

文章编号 1004-924X(2012)05-1117-09

基于复合 Zernike 矩相角估计的图像配准

易 盟*, 郭宝龙, 张 旭

(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:提出了一种基于复合 Zernike 矩相角估计的图像配准方法。首先,利用尺度不变检测子 Harris-laplace 检测图像中的兴趣点作为初始特征点,计算以兴趣点为中心、邻域具有尺度不变性的 Zernike 矩;提出一种鲁棒的相角估计方法,用于估计两个归一化区域的旋转角度值。然后,利用 Zernike 矩的幅值和相角信息,通过比较每个兴趣点邻域 Zernike 矩的相似度提取出初始匹配点。最后,提出一种迭代角度修正算法用于精确估计变换参数,并对输入图像进行几何变换后将两幅图像配准。实验结果表明,该算法可在尺度缩放、任意角度旋转以及噪声等复杂条件下实现图像的高精度配准。当旋转角度误差小于 20° 时,图像的平均覆盖率达到 94.125%,有效降低了误匹配的概率。

关键词:图像配准;兴趣点;尺度不变性;相位和幅值分量;Zernike 矩

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122005.1117

Image registration based on complex Zernike moment phase angle estimation

YI Meng*, GUO Bao-long, ZHANG Xu

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

* *Corresponding author, E-mail: yimeng0120@163.com*

Abstract: An image registration method based on complex Zernike moment phase angle estimation was proposed. Firstly, the Harris-laplace operator was used to detect interest points in an image, and the interest points were regarded as initial feature points. The Zernike moments defined on the scale normalized interest point neighborhood were computed, and a new robust estimation method for phases was presented to compute the rotation angle between two normalized regions. Then, the magnitude and phase angle information of Zernike moments were combined and used to measure the Euclidean distance between two matching regions. Finally, an iterative refined angle method was proposed to estimate the parameters accurately, and the image registration was finished after the geometric transform of input images. The experimental results show that the proposed algorithm implements a precise image registration under the scaling, arbitrary rotation and noise. The average coverage percentage achieves 94.125% when the rotation angle error is less than 20° , which reduces the false match rate effectively.

Key words: image registration; interest point; scale invariance; phase and magnitude component; Zernike moment

收稿日期:2011-09-19;修订日期:2011-12-14.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60802077);国家青年基金资助项目(No. 61003196)

1 引言

图像配准是将同一场景在不同条件下得到的两幅或多幅图像融合在一起的过程,图像配准技术可以应用于数字视频、虚拟现实技术、医学图像分析、运动目标检测及识别等领域^[1-2]。

图像配准方法一般可分为基于区域的方法和基于特征的方法,其中采用最多的是基于图像特征的配准方法^[3-4]。该方法首先需要提取参考图像中一些保持不变的特征点;然后搜索这些特征点在输入图像中的对应点,从而生成一组同名点对;最后利用这些相互匹配的同名点对计算两幅图像的变换关系或映射函数。基于图像特征方法的主要优点是它提取了图像的显著特征,减少了运算量,且对图像灰度的变化具有一定的鲁棒性;但另一方面,这种方法对于特征提取和特征匹配的错误更加敏感^[3]。文献[5]和文献[6]分别采用尺度不变特征变换算法(SIFT)^[7]和加速鲁棒特征算法(SURF)^[8]作为特征描述符进行特征匹配,但这些算法在检测出正确匹配对的同时,也会产生错误的匹配对,并且正确匹配对越多,错误的匹配对也会越多,而过多的错误匹配对可能会导致图像配准时变换模型的估计不准确;文献[9]和文献[10]分别采用 Zernike 矩和不变几何矩作为描述符来进行特征匹配,但这些方法只适用于具有较小尺度变化的图像配准,且只利用矩的幅值信息进行相似度判断,忽略了相位系数的重要性。当图像间存在大尺度变化和形变等情况,特别是两幅图像具有对称形状时,可能产生错误的匹配结果,即存在“等幅不可分”的缺点。为了克服上述问题,Jerome Revaud^[11]等人通过假设两个特征区域的角度差,并利用角度差对图像进行旋转归一化,然后结合幅值和相位信息,采用梯度下降法求取全局最小值来判断相似度,但由于图像传感器的量子效应引起的噪声,导致图像经过旋转后位置会发生偏移,因此并不能对旋转角进行精确估计。

针对上述问题,本文给出了一种基于复合 Zernike 矩相角估计的图像配准方法(Complex Zernike Moment Phase Angle, CZMPA)。其思路是首先利用 Harris-laplace 检测器^[12]在图像中提取特征尺度上的兴趣点;以兴趣点为中心,取兴趣点尺度比例大小的圆形邻域作为特征区域,利用几何矩对不同大小的特征区域进行尺度归一化

并计算这些特征区域的 Zernike 矩,提出一种利用相位系数迭代估计旋转角度的方法,用于鲁棒地估计两个尺度归一化区域的旋转角度值,并结合 Zernike 矩的幅值和相角信息比较兴趣点邻域之间的相似性,提取初始匹配对;然后利用匹配对的旋转角度差值有效地剔除伪匹配对的干扰,最后根据正确映射的关系对图像进行变换及配准,实验结果证明了本算法的有效性。

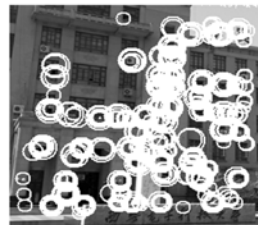
2 算法原理

2.1 鲁棒的 Zernike 矩特征提取

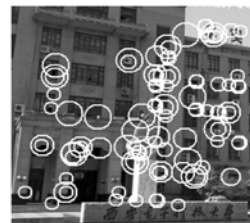
2.1.1 基于 Harris-laplace 不变特征检测

本文采用 Harris-laplace^[12]检测方法分别对两幅图像提取兴趣点,该检测子能够提取具有尺度不变性的图像特征。该检测子首先使用 Multi-scale-Harris 度量来初步定位尺度空间内的初始点;然后在整个尺度空间内,根据规范化的 LoG (Laplace of Gaussian) 方程的极大值判断每个尺度的初始点,看其是否可以使 LoG 函数取得极值,如果 LoG 方程在该点存在局部极值,就保留该点。

图 1 分别给出了对场景图像进行 Multi-scale-Harris 初始点检测和在特征尺度上提取具有尺度不变兴趣点及其邻域的结果。



(a) Multi-scale-harris 初始点
(a) Initial points of multi-scale harris



(b) 使用 Harris-laplace 检测出的兴趣点及其邻域
(b) Interest points and their neighborhoods detected with Harris-laplace

图 1 尺度不变性兴趣点检测

Fig. 1 Detection of scale invariant interest points

2.1.2 Zernike 矩

Zernike 矩^[13]是由一组单位圆内的正交基函数构成的。对于一幅数字图像,阶数为 p ,重复度为 q 的 Zernike 矩定义如下:

$$Z_{pq} = \frac{p+1}{\pi} \iint_{x_i^2+y_j^2 \leq 1} f(x, y) V_{pq}^*(x, y) dx dy, \quad (1)$$

其中, V_{pq}^* 表示基函数 V_{pq} 的复共轭, $V_{pq}(x, y)$ 定义如下:

$$V_{pq}(x, y) = V_{pq}(\rho, \theta) = R_{pq}(\rho) \exp(iq\theta), \quad (2)$$

$R_{pq}(\rho)$ 为径向多项式(Radial polynomial),其定义如下:

$$R_{pq}(\rho) = \sum_{s=1}^{p-|q|} \frac{(-1)^s (2p+1-s)! \rho^{p-s}}{s!(p+|q|+1-s)!(p-|q|-s)!} \quad (3)$$

图 2 为基函数 $V_{pq}(\rho, \theta)$ 的实部和虚部图像实例。值得注意的是,每个基函数 $V_{pq}(\rho, \theta)$ 的实部和虚部的相位差为 $\pi/2$, 即为一对正交子集;同时,当重复度为 q 时,函数沿着方位角 θ 被分割成 q 个环扇区域,而函数的环形模式由 p 和 q 共同决定。

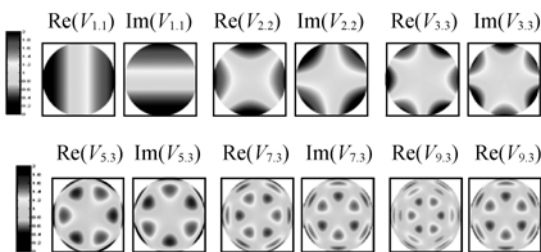


图 2 $V_{pq}(\rho, \theta)$ 的实部和虚部图
Fig. 2 Real part and imaginary part of $V_{pq}(\rho, \theta)$

2.1.3 基于尺度不变的 Zernike 矩描述符

本文首先选择以 harris-laplace 检测的兴趣点为原点,设其坐标为 (p_1, p_2) ,特征尺度为 σ_1 ,根据下式生成圆形的特征区域:

$$(x-p_1)^2 + (y-p_2)^2 = (k\sigma_1)^2. \quad (4)$$

选取参数 $K=2.5$,即半径为 $2.5\sigma_1$ 的圆为特征区域,这样当两幅图像发生尺度变化时,对应的特征区域包含相同的局部图像内容。由于 Zernike 矩在发生尺度变化时不完全具有不变性,因此需要再对兴趣点邻域进行尺度归一化,并将归一化的区域表示为矩向量描述符。

本文采用基于几何矩的方法^[14],利用下式对一幅图像 $I(x, y)$ 计算零阶几何矩 m_{00} :

$$m_{00} = \sum_x \sum_y I(x, y), \quad (5)$$

则归一化参数为 $\alpha = \sqrt{\beta/m_{00}}$,其中 β 为预先设置的常数,归一化后的图像为 $I(x/\alpha, y/\alpha)$ 。

由于像素离散性产生的 Zernike 矩向量误差会导致不同阶计算精度不同^[13],所以必须对矩进行优化选择。试验中取矩的阶数为 $12(p \leq 12, q \geq 0)$,设选取的矩集合为 Z ,即 $Z = \{Z_{pq}, p \leq 12, q \geq 0\}$ 。

2.2 基于复合 Zernike 矩的特征匹配

文献[11]中,Jerome 等人提出一种结合 Zernike 矩的幅值和相位信息识别 2D 和 3D 目标的算法,该方法通过直接比较两个具有旋转角度差的 Zernike 矩向量的欧氏距离,并经过化简,通过求取(6)式的余弦函数的全局最小值来判断对应关系:

$$f_N(\phi) = \sum_{q=1}^N A_q \cos(q\phi + B_q). \quad (6)$$

上式是以 2π 为周期的函数,该函数拥有最多 p 个局部最小值和 q 个局部最大值,由采样定理知,当在 Nyquist 频率为 $F=1/T=N/\pi$,连续选择两个采样点时,函数值的变化比较平稳,即不会有大幅度的变化。因此通过选择两个采样点相邻的距离小于 π/N ,然后采用梯度下降法计算出旋转角度值,并带入欧式距离公式来判定特征的对对应关系。这里注意到,该方法对角度的估计是在离散域中进行的。为了精确地估计角度,采样的间距必须尽量小。设选取的间距为 0.01° , $(p, q) = (10, 10)$,这样产生了 360×100 个采样点,采用梯度下降法得到的最小值有 $\frac{360 \times 100}{2}$ 个。另外,这种方法可能面临计算多峰值的不确定情况。

本文提出一种新的对旋转角度 α 估计的方法,该方法通过在连续空间进行计算,避免了在离散空间产生的误差,并将兴趣点邻域 Zernike 矩的相位和幅值信息结合在一起判断兴趣点之间的相似性。

2.2.1 Zernike 矩相角迭代估计

设原始图像为 I ,对其旋转 α 角度后得到图像 I^R ,则 I 与 I^R 的 Zernike 矩存在如下关系:

$$|Z_{pq}^R| = |Z_{pq} \exp(-jmq\alpha)| \quad \varphi_{pq}^R = \varphi_{pq} - q\alpha, \quad (7)$$

其中 $|Z_{pq}|$ 为 Zernike 矩的幅值, φ_{pq} 为 Zernike 矩的相位值。如果分别对两幅图像旋转具有相同重复度和阶数的相位系数, 则旋转后的 Zernike 矩表示为:

$$Z'_{pq} = Z_{pq} e^{-jq\varphi_{n,m}}, Z'^R_{pq} = Z^R_{pq} e^{-jq\varphi_{n,m}}, \quad (8)$$

则由公式(6)有:

$$\begin{aligned} \varphi'^R_{pq} &= \varphi^R_{pq} - q\varphi_{nm} = \varphi^R_{pq} - q\{\varphi_{nm} - m\bar{\alpha}\} = \\ &= \varphi^R_{pq} + q\bar{\alpha} - q\varphi_{nm} + q(m-1)\bar{\alpha} = \\ &= \varphi_{pq} - q\varphi_{nm} + q(m-1)\bar{\alpha} = \\ &= \varphi'_{pq} + q(m-1)\bar{\alpha}. \end{aligned} \quad (9)$$

本文利用相位信息的不同阶数和重复度, 通过迭代估计的方法求取两个特征区域的旋转角度值。取 $m=2, n=\{2, 4, 5, 8, 10, 12\}$, 设旋转角度估计值为 $\bar{\alpha}$, 令初始值 $\bar{\alpha}_0=0, \omega_0=0$, 其计算如公式(10)所示:

$$\bar{\alpha} = \sum_q \frac{1}{\omega_{q-1} + \omega_q} (\omega_{q-1} \cdot \bar{\alpha}_{q-1} + \omega_q \cdot \bar{\alpha}_q), \quad (10)$$

其中:

$$\begin{cases} \bar{\alpha}_q = \sum_p \sum_n \left[\frac{1}{6} \cdot \left(\frac{\varphi'^R_{pq} - \varphi'_{pq}}{q} \right) \right] \\ \omega_q = \sum_p [|Z'_{p,q}| + |Z_{k,p,q}|] \\ \varphi'^R_{pq} = \varphi^R_{pq} - q\varphi_{n,2}, \varphi'_{pq} = \varphi_{pq} - q\varphi_{n,2} \end{cases} \quad (11)$$

2.2.2 基于 Zernike 矩幅相信息的相似性度量

令 $\varphi_{pq} = (\varphi^r_{pq} - \varphi_{pq})$ 表示为两个矩向量的相位差, 利用 2.2.1 节方法求得两个特征区域的旋转角度估计值 $\bar{\alpha}$, 则 $|\varphi_{pq} - q\bar{\alpha}|$ 可表示为经过旋转后两个区域的绝对相位偏差值, 取值范围为 $[0, 2\pi]$, 由此可得到归一化的基于相位的相似度距离为:

$$D_{\text{ANG}} = \sum_p \sum_q \frac{\min\{|\varphi_{pq} - q\bar{\alpha}|, 2\pi - |\varphi_{pq} - q\bar{\alpha}|\}}{\pi}, \quad (12)$$

另外, 可得到归一化的基于幅值的相似度距离为:

$$D_{\text{MAG}} = \sum_p \sum_q \frac{|Z^r_{pq}| + |Z_{pq}|}{\sum_{p,q} (|Z^r_{pq}| + |Z_{pq}|)}. \quad (13)$$

由于式(12)和(13)的取值范围都为 $[0, 1]$, 因此可以将两个度量方法结合并分别赋予不同权重

值, 得到的相似度距离公式表示为:

$$D = \omega_1 D_{\text{ANG}} + \omega_2 D_{\text{MAG}}, \quad (14)$$

其中 ω_1 和 ω_2 分别为 D_{ANG} 和 D_{MAG} 的权重值, 并且满足关系式 $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。其中, ω_1 和 ω_2 的选择依据相应组成部分的贡献度决定。一种选择是利用基于权系数调整又称之为相似性度量更新的方法, 它是根据反馈信息适当调整距离公式中权系数来达到优化匹配结果的目的。首先, 权重被设置成一些预设值, 通过计算出的匹配结果, 对于符合用户要求的情况, 分析它们的各个分量, 对贡献度大的权值增大, 贡献度小的就减小权值。经过反馈迭代后, 权重便可以接近最优值。由于该相关反馈的问题超出了本文的研究范围, 在本实验中为了简单起见, 假设每一个部分对相似性判断具有同等的贡献度, 因此, 本文取 $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$ 。

对于参考图像中的每一个兴趣区域 $I_i(x, y)$, 分别计算该区域矩向量与输入图像每一个兴趣区域 $I_j(X, Y)$ 矩向量的相似度, 将距离最小的区域所对应的特征点作为匹配点, 则可以得到两幅图像兴趣点之间的对应关系。

2.3 基于角度估计迭代修正的精确特征匹配

考虑到图像噪声和畸变的影响, 一些特征点位置易发生偏移^[15]。为提高配准精度, 在初始匹配的基础上采用角度估计迭代修正方法获取精确的特征点对。当两幅图像发生一定的旋转时, 本文通过设定一个误差阈值, 保留那些旋转角度值在允许误差范围以内的匹配对, 而对超出误差范围的匹配对进行剔除。

使用角度估计迭代修正的过程如下:

- (1) 首先利用初始匹配估计变换模型 F 的 8 个未知参数, 得到模型参数所对应旋转角度值 $\hat{\alpha}$;
- (2) 将每对匹配对的 Zernike 角度估计值 $\bar{\alpha}_i$ 与 $\hat{\alpha}$ 比较, 计算偏差, 保留允许误差范围内的匹配点对(即内点), 记录下内点集合 $j \leftarrow j+1$;
- (3) 选择所有 K_j 个匹配对, 采用保留下来的内点集合重新估计变换参数;
- (4) 如果循环次数 j 小于预先设定值, 执行(1), 否则结束。

在步骤(2)中, 设 T 为误差阈值, 如果满足关系式 $|\hat{\alpha}_i - \bar{\alpha}| > T$, 则判定第 i 对匹配对为内点。其中阈值 T 取决于最终的配准精度要求(本文取 $T=5^\circ$)。

3 实验与分析

3.1 特征匹配的评估方法

为了有效地评估正确匹配对和错误匹配对之间的关系,通过模型变换后利用区域覆盖误差^[16]来对提取的参考图像和变换图像特征区域进行检验,区域覆盖误差是指在已知平面映射关系的条件下,交集区域和并集区域的覆盖率,即表示为:

$$O_e = 1 - (A \cap H^T B H) / (A \cup H^T B H), \quad (15)$$

其中 A 和 B 为两个待匹配区域, H 为已知的两个区域之间的映射关系。对于一个用户给定的覆盖误差阈值 O_t , 如果满足 $O_e < O_t$, 则这对区域为正确的匹配对, 如果覆盖率 $O_e > O_t$, 则认为是错误的匹配对。为了验证本文匹配方法的有效性, 也就是保证匹配点对多的同时保证正确率, 这里使

用查准率 R (recall) — 查全率 P (precision) 的方法, 查全率 P 为正确匹配对 T 与满足区域覆盖测试 $O_e < O_t$ 的匹配对 F 的比值, 查准率 R 为正确匹配对 T 与所有匹配对 G 的比值。一般情况下查全率高, 查准率就低, 反之, 查准率高, 查全率就低^[15]。同时定义它们如下:

$$R = \frac{T}{F}, 1 - P = \frac{G - T}{G}. \quad (16)$$

3.2 本文算法性能分析

为了验证本文算法在图像配准方面的有效性, 对大量实验图像进行了测试。实验所使用的图像有场景图像 (图 3(a))、遥感图像 (图 3(d)) 以及具有 4 年时差的图像 (图 3(g)), 大小均为 256×256 , 其中图 3(a)、图 3(d) 的待配准图像之间均存在着旋转和尺度变化, 其配准结果如图 3(c)、(f) 和 (i) 所示。

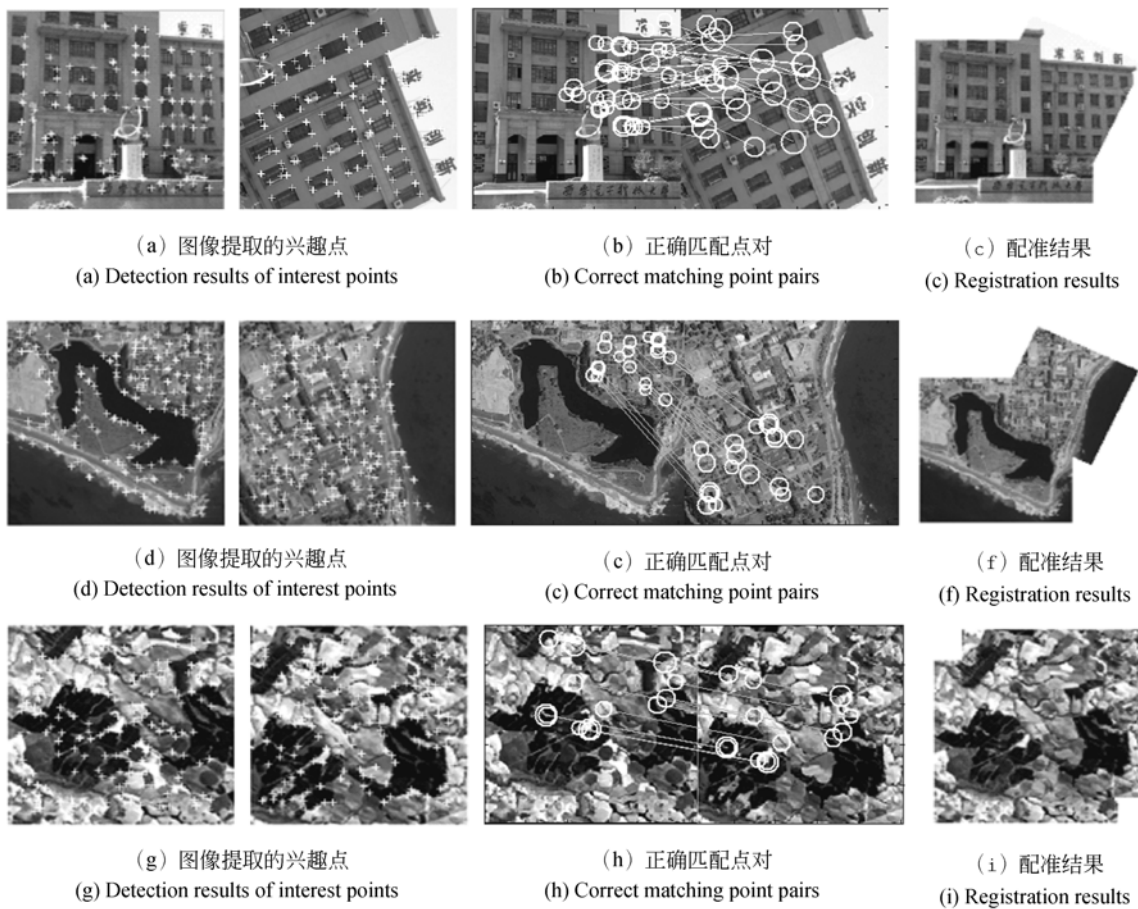


图 3 场景图像、遥感图像和 4 年时差图像的配准

Fig. 3 Registration of scene image, remote sensing image and image with 4-year time lag

表 1 一致匹配对旋转角度估计误差

Tab. 1 Rotation angle estimation errors for corresponding pairs

Transform type	Method	<5°		<10°		<15°		<20°	
		mean	coverage	mean	coverage	mean	coverage	mean	coverage
Rotation	CZMPA	1.301	96.548%	1.360	97.692%	1.557	99.181%	1.557	99.181%
	IZM	2.246	79.575%	3.919	82.552%	4.552	89.644%	5.913	91.024%
Scaling	CZMPA	1.414	90.623%	1.635	95.541%	1.850	97.340%	2.101	99.108%
	IZM	2.221	66.722%	3.511	84.366%	4.640	89.676%	5.080	89.971%
Noise	CZMPA	1.543	86.033%	1.848	97.533%	2.093	98.231%	2.315	98.945%
	IZM	2.121	60.259%	4.073	73.342%	5.854	83.861%	6.755	86.520%

表 2 本文算法与 IPPZM 以及 IZM 算法的比较

Tab. 2 Comparison of proposed algorithm and IPPZM, IZM algorithms

Image	(Scale, Angle)	IPPZM			IZM			CZMPA		
		right	false	RMS	right	false	RMS	right	false	RMS
a	(1, 15°)	57	11	6.74	73	8	5.15	73	0	4.77
b	(1, 45°)	21	19	7.15	58	16	5.84	59	3	5.12
c	(1.3, 15°)	17	31	11.53	40	17	7.94	43	4	5.45
d	(1.5, 15°)	5	57	13.61	31	18	9.79	35	6	6.51
a added noise	(1, 15°)	11	43	19.34	18	35	15.03	22	14	12.91
d added noise	(1.5, 15°)	*	66	*	*	51	*	6	22	21.35

以图 3 中场景图像为例说明本算法的主要步骤,图 3(a)中白色“+”为使用尺度不变 Harris-laplace 检测器提取的兴趣点,两幅图像兴趣点数量分别为 157 和 129;图 3(b)为两幅图像的一致匹配对分布图,正确的兴趣点匹配对为 32 个。从匹配图像中可以看出在发生了尺度和旋转变化的情况下,连线所对应的兴趣点的圆形邻域所代表的图像局部内容几乎是一致的;最后由正确匹配对得到映射关系,通过变换矩阵对输入图像进行几何变换并配准。图 3(a)、图 3(d)和图 3(g)分别为西安电子科技大学主楼图像、遥感图像以及具有 4 年时差的兴趣点检测图像,图 3(b)、图 3(e)和图 3(h)分别对应的匹配点对图。图 3(c)、(f)和(i)为上述 3 幅图的配准结果,能够观察到图像间的配准效果良好。

3.3 与矩算法比较

3.3.1 旋转角度误差比较

算法性能差异可归结为旋转角度估计的精度。为了验证相角估计的精确性对特征匹配性能

的影响,采用了文献[11]改进的 Zernike 正文矩 (IEM) 匹配方法进行了测试对比,以判断本文算法(CZMPA)的优劣。文献[11]通过在相似度量函数的一个周期内均匀选择 $2N$ 个点,并采用梯度下降法计算出旋转角度值。而本文利用加权和归一化的相角差值,迭代估计图像的旋转角度值。选取了图 4 两幅遥感图像进行测试,表 1 为在不同角度、尺度变化和噪声的干扰下,旋转角度误差 (ϵ_{angle} , 旋转角度估计值和实际值的差值) 在分别小于 5° 、 10° 、 15° 和 20° 时,统计得到的匹配对平均角度误差值(mean)和覆盖率(coverage)。其中覆盖率为匹配对的旋转角度误差 (ϵ_{angle}) 小于设定值 ($\epsilon < 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ 或 20°) 的数量与全部匹配对数量的比值。可以看出,当 $\epsilon_{\text{angle}} < 20^\circ$ 时, CZMPA 算法的平均旋转角度误差要小于 IZM 的平均旋转角度误差。当 $\epsilon_{\text{angle}} < 5^\circ$ 时, CZMPA 算法的覆盖率大于 86%, 而 IZM 算法的覆盖率在 60% 到 80% 之间。

3.3.2 匹配性能评估

为了进一步验证本文算法匹配性能的有效性,

对图 3(d)两幅遥感图像在不同角度、尺度变化和噪声的干扰下,利用 Harris-laplace 检测子提取特征点,然后分别采用文献[9]匹配方法(伪 Zernike 矩,IPPZM)、文献[11]匹配方法(IZM)以及本文匹配方法(CZMPA)进行测试。表 2 给出在不同条件下得到的正确匹配点对数、错误匹配点对数以及配准后的均方误差值(RMS)。从表中可以看出,本文

算法在各种情况下均能够取得较好的配准结果,而且精度较高,特别是当图像存在旋转和尺度变化时效果更加突出。对于旋转、尺度变化以及噪声等多种因素同时存在的情况下,文献[9]方法以及文献[11]方法已经不能得到正确的匹配关系而配准失败(表 2 中用 * 表示),但是本文的算法仍然能够准确计算出匹配关系实现图像配准。

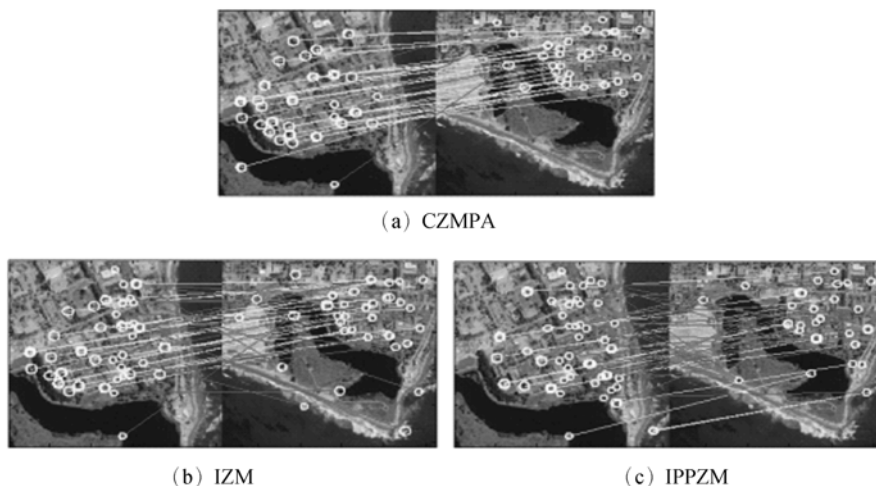


图 4 利用 3 种方法得到的正确匹配对和错误匹配对
Fig. 4 Correct matches and false matches using three methods

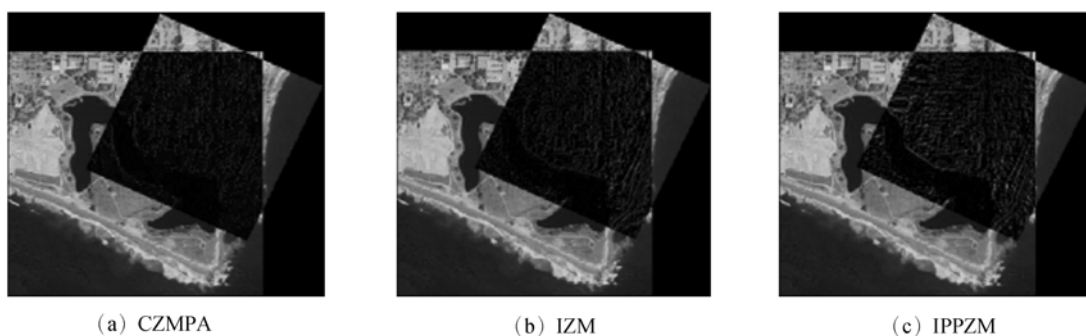


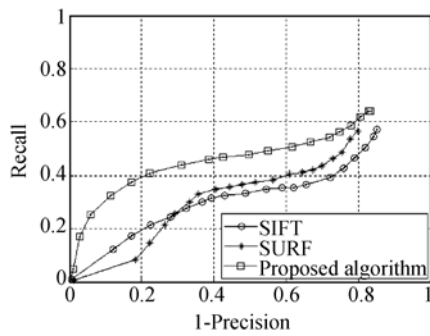
图 5 利用 3 种方法得到的配准差分图
Fig. 5 Intensity differences of images after registered using three methods

图 4 和图 5 为两幅遥感图像尺度比为 1 : 1.3、角度差为 15°的情况下,分别利用 CZMPA 方法、IZM 方法和 IPPZM 方法得到的匹配结果和配准后的差值图像。3 种方法分别有 4 对、17 对和 31 对错误匹配对,得到的正确匹配对分别为 43 对、40 对和 17 对。

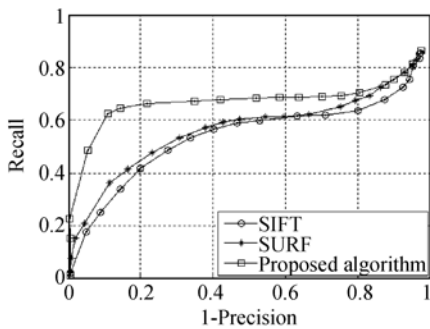
3.4 与 SIFT、SURF 算法比较

用本文匹配方法和 SIFT 匹配方法以及 SURF 匹配方法分别对图 3(a)和图 3(d)两幅具有尺

度和旋转变化的图像基于查准率—查全率方法进行了评估,如图 6(a)、(b)所示。理想的匹配结果是在具有低查错率的同时检测到尽量多的正确匹配对,因为随着查错率值变大,错误匹配对也会增多。通过图 6 可以发现,本文方法得到最高查全率,特别是在查错率小(<0.5)的时候,本文匹配方法比基于 SIFT 的匹配方法和基于 SURF 的匹配方法明显拥有更高的查全率,也就是说本文的方法拥有更大的正确匹配对比例,因而更符合实



(a)



(b)

图 6 尺度和旋转变化的查准率-查全率曲线图

Fig. 6 Precision-recall curves for scale and rotation changes

参考文献:

- [1] ALI S, REILLY V, SHAH M, *et al.*. Motion and appearance contexts for tracking and reacquiring targets in aerial videos[C]. *IEEE CVPR*, 2007: 1-6.
- [2] 朱娟娟, 郭宝龙. 复杂场景中基于变块差分的运动目标检测[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(1): 183-191.
- ZHU J J, GUO B L. Moving object detection based on variant block difference in complex scenes[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 183-191. (in Chinese)
- [3] BARBARA Z, JAN F. Image registration methods: a survey[J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(11): 977-1000.
- [4] 龚卫国, 张旋, 李正浩. 基于改进局部敏感散列算法的图像配准[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(6): 1375-1383.
- GONG W G, ZHANG X, LI ZH H. Image registration based on extended LSH[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6): 1375-1383. (in Chinese)
- [5] MATTHEW B, DAVID G L. Automatic panoramic image stitching using invariant features[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2007, 74(1): 59-73.
- [6] ZHI L S, ZHANG J P. Remote sensing image registration based on retrofitted SURF algorithm and trajectories generated from lissajous figures[J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(3): 491-495.
- [7] DAVID G L. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [8] BAY H, ESS A, TUYTELAARS T, *et al.*. Speeded-up robust features (SURF)[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3): 346-359.
- [9] 杨占龙, 郭宝龙. 基于兴趣点伪泽尼克矩的图像拼接[J]. *中国激光*, 2007, 34(11): 1548-1552.
- YANG ZH L, GUO B L. Image mosaic technique

际的特征匹配需要^[15],因为在查错率增大的同时,得到的正确匹配对增加,但较高的查错率值也带来更多的错误匹配对,这样在进行图像配准时,过多的错误匹配对可能会导致变换模型的估计不准确,因此,本文的方法具有更好的匹配效果。

4 结 论

针对具有大尺度、旋转和曝光条件不同的图像,提出了一种基于复合 Zernike 矩相角估计的图像配准方法。大量实验结果表明,本算法对存在尺度以及旋转变化的图像能够实现准确的配准,由于本算法对于尺度、旋转以及噪声的鲁棒性,在实际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,并且可以大范围调焦距,不需要进行几何参数的校准,从而具有更强的适用性。但是,该算法目前只适用于具有纹理信息的图像配准,在以后的工作中,将试图结合伪 Zernike 矩的幅值和相位信息,探寻一种能够对平滑或手绘图像进行配准的方法。

- based on pseudo-Zernike moments of interest points [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(11): 1548-1552.
- [10] JIGNESH S, SUPRAVA P, HEMANT G. Image registration using NSCT and invariant moment[J]. *International Journal of Image Processing*, 2010, 4(2):119-130.
- [11] JEROME R, GUILLAUME L, ATILLA B. Improving Zernike moments comparison for optimal similarity and rotation angle retrieval[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009,31(4):627-636.
- [12] KRYSYAN M, CORDELIA S. Scale & affine invariant interest point detectors[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(1):63-86.
- [13] SIMON X L, MIROSLAW P. On the accuracy of Zernike moments for image analysis[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(12):1358-1364.
- [14] ZHENGWU Y, TAO F. On the accuracy of image normalization by Zernike moments[J]. *Imagevision Computing*, 2010, 28(3): 403-413.
- [15] 覃凤清,何小海,陈为龙,等.一种图像配准的超分辨率重建[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2): 409-416.
- QIN Q F, HE X H, CHEN W L, *et al.*. Super-resolution reconstruction method of image registration[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 409-416. (in Chinese)
- [16] KRYSYAN M, CORDELIA S. A performance evaluation of local descriptors[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2005, 27(10):1615-1630.

作者简介:



易 盟(1982—),男,陕西西安人,博士研究生,2008年于西北工业大学获得硕士学位,主要从事模式识别、图像处理、虚拟现实的研究。E-mail: yimeng0120@163.com



张 旭(1984—),男,甘肃兰州人,博士研究生,2007年于西安电子科技大学获得学士学位,主要从事智能图像检索方面研究。E-mail: xuzhang@mail.xidian.edu.cn



郭宝龙(1962—),男,陕西西安人,教授,博士生导师,1988年、1995年于西安电子科技大学分别获得硕士、博士学位,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。E-mail: blguo1199@126.com