

文章编号: 0258-7025(2007)11-1548-05

基于兴趣点伪泽尼克矩的图像拼接

杨占龙, 郭宝龙

(西安电子科技大学智能控制与图像工程研究所, 陕西 西安 710071)

摘要 针对基于特征匹配的传统图像拼接方法对旋转和噪声敏感的问题, 提出了一种基于兴趣点伪泽尼克(Zernike)矩的图像自动拼接技术。利用哈里斯(Harris)角检测器获取图像中的兴趣点, 计算以兴趣点为中心邻域窗口的伪泽尼克矩, 通过比较各个兴趣点邻域伪泽尼克矩的欧氏距离提取出初始特征点对, 根据几何变换模型剔除伪特征点对, 最后利用得到的几何变换模型, 对输入图像进行几何变换后将两幅图像间的重叠区域进行图像融合, 完成图像的拼接。实验表明, 该方法对平移、任意角度的旋转以及噪声均具有鲁棒性, 对于具有小尺度变换(小于 1.5)的图像仍然具有很好的拼接效果。

关键词 图像处理; 图像拼接; 兴趣点; 伪泽尼克矩; 角检测器; 几何变换

中图分类号 TP 391.41 **文献标识码** A

Image Mosaic Technique Based on Pseudo-Zernike Moments of Interest Points

YANG Zhan-long, GUO Bao-long

(Institute of Intelligent Control and Image Engineering, Xi'dian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract The traditional feature-based algorithm was found to be sensitive to rotations and noise, and an automatic image mosaic technique based on pseudo-Zernike moments of interest points was proposed. Firstly the Harris corner detector was used to gain the interest points, and the pseudo-Zernike moments defined on the interest point neighborhood were computed. Through comparing the Euclidean distance of these pseudo-Zernike moments to extract the initial feature points pair, the spurious feature points pair were rejected by geometric transform model. After the geometric transform of input images, the overlapping region of two images was fused and the image stitching was finished. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm is robust to translation, rotation, noise and slight scaling (under 1.5).

Key words image processing; image mosaic; interest points; pseudo-Zernike moments; corner detector; geometric transform

1 引言

图像拼接是一个日益流行的研究领域, 它已经成为照相绘图学、计算机视觉、图像处理和计算机图形学研究中的热点。图像拼接解决的问题一般是通过对齐一系列空间重叠的图像, 构造一幅无缝的、高清晰的图像, 它具有比单个图像更高的分辨率和更大的视野。

图像拼接有两个关键步骤, 即图像配准和图像融合, 其中图像配准是核心。目前图像配准的方法大致分为两类: 基于区域的方法和基于特征的方法, 其中基于图像特征的配准方法目前采用最多^[1~5]。文献[6]中提出利用兴趣点邻域窗口的互相关系数进行匹配, 得出正确的匹配对, 但因为矩形窗口不能覆盖具有旋转关系的两幅图像的同一部分, 所以这

收稿日期: 2007-03-06; 收到修改稿日期: 2007-06-25

基金项目: 国家 863 计划(2006AA01Z127)和国家自然科学基金(60572152)资助项目。

作者简介: 杨占龙(1976—), 男, 陕西人, 博士研究生, 主要从事模式识别、图像处理、虚拟现实的研究。

E-mail: bobdragon@163.com

导师简介: 郭宝龙(1962—), 男, 陕西人, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为模式识别与智能系统、图像处理和图像通信等。E-mail: blguo1199@163.com

种方法只适合于具有平移和小角度旋转关系的图像配准。文献[7]等提出了计算圆形窗口的互相关系数甚至计算窗口每一种几何变换的互相关系数来处理旋转、仿射等更加复杂的几何变形,但是该方法对灰度变化和噪声的影响都比较敏感。针对上述问题,本文提出了基于兴趣点伪泽尼克(Zernike)矩的图像拼接方法(Interest points pseudo-Zernike moments, IPPZM),首先通过哈里斯(Harris)角检测器^[8]提取图像兴趣点,然后计算以兴趣点为中心邻域的伪泽尼克矩^[9,10]进行兴趣点匹配得到初始匹配对,根据伪泽尼克矩向量空间欧氏距离以及几何变换模型有效地剔除了伪匹配对的干扰。最后根据得到的正确映射关系对图像进行变换及拼接。实验结果证明了本算法的高效性。

2 算法原理与技术流程

IPPZM 算法流程如图 1 所示。

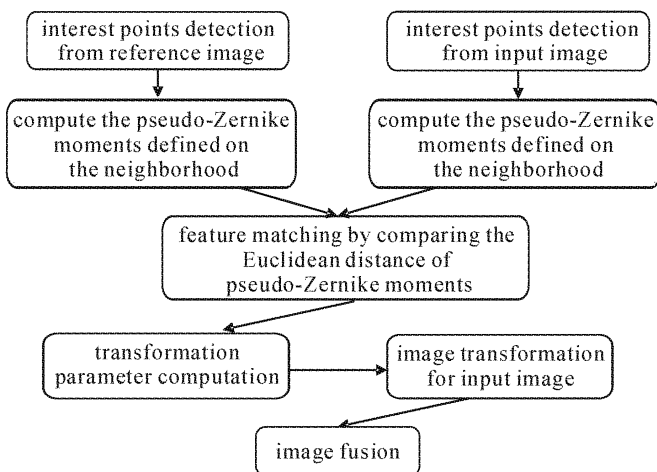


图 1 IPPZM 算法流程

Fig. 1 Flowchart of the IPPZM algorithm

2.1 兴趣点检测

目前存在许多兴趣点检测技术,哈里斯角检测器是其中最可靠的技术之一。哈里斯角检测器的基本思想是使用自相关函数来确定信号发生二维变化的位置:

1) 计算图像亮度 $I(x, y)$ 在点 (x, y) 处的梯度:

$$\begin{cases} X = I \otimes (-1, 0, 1) = \partial I / \partial X \\ Y = I \otimes (-1, 0, 1) = \partial I / \partial Y \end{cases} \quad (1)$$

2) 构造自相关矩阵:

$$\begin{cases} \mathbf{A} = X^2 \otimes w \\ \mathbf{B} = Y^2 \otimes w \\ \mathbf{C} = (XY) \otimes w \end{cases} \quad (2)$$

这里 \otimes 表示卷积算子, $w = \exp[-(x^2 + y^2)/2\delta^2]$ 为高斯窗平滑函数。由(2)式得到对称矩阵 $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{C} \\ \mathbf{C} & \mathbf{B} \end{bmatrix}$, 它是一个二阶实对称矩阵, 必然存在两个特征值 α 和 β 。

3) 提取兴趣点: 如果特征值 α 和 β 是极大值时, 点 (x, y) 是一个兴趣点。即行列式和矩阵 \mathbf{M} 的对角线元素和满足

$$C_P = \det(\mathbf{M}) - k \cdot \text{trace}^2(\mathbf{M}) > T, \quad (3)$$

这里 T 为一个固定的阈值, k 为参数, 通常取值 $k = 0.04 \sim 0.06$ 。 C_P 定义为一个兴趣点的角度值。

4) 粗提取: 定义 $S(P, Q)$ 为两幅图像中点 P 和点 Q 的相似度。实验证明, 两个正确的匹配点间的相似度一定大于 0.60

$$S(P, Q) = \frac{\min(C_P, C_Q)}{\max(C_P, C_Q)}. \quad (4)$$

在进行特征匹配之前对匹配点进行粗提取, 去除不可能匹配的点, 将大大提高特征匹配时正确匹配的概率。

2.2 特征匹配

在进行兴趣点提取后, 需要找出两幅图像兴趣点之间的对应关系, 即特征匹配。特征匹配的方法很多, 可以根据邻域的灰度值, 特征的空间分布, 以及一些不变量匹配。这里采用兴趣点邻域的不变量作为匹配的特征, 其中泽尼克矩是目前最准确的一种矩。由于伪泽尼克矩比泽尼克矩具有更多的矩数量以及更好的抗噪声性能, 这里采用伪泽尼克矩作为兴趣点的特征。

2.2.1 伪泽尼克矩的计算

图像的伪泽尼克矩是将图像映射到一组基函数上得到的, 称为伪泽尼克矩的基, 记为 $\{V_{nm}(x, y)\}$ 。这组基构成了单位圆 $(x^2 + y^2 \leq 1)$ 内的一组完备正交集, 其定义为

$$V_{nm}(x, y) = V_{nm}(\rho, \theta) = R_{nm}(\rho) \exp(jm\theta), \quad (5)$$

式中 n 为非负整数, m 为整数, 两者满足: $|m| \leq n$ 。 ρ, θ 分别为极坐标下像素的半径和角度。 $R_{nm}(\rho)$ 为径向多项式(Radial polynomial), 定义为

$$R_{nm}(\rho) = \sum_{s=0}^{n-|m|} \frac{(-1)^s (2n+1-s)! \rho^{n-s}}{s! (n+|m|+1-s)! (n-|m|-s)!}, \quad (6)$$

这些多项式相互正交, 满足关系

$$\iint_{x^2+y^2 \leq 1} V_{nm}^*(x, y) V_{pq}(x, y) dx dy = \frac{\pi}{n+1} \delta_{np} \delta_{mq}, \quad (7)$$

其中, $\delta_{np} = \begin{cases} 1 & n = p \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \delta_{mq} = \begin{cases} 1 & m = q \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

连续图像 $f(x, y)$, (n, m) 阶伪泽尼克矩定义为

$$\mathbf{A}_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x, y) V_{nm}^*(x, y) dx dy, \quad (8)$$

对于数字图像, 在极坐标下, (8) 式变为

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{nm} &= \frac{n+1}{\pi} \sum_{\rho \leq 1} \sum_{0 \leq \theta \leq 2\pi} f(\rho, \theta) V_{nm}^*(\rho, \theta) \rho = \\ &= \frac{n+1}{\pi} \sum_{\rho \leq 1} \sum_{0 \leq \theta \leq 2\pi} f(\rho, \theta) R_{nm}(\rho) \exp(-jm\theta) \rho. \end{aligned} \quad (9)$$

计算图像的伪泽尼克矩时, 选图像的兴趣点为极坐标的原点, 将单位圆内的像素映射为极坐标, 单位圆外的像素在计算时不予考虑。

2.2.2 伪泽尼克矩的性质

伪泽尼克矩的幅度具有旋转不变的性质。设在极坐标下原始图像为 $f(\rho, \theta)$, 则其旋转 α_1 角度后的图像 $f^r(\rho, \theta)$ 的伪泽尼克矩 \mathbf{A}_{nm}^r 与原始图像的伪泽尼克矩 \mathbf{A}_{nm} 关系为

$$\mathbf{A}_{nm}^r = \mathbf{A}_{nm} \exp(-jm\alpha_1), \quad (10)$$

于是, $|\mathbf{A}_{nm}^r| = |\mathbf{A}_{nm}|$ 。因此, 伪泽尼克矩的幅度具有旋转不变性。

2.2.3 伪泽尼克矩的选择

数字图像的像素离散性质使得伪泽尼克矩的计算产生误差, 不同阶矩的计算精确度不同。因此, 必须对矩进行优化选择。选择矩时主要考虑两点: 1) 当矩的阶数高于某一个值 N_{\max} 时, 计算量大且计算不再准确, 实验中取 10 阶; 2) Liao 等指出, 重复度为 $m = 4i (i = 0, 1, 2, \dots)$ 的矩计算是不准确的^[10], 应当去除。而由于矩的共扼对称性, 剩下的矩只有一半是独立的。记选取的矩集合为 \mathbf{S} , 即 $\mathbf{S} = \{\mathbf{A}_{nm}, n \leq N_{\max}, m \geq 0, m \neq 4i\}$ 。

通过比较兴趣点之间特征向量 \mathbf{S} 的欧氏距离可以得到两幅图像兴趣点之间的对应关系。即对于参考图像中的每一个兴趣点 S_p , 分别计算该点的特征向量与输入图像中每一个兴趣点特征向量的欧氏距离, 距离越小则说明两点之间的特征向量越相似, 我们取距离最小的点作为参考图像中点 S_p 在输入图像中的匹配点。这样可以计算出参考图像中每一个兴趣点在输入图像中的匹配点, 当然这样的匹配对中会包含部分伪匹配对。去除伪匹配对的过程是在计算映射关系时同时完成的, 因此将在下一节中讨论。

2.3 计算映射模型

映射模型的确定, 需要从匹配对中找出正确的匹配关系。 s, θ, t_x, t_y 4 参数的仿射模型, 变换矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} s \cos \theta & -s \sin \theta & t_x \\ s \sin \theta & s \cos \theta & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

这里 s 为尺度变换参数, θ 为旋转的角度, t_x, t_y 分别为 x 方向和 y 方向上的平移量。点 $\mathbf{p} = (x_p, y_p)^T$ 到点 $\mathbf{q} = (x_q, y_q)^T$ 的映射关系为

$$\begin{bmatrix} x_q \\ y_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s \cos \theta & -s \sin \theta \\ s \sin \theta & s \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix}, \quad (12)$$

从公式(12) 可以得出两个方程。要求解四个未知量 s, θ, t_x, t_y 需要两对匹配点。假设参考图像和输入图像提取的兴趣点集合分别为 P, Q , (p_i, p_j) 和 (q_a, q_b) 分别为 P, Q 中对应的两对匹配点, 映射关系为 G_r , 即 $q_a = G_r(p_i), q_b = G_r(p_j)$ 。那么

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{q_a} \\ y_{q_a} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s \cos \theta & -s \sin \theta \\ s \sin \theta & s \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{p_i} \\ y_{p_i} \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} x_{q_b} \\ y_{q_b} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s \cos \theta & -s \sin \theta \\ s \sin \theta & s \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{p_j} \\ y_{p_j} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (13)$$

根据 $q_b - q_a = G_r(p_j) - G_r(p_i)$, 可以得到

$$\begin{bmatrix} x_{q_b} - x_{q_a} \\ y_{q_b} - y_{q_a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s \cos \theta & -s \sin \theta \\ s \sin \theta & s \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{p_j} - x_{p_i} \\ y_{p_j} - y_{p_i} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\Rightarrow \overrightarrow{q_b q_a} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + s \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \overrightarrow{p_i p_j}, \quad (15)$$

$$\Rightarrow s = |\overrightarrow{q_b q_a}| / |\overrightarrow{p_i p_j}|, \quad \theta = \theta_{\overrightarrow{q_b q_a}} - \theta_{\overrightarrow{p_i p_j}}. \quad (16)$$

以 $M_{a,i}(s, \theta)$ 记作满足映射关系 $(0, 0, s, \theta)$ 的数量, 那么正确的映射模型就是 $M_{a,i}(s, \theta)$ 取得最大值时所对应的映射关系。根据公式(16), 对上一节中得到的兴趣点的匹配对中每任意两对匹配点计算映射关系 $(0, 0, s, \theta)$, 以 $M_{a,i}(s, \theta)$ 记作所有的兴趣点匹配对中满足该映射关系的匹配对的数量。因为在所有的匹配点对中, 满足相同映射关系的正确匹配对数量一定比满足一种随机映射关系的错误匹配对数量大, 所以当 $M_{a,i}(s, \theta)$ 取得最大值时所对应的映射关系就是正确的映射模型, 不满足该映射关系的匹配对即为伪匹配对, 在此过程中就会被剔除。

2.4 图像融合

在完成了映射模型的计算——即图像配准后, 需要对图像进行融合, 使图像在重叠区域能够平滑

过渡。本文采用常用的加权平均法^[11],假设 f_1, f_2 是两幅待拼接的图像, f 是融合后的图像,那么

$$f(x, y) = \begin{cases} f_1(x, y) & (x, y) \in f_1 \\ d_1 f_1(x, y) + d_2 f_2(x, y) & (x, y) \in (f_1 \cap f_2) \\ f_2(x, y) & (x, y) \in f_2 \end{cases} \quad (17)$$

式中 d_1, d_2 表示权重值,与重叠区域的宽度有关,并且 $d_1 + d_2 = 1, 0 \leq d_1, d_2 \leq 1$ 。在重叠区域中 d_1 由 1 渐变至 0, d_2 由 0 渐变至 1,由此实现在重叠区域中由 f_1 平滑过渡到 f_2 。

3 实验结果及分析

为验证 IPPZM 算法的性能,对大量实验图像进行了测试,实验条件:PC IV 2.0G 256MB RAM, VC++6.0, Matlab6.5。图 2~4 展示了本算法的主要步骤,图 2 是利用哈里斯角检测器对航拍图像提取的兴趣点,两幅图像兴趣点数量分别为 129 和 148;利用兴趣点邻域的伪泽尼克矩以及欧氏距离得到正确的匹配对 19 个,如图 3(a), (b) 所示;最后根据正确匹配对得到映射关系: $s = 1.0001, \theta = 15.0413^\circ$ (正确值为 $s = 1, \theta = 15^\circ$),对输入图像进行几何变换并拼接,结果如图 4 所示。作为比较,对不同旋转角度的不同图像分别采用了

传统的灰度值匹配和互相关系数匹配法进行了测试,从实验结果(表 1)中可以看出,IPPZM 算法在各种情况下得到的正确匹配点对数量最多,特别当图像存在旋转的时候效果更加突出。对于旋转、尺度变换以及噪声等多种因素同时存在的情况下,传统的图像拼接算法因为已经不能得到正确的匹配关系而拼接失败(表 1 中用 * 表示),但是 IPPZM 算法仍然能够准确计算出匹配关系实现图像拼接。同时,从表 1 中可以看出粗提取对于兴趣点正确匹配的重要性。当图像具有大的旋转角度时甚至将正确匹配的概率提高了一倍。图 5 是 IPPZM 算法在全景图像拼接中的应用。

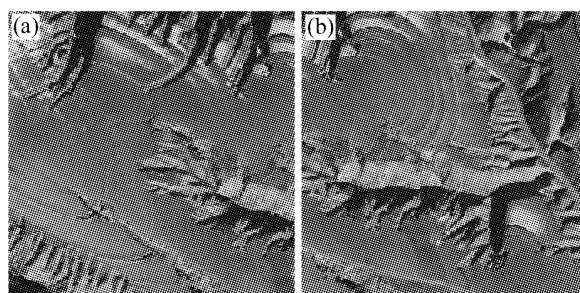


图 3 伪泽尼克矩得到的正确匹配对

- (a) 图 2(a) 匹配后得到的正确匹配对;
(b) 图 2(b) 匹配后得到的正确匹配对

Fig. 3 Correct matching points pair extracted by pseudo-Zernike moments

- (a) the correct matching points pair of Fig. 2(a);
(b) the correct matching points pair of Fig. 2(b)

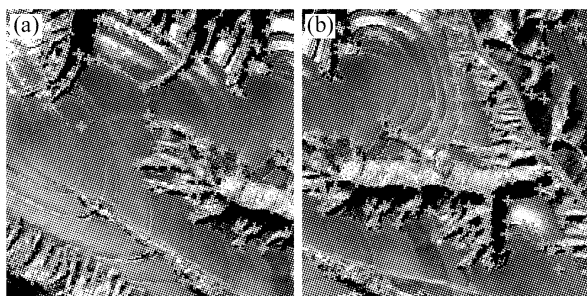


图 2 提取兴趣点

兴趣点数为(a) 129, (b) 148

Fig. 2 Interest points detection

the number of interest points is (a) 129 and (b) 148

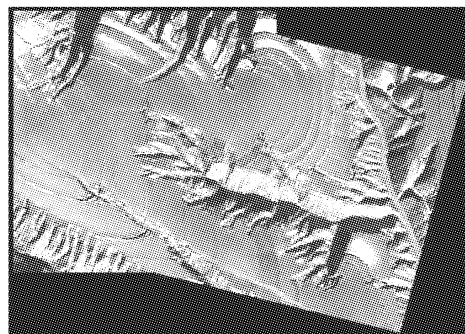


图 4 拼接结果

Fig. 4 Mosaic result

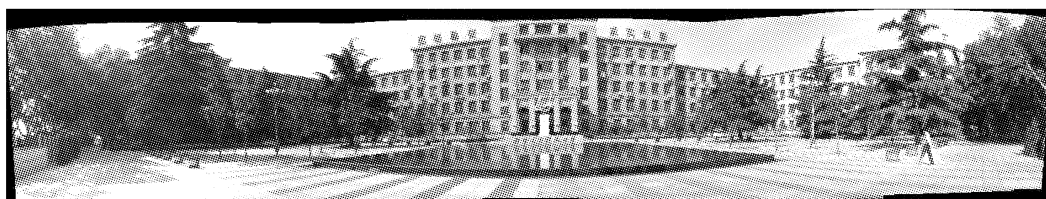


图 5 西电主楼全景拼接结果

Fig. 5 Main building panorama of Xi'dian University

表 1 IPPZM 算法与传统方法的比较

Table 1 Comparison of IPPZM algorithm and traditional algorithms

Image	Angle	Intensity matching		Correlation matching		IPPZM matching	
		No crude extraction	With crude extraction	No crude extraction	With crude extraction	No crude extraction	With crude extraction
a	0°	33	33	28	28	28	33
b	15°	13	16	11	13	11	19
c	45°	7	14	*	5	16	35
c zoom in 10%	45°	5	11	*	5	9	11
c added noise	45°	6	6	*	*	9	11
c added noise zoom in 10%	45°	*	5	*	*	7	10

4 结 论

针对具有任意旋转关系和曝光条件不同的图像提出了一种基于兴趣点伪泽尼克矩的图像拼接方法。大量实验结果表明本算法对存在平移以及任意角度旋转甚至小尺度变化的图像能够实现准确的拼接,对噪声以及灰度变化具有很好的鲁棒性,同时有效地降低了计算量。由于本算法对于平移以及旋转的鲁棒性,在全景图像拼接应用中不再需要三角架作为支点来避免拍摄过程中照相机绕光轴的旋转,不需要进行几何参数的校准,大大提高了全景图像拼接的实用性。

参 考 文 献

- 1 Li Song, Yuanhua Zhou, Jun Zhou. Progressive refinement for robust image registration [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(7): 392~394
- 2 Famao Ye, Lin Su, Shukai Li. Automatic multi-resolution image registration based on genetic algorithm and Hausdorff distance [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(7):386~388
- 3 Wu Jianning, Guo Baolong, Feng Zongzhe. An image mosaic technique based on interest points feature matching [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(6):733~737
件建宁,郭宝龙,冯宗哲.一种基于兴趣点特征匹配的图像镶嵌技术[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(6):733~737
- 4 Xuan Yang, Jihong Pei. Image registration by maximization of mutual information based on edge width matching using particle swarm optimization [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(9):510~512
- 5 Leng Xiaoyan, Xue Mogen, Han Yusheng *et al.*. Sequence image stitching based on area feature and cross correlation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(5):602~605
冷晓艳,薛模根,韩裕生等.基于区域特征与灰度交叉相关的序列图像拼接[J]. *红外与激光工程*, 2005, **34**(5):602~605
- 6 H. Hanaizumi, S. Fujimura. An automated method for registration of satellite remote sensing images [C]. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'93, 1993. 1348~1350
- 7 R. Berthilsson. Affine correlation [C]. Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition, ICPR'98, 1998. 1458~1461
- 8 C. Harris, M. Stephens. A combined corner and edge detector [C]. Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference. Plessey, United Kingdom; Alvey Vision Conference, 1988. 147~151
- 9 Cho-Huak Teh, Roland T. Chin. On image analysis by the methods of moments [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1988, **10**(4):496~513
- 10 Simon X. Liao, Mirosław Pawlak. On the accuracy of Zernike moments for image analysis [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, **20**(12):1358~1364
- 11 Richard Szeliski. Video mosaics for virtual environments [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1996, **16**(2):22~30