

采用最优峰值的相位相关红外图像配准方法

于雪莲¹, 陈 钱^{1,2}, 隋修宝¹, 任建乐¹

- (1. 南京理工大学 江苏省光谱成像与智能感知重点实验室, 江苏 南京 210094;
2. 北京理工大学 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 对数极坐标域下的图像配准方法常因相位相关互功率谱呈现多峰分布而影响匹配准确度, 为此提出了一种基于区域最优峰值的相位相关红外图像配准方法。首先将待配准图像和参考图像转换到对数极坐标域, 其次以自适应巴特沃斯高通滤波为预处理, 最后结合归一化互相关和相位相关的相似性测度, 在合理截断互功率谱半径轴低数值段的基础上, 筛选出最优峰值实现自动配准, 同时研究了对数极坐标变换尺寸对匹配性能的影响, 给出了最优尺寸变换比。实验结果表明: 该算法对噪声污染图像表现出较好的鲁棒性, 对于存在平移、旋转和缩放的红外图像具有更高的配准精度。

关键词: 配准; 对数极坐标变换; 相位相关; 互相关; 互功率谱最优峰值

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2589-08

Registration method of infrared images based on the optimal peak of phase-correlation criterion

Yu Xuelian¹, Chen Qian^{1,2}, Sui Xiubao¹, Ren Jianle¹

- (1. Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging & Intelligence Sense, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Key Laboratory of Photo-electronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The log-polar transform is a well known space variant image registration scheme. However, due to the phase cross-power spectrum showing the multi-peak distribution, the accuracy of image registration is greatly influenced. To deal with this problem, an infrared image registration method based on the optimal peak of phase-correlation criterion was proposed. First, the source image and the reference image were converted to the log polar domain respectively. Second, the adaptive Butterworth high-pass filter was adopted to weaken the low-frequency noise. Finally, combined normalized cross-correlation and phase correlation similarity measure, the optimal peak of the cross-power spectrum was acquired based on truncating the low value of the cross-power spectrum. Moreover, the influence of LPT-image size on the matching performance was discussed and the appropriate size ratio of LPT transformation was presented. The experimental results indicate that the proposed method has higher

收稿日期: 2013-01-20; 修订日期: 2013-02-25

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2011698); 教育部博士点新教师基金(20113219120017); 中国博士后科学基金(20110491424); 江苏省博士后科学基金(1101081C)

作者简介: 于雪莲(1981-), 女, 讲师, 博士生, 主要从事红外图像处理算法的研究工作。Email: xinranxyl@163.com

导师简介: 陈钱(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电探测与图像处理方面的研究工作。Email: chenq@njust.edu.cn

precision and better anti-noisy performance than those of the normal LPT matching algorithm and is suitable for rotated, scaled and translated infrared images registration.

Key words: registration; log-polar transformation; phase-correlation; cross-correlation; optimal peak of the cross power spectrum

0 引言

图像配准在遥感成像、医学诊断、运动检测等领域获得广泛应用,然而不同时间、不同视角或不同成像模式下获取的两幅或多幅图像通常存在复杂的几何变形,如缩放、旋转和平移等,这些变形给图像的配准精度和速度带来了极大的影响。现有图像配准方法大致分为基于灰度信息、基于特征提取和基于变换域三类算法^[1]。其中,基于灰度的配准方法一般是利用整幅图像的灰度类信息,以相似性测度结合优化算法实现,这类算法的计算量通常较大,且易受遮挡或光照条件变化等因素的影响;基于特征的配准算法一般提取边缘、角点、轮廓等具有特殊代表性的图像特征进行匹配^[2],在处理具有复杂空间变换关系的图像间配准时具有优势,但要求两幅待配准图像必须包含足够多的相应特征成分,算法稳定性与计算复杂度均受所选图像特征的影响。

对数极坐标变换(Log-Polar Transform, LPT)因具有旋转和缩放不变性,是基于变换域配准中的重要方法,而且当图像受噪声污染时,该类算法通常表现出较好的鲁棒性。图像在笛卡尔坐标域中进行缩放和旋转变换时,对其傅里叶变换幅度谱进行对数极坐标变换,尺度变换和旋转角度分别呈现在极坐标域中为半径方向和角度方向的平移,而图像间的平移对幅度谱没有影响,只是存在相位谱的不同^[4-6]。受大气热辐射、远作用距离、探测器噪声等因素的影响,红外成像传感器探测到的目标的局部细节的灰度差异不明显,因而红外图像普遍存在对比度低、边缘模糊、噪声大等缺点^[3]。基于上述 LPT 性质及红外图像特点,可以利用频域配准算法估计出图像间的旋转、缩放和平移参数。近年来,基于极坐标变换的图像配准算法是研究的热点。Reddy 等人提出的 Fourier-Mellin(FM)方法,在频率域使用 LPT 变换和相位相关技术^[7],是基于变换域图像配准方法的典型代表。Zokai 等人提出使用 Levenberg-Marquardt (LMA)算

法用于匹配 LPT 变换后的图像,利用 LPT 的旋转和缩放不变性来提高算法在噪声环境下的鲁棒性^[8]。采用参考文献[7-8]中的算法配准旋转角和缩放量较大的图像时,两幅图像经 LPT 变换后不能很好地满足频域旋转和尺度性质,导致互功率谱方法的匹配点峰值下降,可能会被周围点淹没。许俊泽等人通过对灰度图像作 LPT 变换,从而使得通常意义下的缩放参数变成平移参数,进而利用互信息算法来配准^[9],能适应于存在较大缩放尺度的图像配准,但是对于同时存在平移旋转和缩放的几何变形,互信息匹配测度则需要很大的计算量。高炳像等人将 FM 变换用于红外图像配准^[10],仅仿真了存在旋转且互功率谱是单峰的情况,不具有普适性。

针对笛卡尔坐标域中的旋转和缩放会造成频率域中的低频信息产生偏差,影响匹配准确性,首先提出自适应 Butterworth 高通滤波对两幅图像的 FFT 幅度谱图进行预处理;其次研究 LPT 图像尺寸对匹配性能的影响,给出最佳尺寸变换比;最后,在合理截断互功率谱低数值段的基础上,提出了将归一化互相关(NCC)用于寻找互功率谱最优峰值,同时利用空域和频域的相似性测度,从而有效解决单一互功率谱方法固有的峰值易受淹没而使配准精度下降的问题。实验结果表明,基于最优峰值的相位相关匹配算法鲁棒性强,与传统的对数极坐标域的互相关匹配算法相比具有较高的匹配正确率,算法适应性更强,能够匹配同时存在平移、旋转和缩放的红外图像。

1 配准算法

1.1 总体框架

文中算法的基本思想是将红外待配准图像和参考图像从空间域变换到频域,利用两幅图像的傅里叶变换幅度谱进行自适应 Butterworth 高通滤波与 LPT 变换,将图像映射到对数极坐标域,采用归一化互相关和相位法相结合的匹配测度计算出两幅对数极坐标图像的互功率谱的最优峰值,估计出

待配准图像相对于参考图像延逆时针方向的旋转角度、缩放因子,待配准图像根据计算结果进行相应变换,再与参考图像在频域利用最优峰值匹配测度求出水平和垂直方向的平移量。算法的基本框架如图 1 所示。

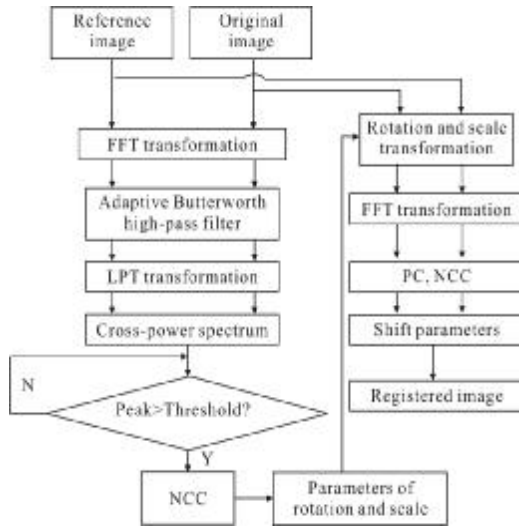


图 1 算法的原理框图

Fig.1 Block diagram of the algorithm

1.2 配准算法实现

步骤 1: 分别对待配准图像与参考图像进行二维傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)计算出各自的二维傅里叶系数矩阵;将两幅 FFT 图像通过自适应高通滤波器进行预处理;采用反向映射方法,结合双线性插值,将滤波后的二维傅里叶幅度谱转到对数极坐标域,得到待配准图像和参考图像相对应的对数极坐标图像。

(1) 频域高通滤波

由于图像间旋转和缩放变换在频域低频部分会产生量化噪声影响配准精度,需对频域图像进行预处理,采用自适应二阶巴特沃斯高通滤波器结构(见图 2)如下:

$$H(u,v) = \frac{1}{1 + [D_0/D(u,v)]^{2n}} \quad (1)$$

$$D_0 = k\sigma_1 \quad (2)$$

$$\sigma_1 = \left[\frac{1}{M \times M} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} (f_{ij} - \bar{f})^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中: \bar{f} 为图像灰度均值; σ_1 为图像的标准差; k 为比

例系数, $k \in [0.7, 1.1]$ 。

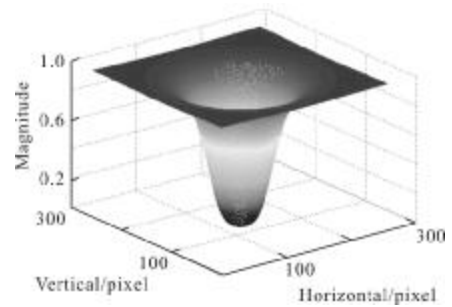


图 2 高通滤波器结构

Fig.2 High-pass filter

(2) 对数极坐标变换(LPT)

笛卡尔域中的缩放和旋转变换在对数极坐标域对应为半径和角度方向的平移。在极坐标域中, ρ 表示笛卡尔域中像素点在半径方向上距离图像中心 (x_0, y_0) 的距离, θ 表示角度。任意笛卡尔坐标系中的像素点 (x, y) 可以用 (ρ, θ) 表示其在极坐标域的坐标:

$$(\rho, \theta) \approx (\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}, \arctan \frac{y-y_0}{x-x_0}) \quad (4)$$

但图像若存在平移,对数极坐标的 (ρ, θ) 会发生改变,为了克服这一限制,算法首先对图像进行傅里叶变换,再应用两幅图像傅里叶变换的幅度谱进行 LPT 变换。 s 与 θ_0 分别表示待配准图像相对于参考图像的缩放因子与旋转角度,两幅图像的傅里叶幅度谱用极坐标表示为:

$$M_2(\rho, \theta) = M_1(\rho/s, \theta - \theta_0) \quad (5)$$

依据 LPT 定义,需对极坐标系半径方向取对数变换,表示为:

$$M_2(\log_{base}\rho, \theta) = M_1(\log_{base}\rho - \log_{base}s, \theta - \theta_0) \quad (6)$$

即

$$\begin{cases} M_2(\xi, \theta) = M_1(\xi - d, \theta - \theta_0) \\ \xi = \log_{base}\rho \\ d = \log_{base}s \end{cases} \quad (7)$$

根据公式(4)-(7),图像在笛卡尔坐标域的缩放与旋转等价于图像在对数极坐标域半径方向的平移与角度方向的平移。对数极坐标变换的示意图如图 3 所示。

步骤 2: 先采用相位法,计算两幅 LPT 图像的互功率谱的最大峰值,考察最大峰值周围的次峰值,记为集合 $\{s\}$,并对图像采用 3×3 高斯模板 $(\sigma=0.5)$ 进行

平滑滤波;再将待配准 LPT 图像按照集合 $\{s\}$ 中标记的平移量分别进行变换,两幅 LPT 图像的 NCC 最大值位置即对应最佳匹配点,得到图像的缩放因子与旋转角度。

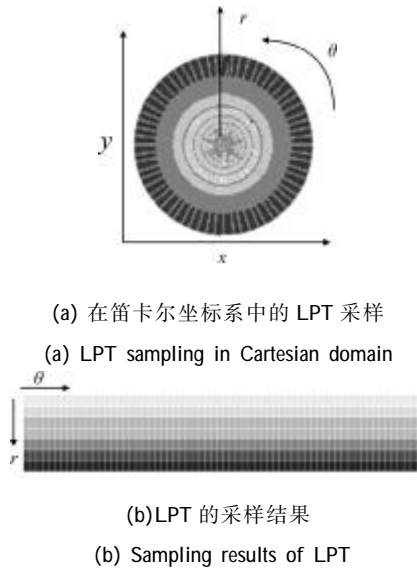


图 3 笛卡尔空间映射到对数极坐标空间

Fig.3 Cartesian space is mapped to log-polar space

(1) 相位相关(Phase Correlation, PC)法

两幅 LPT 图像 f_1 、 f_2 之间仅存在平移量 (dx, dy) , 图像 f_2 由 f_1 表示为:

$$f_2(x, y) = f_1(x - dx, y - dy) \quad (8)$$

其傅里叶变换关系表示为:

$$F_2(u, v) = e^{-j2\pi(udx + vdy)} F_1(u, v) \quad (9)$$

两者傅里叶幅度谱相同,仅差一个相位差,其交叉互功率谱的相位等于两幅图像的相位差,表示为:

$$e^{j2\pi(udx + vdy)} = \frac{F_1(u, v) \cdot F_2^*(u, v)}{|F_1(u, v) \cdot F_2^*(u, v)|} \quad (10)$$

相位差的傅里叶反变换(IFFT)为一个冲击函数,在平移量处取最大值,坐标即是图像的匹配位置。

(2) 对数极坐标域归一化互相关法(Normalized Cross Correlation, NCC)

当红外待配准图像和参考图像的旋转角和缩放量较大时,由于频域混叠和周期化等原因,两幅待配准图像经过 FFT 变换后不能很好地满足频域尺度关系,仅采用相位相关互功率谱方法进行 IFFT 变换后,得到的不再是单峰而是多峰分布,匹配点峰值下

降,正确匹配点可能会出现在局部极大值处或被周围峰值点淹没,如图 4 所示。

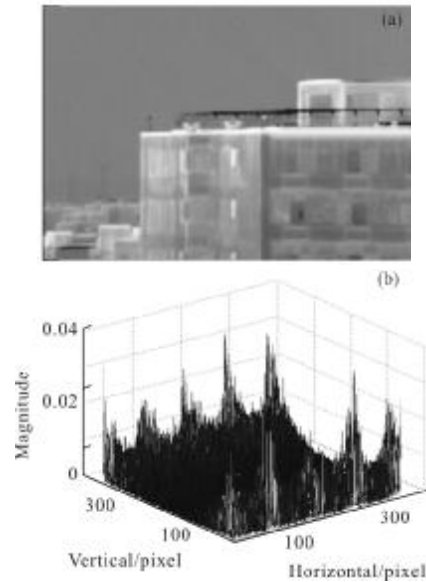


图 4 待配准图像与其互功率谱图

Fig.4 Original image and the cross-power spectrum

为了提升算法性能,较好地解决交叉互功率谱伪峰值现象,文中将 NCC 引入对数极坐标域,设定一个峰值阈值 $P_{th} = \theta P_{max}$, $\theta \in [0.75, 0.85]$,其中大于 P_{th} 的峰值坐标 (x_i, y_i) 作为候选匹配点存储下来,记为集合 $\{s\}$,再将目标 LPT 图像按照集合 $\{s\}$ 标记的平移量进行变换,分别计算变换后 LPT 图像的 NCC, NCC 取最大值的坐标对应最佳匹配点。

NCC 是空间域配准的典型算法,通过计算两幅图像的归一化互相关系数来匹配存在平移变换的图像,其对噪声具有一定的鲁棒性,但它对存在旋转的图像不能够进行匹配,且计算量通常很大。经过 LPT 变换后,图像的对数极坐标谱图会呈现相应的水平、垂直平移,而无旋转和缩放,因而利用 NCC 相似性测度具有很高的匹配准确性,且仅需对集合 $\{s\}$ 中坐标对应的平移量进行相应的互相关系数计算,能有效避免 NCC 运算量大的缺点。

根据 Cauchy-Schwartz 不等式:

$$\iint_A (I_1 \cdot I_2) \leq \sqrt{\iint_A (I_1)^2 \iint_A (I_2)^2} \quad (11)$$

对于离散数字化图像,互相关算法(CC)定义为:

$$\sum (I_1 \cdot I_2) \leq \sqrt{\sum (I_1)^2 \sum (I_2)^2} \quad (12)$$

为了不受两幅图像辐射差异过大带来的影响,引入 NCC:

$$NCC = \frac{\sum (I_1 - \bar{I}_1)(I_2 - \bar{I}_2)}{\sqrt{\sum (I_1 - \bar{I}_1)^2} \sqrt{\sum (I_2 - \bar{I}_2)^2}} \quad (13)$$

式中: I_1 、 I_2 分别为原 LPT 图像和目标 LPT 图像; \bar{I}_1 、 \bar{I}_2 为图像均值。

NCC 取最大值时对应最佳匹配位置 (x,y) , 则图像的缩放因子与旋转角度为:

$$scale = (base)^{x/2} \quad (14)$$

$$angle = (y * 360) / N \quad (15)$$

其中,待配准图像大小为 $M \times M$,对数极坐标图像大小为 $N \times N$ 。

步骤 3: 根据公式(13)、(14)的计算结果,将待配准图像做相应的旋转和缩放变换,再重复步骤(2),

计算出图像间在水平和垂直方向的平移量 Δx 、 Δy 。

1.3 LPT 变换尺寸比

随着 LPT 图像在尺度方向上分辨率的提高,即 ξ 轴上的采样点数呈线性增加,计算量会相应增大,且交叉互功率谱亦会出现多个峰值分布现象,因而计算得到的缩放因子精度并不是单调增高。为了较好地实现计算量与配准精度之间的平衡,定义 LPT 图像与 FFT 图像的最佳尺寸变换比为 str 。

FFT 图像进行 LPT 变换:

$$\log \rho_{max} = \log_{base}^{(M/2)} \quad (16)$$

$$N = str \times M \quad (17)$$

式中: ρ_{max} 为距离 FFT 图像中心的最大距离; $base$ 为 LPT 变换的底,则尺度方向上分辨力为 ρ_{max}/N 。

设 $str \in [0.7, 2.1]$, str 不同取值对匹配正确率的影响见表 1。

表 1 不同图像尺寸变换比对应的配准结果

Tab.1 Registration results with different size transformation ratio

str	0.7	1	1.2	1.5	1.8	2.1
angle1=60°	61.938 1°	59.657 1°	60°	60.458°	59.428 6°	58.837 5°
angle2=80°	79.265 3°	79.2°	78.857 1°	79.468 1°	79.694 7°	77.802 3°
scale1=0.8	0.872 9	0.823 9	0.806 3	0.755 9	0.724 0	0.654 7
scale2=1.2	1.103 5	1.162 7	1.213 8	1.267 2	1.323	1.415 7

1.4 算法复杂度分析

设图像大小为 $M \times M$, 该算法包含两次 FFT 变换和一次 IFFT 变换,则 FFT 变换复杂度表示为:

$$O(M^2 \log_2 M^2) = O(2M^2 \log_2 M) \approx O(M^2 \log_2 M) \quad (18)$$

设 LPT 图像大小为 $N \times N$, 则 LPT 变换复杂度表示为:

$$O(N^2 \log_2 N^2) = O(2N^2 \log_2 N) \approx O(N^2 \log_2 N) \quad (19)$$

设集合 $\{s\}$ 中有 λ 对 (一般 $\lambda \leq 10$) 坐标, NCC 算法复杂度为 $O(\lambda N^2) \approx O(N^2)$, 因此,该算法总的的时间复杂度为:

$$O(\max\{N^2 \log_2 N, M^2 \log_2 M\}) \approx N^2 \log_2 N \quad (20)$$

2 实验仿真

为了验证该算法的有效性,在 MATLAB7.6 平

台上进行试验仿真,利用 Sofradir 3~5 μm 波段制冷型碲镉汞红外热像仪实际采集 320×256 大小的红外图像,在无噪声情况下,对图像做随机的旋转、缩放、平移变换进行试验仿真,并对具有上述仿射变换关系的图像添加高斯随机噪声后进行配准,以检验算法的抗噪性能,同时与参考文献[6]中提出的 FM 配准方法进行性能测试比较,此外,还利用文中算法对一组实拍的红外图像进行了配准。进行仿真时,各变换参数的取值范围分别为: $scale \in [0.5, 2]$, $angle \in [0^\circ, 90^\circ]$, $\Delta x \in [-10, 10]$, $\Delta y \in [-10, 10]$, $\alpha = 0.75$, $str = 1.2$, $k = 0.8$, $\sigma = 0.5$, 比较每个系数绝对配准误差的平均值,当偏差值大于 0.4 时,认为不能准确匹配,当偏差值小于 0.05,则认为实际缩放和计算缩放的偏差较小。

对于两个有相对位移且单调下降的有限光滑

离散信号, $|F(u,v)|$ 在频率 $(0,0)$ 处的幅值往往很大, 经常是其邻域点幅值的 10 倍以上, 其交叉互功率谱相角中接近 0 的值太多, 必然导致 PC 方法错误地判断信号间无平移关系, 而把正确匹配点的峰值变为局部极大值, 实际仿真中对互功率谱半径方向坐标合理截取区间 $[5,N]$, 最大程度避免出现这种情况。此外, 由于空域图像为实信号, 而实信号的频谱幅度满足对称性: $|F(-u,-v)| = |F(u,v)|$, 即 $M(\xi, \theta)$ 存在周期性, 计算出的旋转角度存在 angle 和 $\text{angle} - \pi$ 两种结果, 需将待配准图像分别旋转 angle 和 $\text{angle} - \pi$ 角度, 用 PC 方法计算得到峰值较大一个即为所求的旋转角度, 因此为合理简化算法, 仿真时旋转角度的取值范围限定在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 。

图 5~图 8 为对图 4 做随机变换时文中算法与 FM 算法的配准误差比较结果。仿真结果表明, 文中算法的配准精度优于普通 FM 算法。

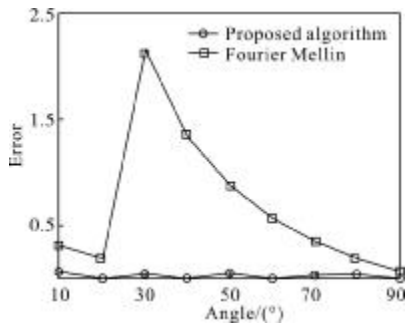


图 5 图像旋转参数的配准误差
Fig.5 Rotation angle registration error

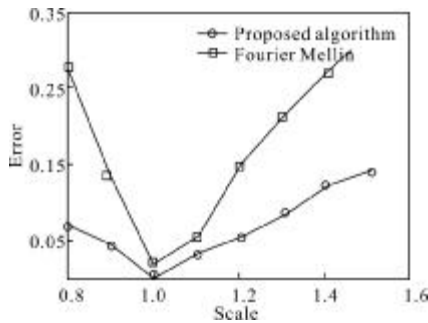


图 6 图像缩放参数的配准误差
Fig.6 Scaling registration error

对图 4 参考图像根据各仿射变换参数的取值范围生成不同的待配准图像, 它们均与参考图像同时

存在旋转、缩放和平移的变换关系, 表 2 给出了对应仿射变换参数的估计结果, 通过比较实际参数和估计参数, 误差基本在允许的范围, 验证了本算法较高的匹配精。

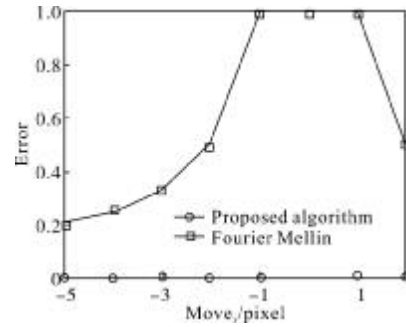


图 7 图像水平平移参数的配准误差
Fig.7 Horizontal translation registration error

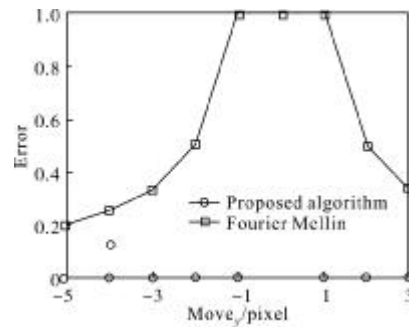


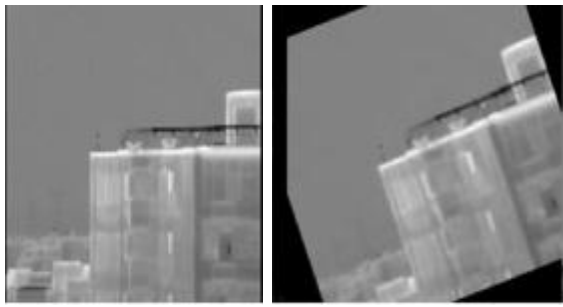
图 8 图像垂直平移参数的配准误差
Fig.8 Vertical translation registration error

表 2 不同变换参数下的配准结果

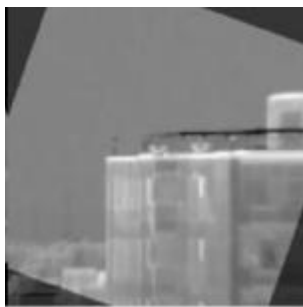
Tab.2 Registration results under different transformation parameters

scale, angle, $\Delta x, \Delta y$	Estimates of parameters	Estimation error
(1.2, 30°, 5, 3)	(1.163, 30.857°, 5, 3)	(0.037, 0.857°, 0, 0)
(1.4, 60°, 3, 7)	(1.411, 60°, 3, 6)	(0.011°, 0, 0, 1)
(0.8, 30°, 5, 8)	(0.806, 29.143°, 5, 8)	(0.006, 0.857°, 0, 0)
(0.7, 60°, 7, 3)	(0.7086, 60°, 7, 3)	(0.086, 0°, 0, 0)

图 9~图 11 分别给出了对 3 幅不同待配准图像和参考图像的匹配效果, 图 10 中还添加了一定量的零均值高斯噪声。结果表明, 该算法能很好地实现配准, 且具有良好的鲁棒性。



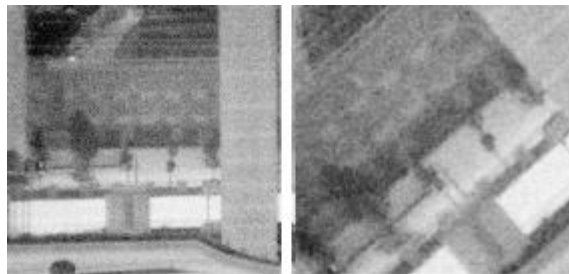
(a) 参考图像 (b) 原始图像
(a) Reference image (b) Original image



(c) 配准图像
(c) Registered image

图 9 红外图像配准效果图

Fig.9 Registration results of infrared images



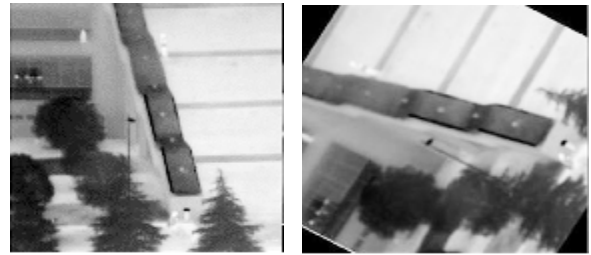
(a) 参考图像 (b) 原始图像
(a) Reference image (b) Original image



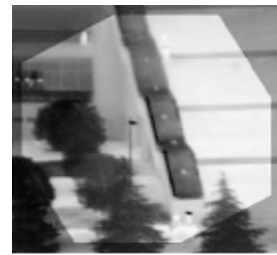
(c) 配准图像
(c) Registered image

图 10 红外图像配准效果图

Fig.10 Registration results of infrared images



(a) 参考图像 (b) 原始图像
(a) Reference image (b) Original image

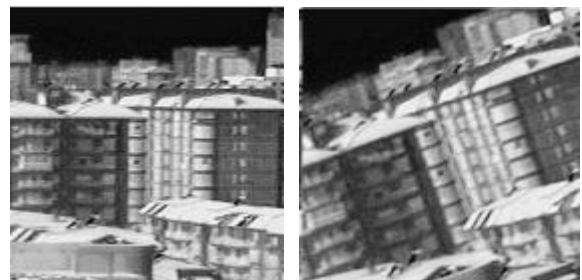


(c) 配准图像
(c) Registered image

图 11 红外图像配准效果图

Fig.11 Registration results of infrared images

为了验证文中算法对真实场景的适应性,进一步利用 8~12 μm 波段非制冷型红外热像仪采集了实际场景两幅红外图像进行实验。图 12(a)和图 12(b)是具有仿射变换关系的红外图像,图 12(c)是采用文中算法得到的配准图像,配准结果表明了算法的有效性。



(a) 参考图像 (b) 原始图像
(a) Reference image (b) Original image



(c) 配准图像
(c) Registered image

图 12 红外图像配准效果图

Fig.12 Registration results of infrared images

3 结 论

通过对 LPT 图像进行自适应巴特沃斯高通滤波减少几何变形带来的低频噪声,在结合 LPT 最佳尺寸变换比与合理截断坐标轴的基础上,将空间域的 NCC 和频率域的 PC 两种相似性测度结合,有效解决互功率谱多峰分布情况。实验表明该算法具有较高的匹配率,抗噪性能良好,能很好地应用于同时存在旋转、缩放和平移的红外图像配准。

参考文献:

- [1] Li Xiaochang, Zhu Dan. Image registration method based on region selection and scale-invariant feature [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 537-542. (in Chinese)
李小昌,朱丹. 采用尺度不变特征和区域选择的图像配准方法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 537-542.
- [2] Zhang Ruijuan, Zhang Jianqi, Yang Cui. Image registration approach based on SURF [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 160-165. (in Chinese)
张锐娟,张建奇,杨翠. 基于 SURF 的图像配准方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(1): 160-165.
- [3] Cao Zhiguo, Wu Bo. The visual scene matching algorithm based on HOG features [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 513-516. (in Chinese)
曹治国,吴博. 采用 HOG 特征的下视景象匹配算法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 513-516.
- [4] Kulin C D, Hines D C. The phase correlation image alignment method [C]//*IEEE International Conference on Cybernetics and Society*, 1975: 163-165.
- [5] Averbuch A, Keller Y. FFT based image registration [C]//*IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2002: 3608-3611.
- [6] Stone H, Orchard M, Chang E C. Sub-pixel registration of images [C]//*Proc 33rd Asilomar Conf on Signals, Systems, and Computers*, 1999: 1446-1452.
- [7] Reddy B S, Chatterji B N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996(5): 1266-1271.
- [8] Zokai S, Wolberg G. Image registration using log-polar mappings for recovery of large-scale similarity and projective transformations [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14: 1422-1434.
- [9] Xu Junze, Hu Bo, Lin Qing. Mutual information image registration based on log-polar transform [J]. *Information and Electronic Engineering*, 2009, 7(4): 289-293. (in Chinese)
许俊泽,胡波,林青. 对数极坐标变换域下互信息图像配准方法[J]. *信息与电子工程*, 2009, 7(4): 289-293.
- [10] Gao Bingxiang, Liu Jun. Infrared image registration based on Fourier-Mellin transform [J]. *Journal of Hangzhou Dianzi University*, 2011, 31(4): 185-187. (in Chinese)
高炳像,刘俊. 基于 Fourier-Mellin 变换的红外图像配准[J]. *杭州电子科技大学学报*, 2011, 31(4): 185-187.