入渐出加权平均的方法对重叠区域的图像进行融合,实现平滑过渡。设两幅待拼接图像  $I_1(x,y)$  和  $I_2(x,y)$ , 则融合后的图像  $I(x,y)$ ,  $I(x,y)$  可表示为:

$$I(x,y) = \begin{cases} I_1(x,y) & (x,y) \in I_1 \\ gI_1(x,y) + (1-g)I_2(x,y) & (x,y) \in I_1 \cap (x,y) \in I_2 \\ I_2(x,y) & (x,y) \in I_2 \end{cases} \quad (5)$$

$g = 1 - \frac{i}{width}$ ,  $i$  取  $0 - width$ , 步长为 1,  $width$  为两幅图像需匹配的重合宽度。

## 2 阈值自适应的匹配算法

对 SIFT 算法中阈值的系统研究发现,第一,DOG 函数在检测局部特征点判断的阈值  $\alpha$  控制着检

测特征点的个数。第二,两图像匹配时最近距离与次近距离的比值的阈值  $\beta$  控制着匹配的成功率,调整好这两个阈值对图像的成功匹配非常关键。

### 2.1 实验数据

实验中处理的是  $2560 \times 1920$  分辨率图像,如图 3 和图 4 相机在水平方向旋转且采集的图像有部分重叠,为了加快 SIFT 算法计算的速率,首先对图像进行裁剪,所有的裁剪都是在算法中实现的,算法可以根据重叠的区域大小进行裁剪。实验图中图 3 裁剪后得到区域 A,图 4 裁剪后得到区域 B。

### 2.2 特征点的个数随着阈值 $\alpha$ 的变化曲线

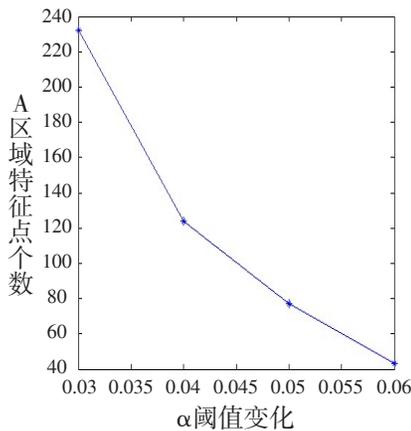
阈值  $\alpha$  控制着局部特征点的数量。所以  $\alpha$  决定了特征点数的多少,如果  $\alpha$  偏小,检测的特征点数虽多,但误匹配点数也增多,同时降低了效率。相反,如果偏大,检测的特征点数很少,虽然提高了计算速率,但正确的匹配点对有可能无法检测到。实验中将  $\alpha$  的区间设为  $0.03 \sim 0.06$ ,步长为  $0.01$ 。图 5 (a) 和 (b) 分别是对区域 A 和 B 检测出特征



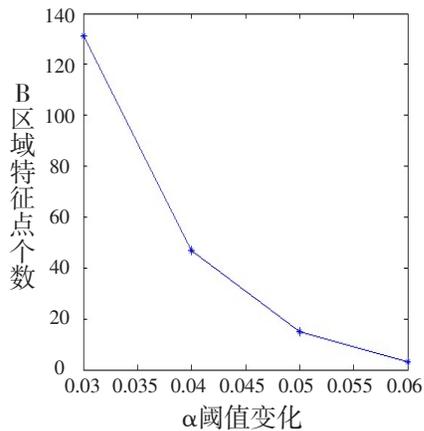
图3 实验图左半部



图4 实验图右半部



(a)



(b)

图5 SIFT 算法检测图像的特征点个数与阈值  $\alpha$  的变化曲线

点数和  $\alpha$  的变化曲线。

从 (a)、(b) 图中分析比较得出, 图像的特征点数量会随着  $\alpha$  的不断增大而逐渐减少, 如果  $\alpha$  大于 0.06, 图像中基本检测不出特征点, 会造成无法完成匹配。而  $\alpha$  小于 0.03, 虽检测出大量特征点, 但它也计算时间偏长, 而匹配的成功率提高较少。

### 2.3 匹配对数随着阈值 $\beta$ 的变化曲线

阈值  $\beta$  会直接影响图像的匹配对数, 是图像之间是否能匹配成功的关键。如果  $\beta$  偏大, 虽然匹配对数的数量是增加了, 但同时也引入了一些误匹配的对数。反之  $\beta$  偏小, 过多地剔除了匹配对数, 会导致一些正确匹配对数的减少, 最终有可能使图像无法匹配成功。在给定了阈值  $\alpha$  的区间时, 实验中选取  $\beta$  的区间为 0.5 ~ 0.8, 其中步长定为 0.1。图 6 是在确定了阈值  $\alpha$  的情况下, 得到阈值  $\beta$  与匹配对数之间的变化曲线。

从图 6 中可以得出随着阈值  $\alpha$  的逐渐减小, A、B 区的特征点匹配对数在不断地增加。虽然总体匹配的对数在增加, 但是相应误匹配对数也增加了。

### 2.4 参数估计

根据图像的匹配对, 计算图像的变换关系, 假设图像间仿射变换关系如下:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \\ m_4 & m_5 & m_6 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

设  $p=(x_1, y_1)$ ,  $q=(x_2, y_2)$  是两幅图像匹配的特征点对, 则满足:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \\ m_4 & m_5 & m_6 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由 2.3 分析得到的匹配对数中, 会存在着大量的误匹配对数。文中通过最小二乘法与 RANSAC<sup>[12]</sup> 算法相结合, 最终计算出图像间的相互变换关系。

### 2.5 成功率随着阈值 $\alpha$ 、 $\beta$ 的变化

虽然经过上述的方法剔除了部分误匹配点, 但仍然存在错误的匹配点对。定义成功率  $\delta$  = 正确的匹配对数/匹配对数, 阈值  $\alpha$ 、 $\beta$  同时影响着图像匹配的成功率。

从图 7 中得出随着  $\alpha$  的减小成功率  $\delta$  也相应的降低, 说明了误匹配的特征点对数增加了。所以如何平衡阈值  $\alpha$ 、 $\beta$  对图像的成功匹配非常关键。

### 2.6 自适应匹配算法的步骤

针对以上的分析, 可以得出  $\alpha$  和  $\beta$  的变化对图像正确的匹配具有一定的规律。为了平衡阈值  $\alpha$ 、 $\beta$ , 提出了一种阈值自适应的匹配算法, 即在算法中不断的改进阈值, 直至寻找到正确的匹配点。该算法具体步骤如下:

读取图像并柱面投影, 柱面投影为了满足视觉一致性, 分别对两幅图像裁剪, 得到 A、B 区域。

利用高斯卷积核生成尺度图像, 在尺度图像中生成高斯差分图像。

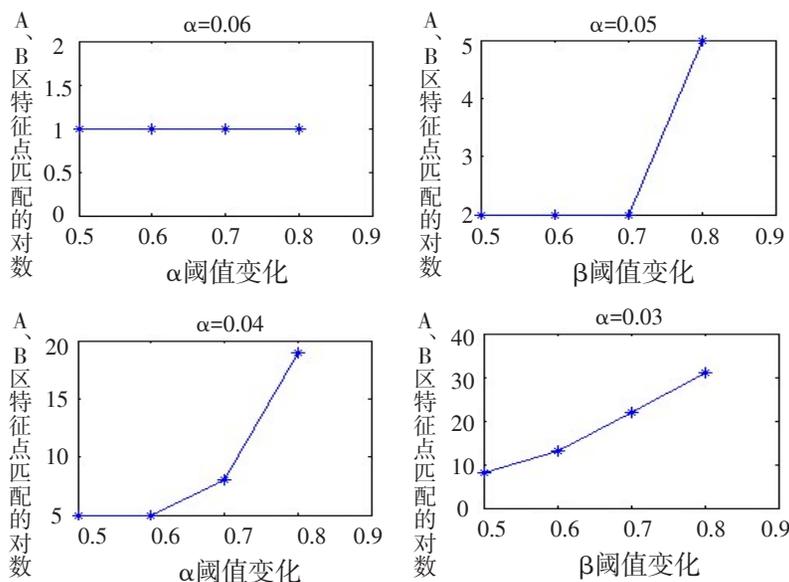


图 6 A、B 区特征点匹配的对数与  $\alpha$ 、 $\beta$  阈值的变化曲线

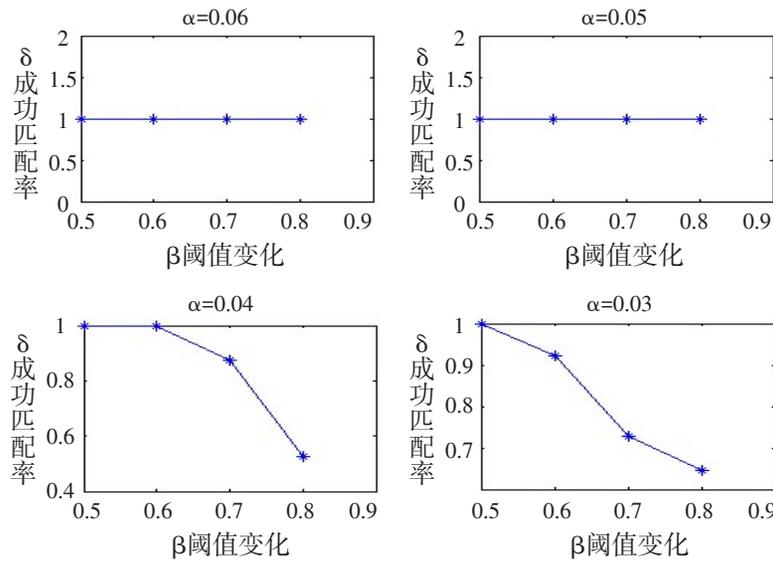


图7 成功率  $\delta$  与阈值  $\alpha$ 、 $\beta$  的变化曲线

检测特征点时，首先满足极值的条件和利用 Hessian 矩阵去除边缘点。

为了满足特征点应有明显的变化，DOG 图像中的点满足  $D(x,y,\sigma) \geq \alpha$ ， $\alpha$  先取 0.06。

以关键点为中心的领域计算梯度方向，选取最大的为主方向。

关键点附近把  $16 \times 16$  分为  $4 \times 4$  的子窗口，先将每个点的梯度方向旋转为关键点的主方向，利用高斯加权生成一个 128 维的特征向量。

判断特征点的匹配条件为：

$$\min_{q_j \in Q} d(p_i, q_j) = \min_{p_i \in Q} d(p_i, q_j) \text{ 且小于 } \beta, \beta \text{ 先为 } 0.5.$$

若匹配的特征点对大于 3 对，则利用图像间的仿射关系剔除部分误匹配点，否则跳转到 7， $\beta$  依次取 0.6-0.8，步长 0.1。

若  $\beta$  为 0.8，还不满足匹配的特征点对大于 4 对，则跳转到 4， $\alpha$  依次取 0.05-0.03，步长 0.01。

### 3 实验结果和结论

实验利用阈值自适应匹配算法对某科技园的 6 张图像（如图 3、图 4、图 8）进行实验，实验数据如表 3.1 所示。

该实验得出：原 SIFT 算法检测到的匹配的特征点数量较多，这正是 SIFT 特征最初用于目标识别的原因。目标识别需要从大量的图像数据库中匹配较小的目标，所以较小的目标需要丰富的特征信息进行描述。而图像配准不同于目标识别，它只需要使用少量的匹配点对（仿射变换只需要 3 对正确的匹

配点对即可进行配准），本文算法比原 SIFT 快主要是它只需要检测出至少 3 对正确的匹配点对，极大的提高了匹配速度。

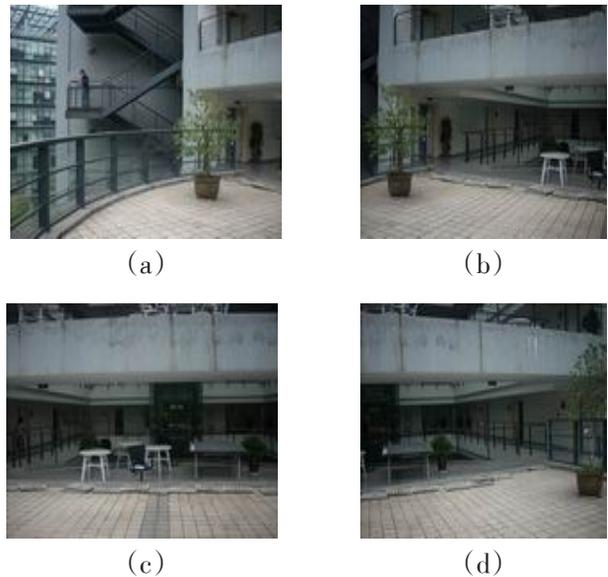


图8 实验图片

表 1 原 SIFT 算法和本文算法匹配时间的比较

图像	原SIFT算法		本文算法	
	匹配对数	完成匹配时间	匹配对数	完成匹配时间
图 8(a) 和 (b)	35	152s	8	97s
图 8(b) 和 (c)	45	161s	11	103s
图 8(c) 和 (d)	27	145s	5	89s
图 8(d) 和图 3	30	129s	8	94s
图 3 和图 4	23	119s	6	84s

该算法主要通过阈值的自适应变化来控制匹配的对数,正确的匹配对数越少完成匹配的时间就越快,而且利用RANSAC和最小二乘法剔除了部分误匹配点,提高了匹配的成功率。图9是科技园6张图像拼接后的部分全景图。

从图9中可以看出拼接后的图像基本上不存在重影和鬼影等问题,该算法不仅加快了计算速率,而且提高了匹配的成功率,拼接的图像效果也较好,而且该算法对那种高分辨率的图像拼接提供了一种快速可行的方法。

一种快速可行的方法。

SIFT本身存在的阈值较多,如何控制好关键的阈值对图像的成功匹配非常重要,实验发现阈值 $\alpha$ 、 $\beta$ 能很好的控制特征点的检测数目和匹配的对数。算法中利用阈值 $\alpha$ 、 $\beta$ 的自选择性原则来提高图像匹配的速率和成功率,并结合RANSAC剔除误匹配点取得了较好的拼接效果,本文算法为全景图像拼接的应用提供了鲁棒性更强的方法。



图9 全景图

#### 参考文献:

- [1] 周天宏,张建清.基于图像映射法的快速无缝拼接技术[J].武汉理工大学学报,2008,30(7):131-133.
- [2] 洪春勇,徐琨.一种基于信息熵的灰度失真图像的快速拼接方法[J].南昌大学学报,2006,30(6):605-607.
- [3] 胡社教,葛西旺,苏菱.基于相位相关的全景图像拼接[J].合肥工业大学学报,2007,30(1):30-31.
- [4] HUTTENLOCHER D P,KLANDERMAN G A,RUCKLIDGE W J. Comparing images using the Hausdorff distance[J].IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1993,15(9):850-863.
- [5] 王舒鹏,方莉.利用Moravec算子提取特征点实现过程分析[J].电脑知识与技术,2006(3):125-126.
- [6] HARRIS C,STEPHENS M.A combined corner and edge detector[A].Proceedings of the fourth Alvey Vision Conference[C].Manchester, UK 1988:147-151.
- [7] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features[A].International Conference on Computer Vision[C]. Corfu, Greece, Sep 1999:1150-1157.
- [8] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision,2004,60(1): 91-110.
- [9] KE Y,SUKTHANKAR R.PCA-SIFT: a more distinctive representation[A].Proc. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition[C], 2004:511-517.
- [10] BROWN M,LOWE D G. Automatic panoramic image stitching using invariant features [J].International Journal of Computer Vision, 2006, 74(1):5973.
- [11] 霍春雷,周志鑫,刘青山等.基于SIFT特征和广义紧互对原型对距离的遥感图像配准方法[J].遥感技术与应用,2007,22(44): 524-526.
- [12] YANG Min, SHEN Chun-lin. A random sampling algorithm for fundamental matrix robust estimation [J].Journal of Applied Sciences.2004.22(2):178-182.
- [13] 刘瑞祯,于仕琪.Open CV 教程-基础篇[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006.

(责任编辑:潘修强)