

# 基于相位一致性和 Hough 变换的多源图像配准方法\*

于雪莲<sup>1</sup>, 陈 钱<sup>1,2</sup>, 顾国华<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学 江苏省光谱成像与智能感知重点实验室, 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:** 由于红外图像与可见光图像对比度不同,常用基于梯度幅值的特征匹配方法难以正确配准。在分析红外图像与可见光图像成像机制的基础上,提出了一种结合相位一致性边缘检测与 Hough 变换的多源图像配准新方法。该算法首先采用高通滤波和平台直方图均衡方法对红外图像进行预处理以提高红外图像的对比度,再利用具有图像对比度不变性的相位一致性边缘检测法提取两幅图像的边缘,结合 Hough 变换选取图像空间中最长的线作为特征,采用改进相位相关法作为相似性度量,在对数极坐标域下计算出两幅图像的几何变形参数。仿真实验结果表明,该方法能够以较高查准率实现红外与可见光图像自动配准,并具有较强的鲁棒性。

**关键词:** 图像配准; 相位一致性; Hough 变换; 相位相关; 对数极坐标变换

**中图分类号:** TP391

**文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20132509.2223

多模式景象匹配是指把两个不同传感器从同一景物位置拍摄的两幅图像在空间上进行对准,以确定出这两幅图像之间相对位置的过程。红外与可见光图像配准是图像融合、模式识别、视频监控等领域的关键技术,其精度和准确性也直接影响了这些领域的发展。红外图像是依据物体的温度不同或辐射率不同进行成像,属于被动成像;而可见光图像依据物体反射率不同进行成像,属于主动成像。红外图像与可见光图像由不同传感器成像,它们对应像素的亮度值关系往往是复杂且未知的<sup>[1]</sup>,可见光图像的多个亮度值映射到红外图像可能是同一个亮度值,红外图像中表现为低灰度值的景物,在可见光图像中可能表现为高灰度值,在某些区域,两幅图像甚至会出现对比度反转现象。因此,红外与可见光图像配准是一个富有挑战的课题。

多源图像配准技术主要分为两大类:基于灰度的匹配方法,直接利用图像的灰度信息,再将相关系数、相关比和互信息等作为相似性测度<sup>[2]</sup>;基于特征的匹配方法,如提取拐点、边缘以及轮廓等特征,利用二进制相关、欧氏距离、链码相关等相似性测度进行匹配<sup>[3-4]</sup>,梯度幅值和方向信息是常利用的匹配特征<sup>[5-7]</sup>。基于梯度的边缘检测算法(如 Sobel, Marr, Canny 等算子)其原理都是基于灰度图像像素值梯度的变化程度,其检测结果严重依赖于图像亮度和对比度的变换程度,在光照条件不理想、噪声污染或者亮度变化不剧烈的时候检测效果往往不理想,其边缘提取阈值也需随图像亮度的不同而改变<sup>[8]</sup>。而相位一致性方法对图像的亮度或对比度变化具有不变性,能够检测到实质上的边缘的存在,而不受到明暗对比的影响,且相位一致性方法可使用一个普遍的阈值来应用到各类图像中。此外, Canny 算子是在线特征的附近响应,易出现双边缘,而相位一致性方法是在线的中心响应,边缘定位更准确,抗噪声干扰能力强。因此,采用相位一致性方法要比基于梯度的方法更具优势。

对于红外和可见光图像的配准,灰度变化剧烈的高频轮廓特征应当发挥更大的作用,因为它们具有相似的灰度分布和灰度变化,基于线段的配准要比基于拐点的配准更具鲁棒性。为此,本文提出结合相位一致性边缘检测和 Hough 变换提取线段作为红外图像与可见光参考图像匹配的相似特征,以改进相位相关法作为相似性测度的红外与可见光图像配准新方法。通过采用相位一致性方法准确定位边缘,使得算法对于光照的变化鲁棒性更好,利用 Hough 变换提取特征线,既利用了图像包含的空间信息又避免了传统梯度幅值法查准率降低的问题,能够有效匹配存在旋转缩放和平移几何变形的红外与可见光图像对。

\* 收稿日期:2012-11-07; 修订日期:2013-03-22

基金项目:国家自然科学基金项目(61101199);江苏省自然科学基金项目(BK2011698);教育部博士点新教师基金项目(20113219120017);中国博士后科学基金项目(20110491424)

作者简介:于雪莲(1981—),女,讲师,博士研究生,主要从事红外图像处理算法的研究工作; xinranyxl@163.com。

1 配准算法

本算法的基本思路是:1)对红外(IR)图像进行频域高通滤波和改进平台直方图均衡处理,提高图像的对比度;2)利用相位一致性(PC)方法,结合非极大值抑制和迟滞算法从红外与可见光(VIS)图像中提取出边缘;3)采用 Hough 变换(HT)方法提取边缘图像中的线特征,该特征体现了红外与可见光图像的主要结构特征;4)对两幅特征图像应用相位相关的匹配测度,计算出两幅对数极坐标图像互功率谱的峰值;5)寻找两幅图像中直线的最佳相关性,估计出目标图像相对源图像的最佳缩放、旋转和平移参数。算法的基本框架如图 1 所示。

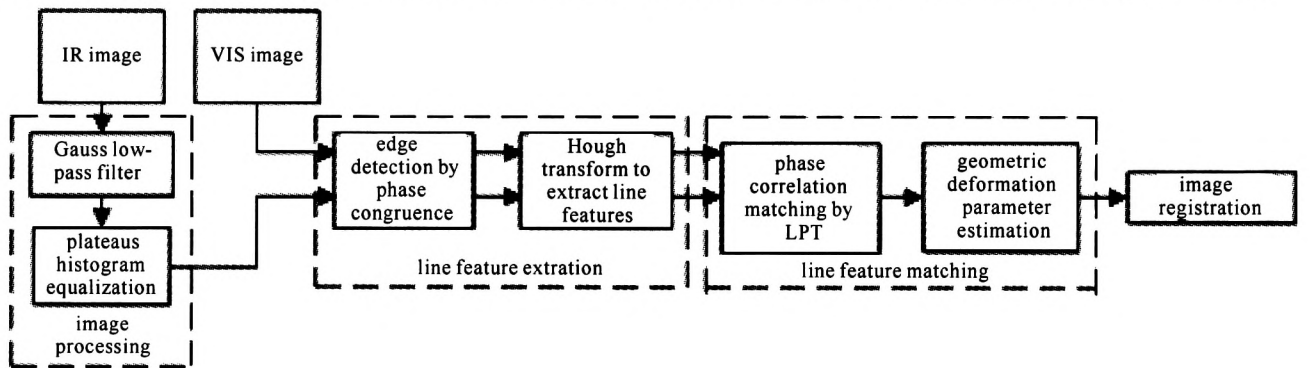


Fig. 1 Block diagram of the algorithm  
图 1 算法的基本框架图

1.1 频域高通滤波器

分别对红外特征图像与可见光特征图像进行二维傅里叶变换,并将零频率成分移到频谱中心,通过改进的频域高通滤波器对其进行预处理,降低旋转和缩放对在傅里叶变换低频部分产生的量化噪声。

$$H(\xi,\eta)=[1.0-x(\xi,\eta)][2.0-x(\xi,\eta)] \tag{1}$$

$$x(\xi,\eta)=\cos(\pi\xi)\cos(\pi\eta) \tag{2}$$

$$F(u,v)=I(u,v)H_1(u,v) \tag{3}$$

$$H_1(u,v)=\begin{cases} H(\xi,\eta), & u,v\in[\frac{N}{4},\frac{3}{4}N] \\ 2, & \text{else} \end{cases} \tag{4}$$

式中:ξ与η的取值范围均为[-0.5,0.5],各离散化为N/2级,则H(ξ,η)大小为N/2×N/2;I(u,v)为特征图像的傅里叶谱,其大小为N×N;H1(u,v)中心N/2×N/2区域取值为H(ξ,η),从而构建出频域高通滤波器,与I(u,v)相乘求得高通滤波后图像。相应的H1(u,v)结构如图2所示。

1.2 相位一致性方法

相位一致性(PC)是在频率域上的测度值,是一个无量纲的量;假定图像中傅里叶分量相位最一致的点为特征点,它的值从1降到0,表示从显著特征降到无特征。

Koves<sup>[8]</sup>提出二维信号的PC值可表达为
$$\frac{\sum_o \sum_n W_o(x,y) \lfloor (A_{no}(x,y) \Delta \phi_{no}(x,y) - T_0) \rfloor}{\epsilon + \sum_o \sum_n A_{no}(x,y)}$$
 ;其中:⌊表示如果该

符号中的值为正,则为其本身,否则为0;ε是为避免除数为零而引入的常量;W<sub>o</sub>(x,y)为频率展开的权重因子;T<sub>0</sub>为噪声能量阈值;A<sub>no</sub>(x,y)为当前位置在方向o、滤波器尺度n上的振幅值,相位偏离函数为Δφ<sub>no</sub>(x,y)。

选择6个方向(0°,30°,60°,90°,120°,150°)的Log-Gabor小波滤波器提取特征。选择3个频率尺度,

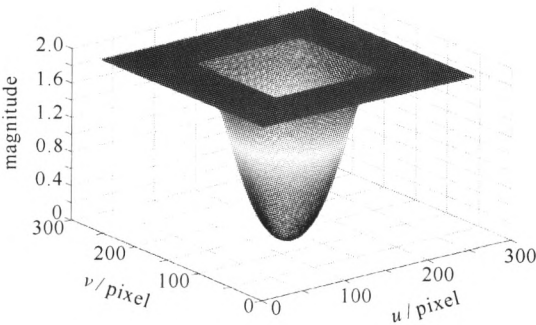


Fig. 2 Frequency-domain high-pass filter  
图 2 频域高通滤波器结构

其中最小尺度波长为 3，尺度倍数为 2。滤波器的方向角度标准差为 0.55，频率扩散的阈值为 0.4，噪声能量的阈值为 3.0，用于计算频率扩散 PC 的调和函数的收敛权值为 10。

1.3 非极大值抑制

非极大值抑制(NMS)检测,是在 PC 图像中每个像素周围半径为 radius(取值为 1.2~1.5)范围内进行的,将目标像素点的 PC 值与两端的邻近像素点的 PC 值进行比较,若是局部最大值即保留。

1.4 迟滞算法

采用迟滞算法避免边缘出现断裂现象,设定两个阈值  $T_1, T_2$ ,检测的边缘必须满足所有特征点的 PC 值高于  $T_2$ (低阈值),至少有一个特征点的 PC 值高于  $T_1$ (高阈值)。

1.5 Hough 变换提取线特征

Hough 变换(HT)是一种常用图像边缘检测技术,它可以识别和检测图像空间的任意解析曲线。利用图像空间和 Hough 参数空间的线-点对偶性,通过在参数空间里进行简单的累加统计,然后在 Hough 参数空间寻找累加器峰值的方法检测直线。Hough 变换的实质是将图像空间内具有一定关系的像元进行聚类,寻找能把这些像元用某一解析形式联系起来的参数空间累积对应点。

直线  $y=kx+b$  用极坐标表示为

$$\rho = x\cos\theta + y\sin\theta \tag{5}$$

式中: $\theta$  表示直线的法线方向; $\rho$  表示原点至直线的距离。式(5)在  $x$ - $y$  平面中的表示如图 3(a)所示,对应参数平面的划分见图 3(b)。

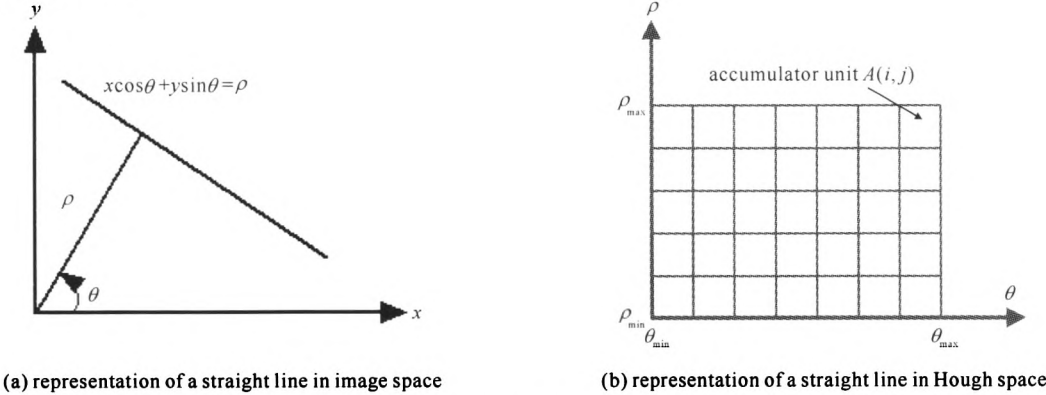


Fig. 3 Hough transform of a line  
图 3 直线的 Hough 变换

首先按一定的量化间隔将可能的  $\rho$  与  $\theta$  取值范围离散化为若干区间。通常  $\theta$  的取值范围为  $[-90^\circ, 90^\circ]$  区间,  $\rho$  的取值范围则由图像矩形顶点至图像中心的距离确定;整个  $\theta$ - $\rho$  参数空间被离散化为一个二维网格,  $x$ - $y$  平面上任意一条直线对应了  $\theta$ - $\rho$  空间上的一个点。对每个可能的离散化参数对  $(\theta_i, \rho_j)$  (对应于图中所示的每个网格单元)设置一个计数器;然后对图像中的每个特征点  $(x_0, y_0)$ ,遍历所有的离散  $\theta$  值,根据式(5)计算出每个  $\theta_i$  值下对应的  $\rho$  值及相应的离散区间  $\rho_j$ ;并对计数器  $(\theta_i, \rho_j)$  的值加 1。当所有特征点完成后,找出参数空间中计数器值大于某一给定阈值  $T$  的局部极大值点,这些局部极大点对应的直线参数对  $(\theta, \rho)$  即代表了 HT 检测得到的图像中的直线。

对 PC 法检测出的边缘应用 Hough 变换,得到图像中重要的线特征。Hough 检测的线越长,说明该线段越能反应图像的结构信息,越有利于配准鲁棒性;越长的线特征在参数空间对应的是累加器单元值越大的位置。因此,本文选择 Hough 参数空间中较大的值,即图像空间中最长的线来进行相似性匹配。

1.6 基于对数极坐标变换和相位相关的匹配测度

对红外特征图像与可见光特征图像进行二维傅里叶变换,采用反向映射方法,结合双线性插值,得到两幅图像相对应的对数极坐标图像。计算两幅对数极坐标图像的相位相关互功率谱最大峰值,其坐标对应最佳匹配点,即可得到图像的缩放因子与旋转角度。

设目标图像相对于源图像的缩放量为  $s$ ,旋转角度为  $\theta_0$ ,两幅图像的傅里叶幅度谱  $|F_1(\xi, \eta)|$  与  $|F_2(\xi, \eta)|$  分别用  $M_1, M_2$  表示,则用对数极坐标表示为<sup>[9]</sup>

$$M_2[\log_a \rho, \theta] = M_1[\log_a \rho - \log_a s, \theta - \theta_0]$$

(6)

即

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

(7)

根据公式(6),(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。经对数极坐标变换(LPT)后,存在平移的两幅图像,再经傅里叶变换,在对应频域中,其能量互功率谱为

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

(8)

相位差的傅里叶反变换为一个冲击函数,在平移量(dx,dy)处取最大值,坐标(dx,dy)即是图像的匹配位置,则图像的缩放量与旋转角度分别为

$$s = (a)^{dx/2}$$

(9)

$$\theta_0 = (dy \times 360)/N$$

(10)

式中: $a$  为 LPT 中对数的底,源图像大小为  $M \times M$ ,对数极坐标图像大小为  $N \times N$ 。

2 仿真实验

为了验证上述算法的有效性,采用红外与可见光室外场景图像在 MATLAB 7.0 平台上对进行实验仿真。可见光图像、红外图像分别由 CCD 和长波红外热像仪采集,图像大小为  $320 \times 240$ ,实验采用的第一组图像如图 4 所示。设可见光图像为参考图像,红外图像为目标图像,高通滤波器的核设定为 1.0。利用 PC 方法,结合非极大值抑制和迟滞算法,从红外与可见光图像中提取边缘。NMS 距离半径参数设为 1.2,迟滞算法的高阈值设为 0.7,低阈值设为 0.35,所得结果如图 5 所示。采用 Hough 变换提取边缘图像中的线特征,最小可接收线长度设为 20 个像素。图 6 为第一组红外与可见光图像提取线特征后采用公式(8)计算得到的能量互功率谱图。取式(9)中对数底  $a$  为 1.044,得到第一组红外与可见光图像的最终配准图像,如图 7 所示。

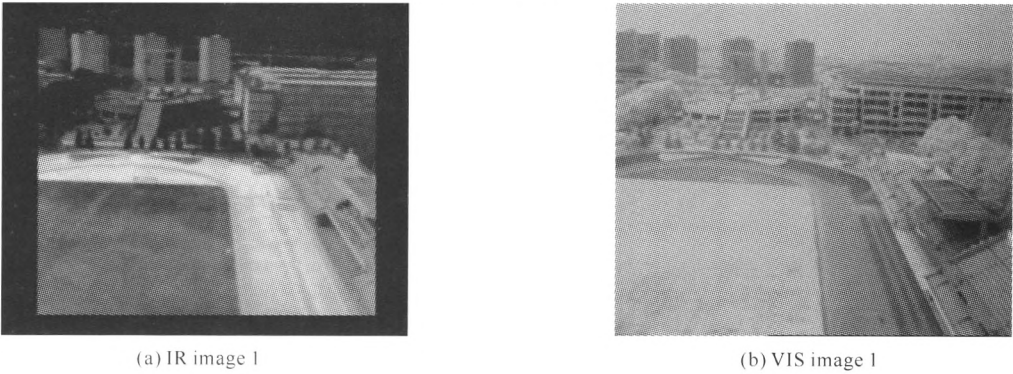


Fig. 4 Images for matching experiments  
图 4 匹配实验图像

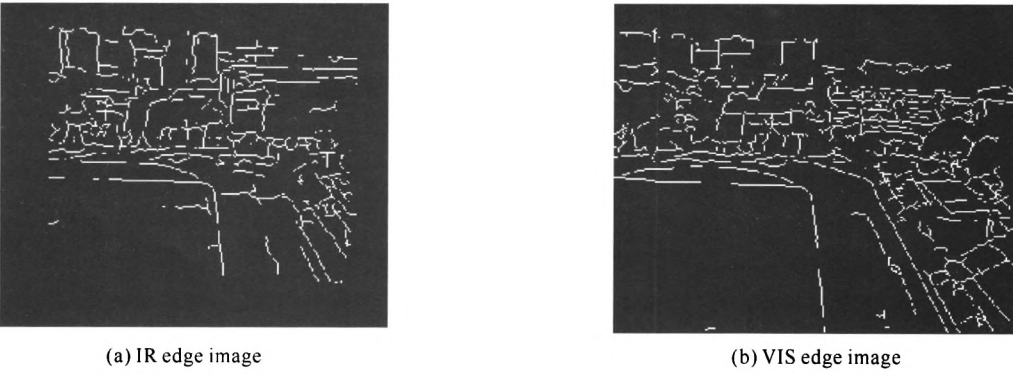


Fig. 5 Edge images extracted by PC method  
图 5 PC 法提取图像边缘

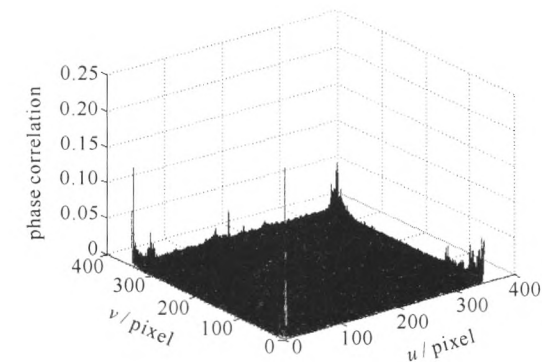


Fig. 6 Cross-power spectrum  
图 6 互功率谱图



Fig. 7 Registration results of IR image 1  
图 7 配准后图像

将同样的方法应用于第二组红外与可见光图像,其图像配准效果如图 8 所示,可以看出,本文所提出的基于 PC 和 Hough 变换的配准算法能够较准确地匹配红外与可见光图像。计算中得到的互功率谱峰值明显,PC 法能检测出红外与可见光图像共有的边缘特征,且不需随图像的改变而改变参数,并尽可能地减少了图像照度差异带来的特征提取误差。

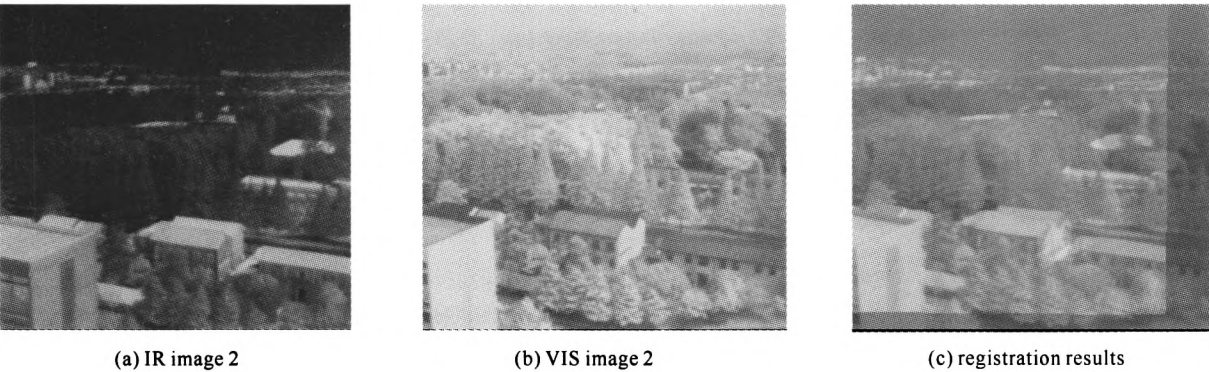


Fig. 8 Registration results of image 2  
图 8 图像配准效果图

将本文算法与现有的基于梯度提取边缘的归一化互相关(NCC)算法以及 Hausdorff 距离算法<sup>[10]</sup>进行比较,后两种算法均利用 Canny 算子提取边缘进行特征匹配。通过均方根误差(RMSE)和查准率(PR)评估配准算法的精确性,其对比结果见表 1,说明了本算法的有效性和可实现性。

表 1 三种算法运算结果对比

Table 1 Operating effect comparision of three methods					
image	algorithm	RMSE	PR/%	time/s	(angle, scale, x-move, y-move)
image pair 1	NCC	0.118 1	22.60	30.309	(1.2°, 1, -16, 6)
	Hausdorff	0.178 6	21.08	34.253	(1°, 0.94, -16, 2)
	proposed	0.117 3	26.96	11.364	(1.04°, 1.02, -16, 4)
image pair 2	NCC	0.109 0	29.88	27.374	(1.4°, 1, 3, 0)
	Hausdorff	0.263 5	23.96	29.618	(1°, 0.94, 0, 0)
	proposed	0.092 1	32.92	10.223	(1.04°, 0.88, 2, 1)

3 结 论

针对红外与可见光图像的配准,提出了一种结合相位一致性(PC)边缘检测和 Hough 变换的配准方法。该方法对红外与可见光图像采用 PC 法结合非极大值抑制与迟滞算法提取各自的边缘特征,利用 Hough 变换提取出图像空间最长的线段特征,以改进相位相关法作为相似性测度。由于采用对数极坐标域傅里叶描述子,其对旋转、缩放和平移具有不变性,因而算法对于缩放、扭曲、噪声和灰度都更不敏感。通过对红外图像和可见光参考图像的实验仿真,验证了算法的匹配效果;结果表明,对存在几何变形的红外和可见光图像,能够准确的估计出配准参数,且误差较小,具有较强的实用价值。



参考文献:

[1] Kim Y S, Lee J H, Ra J B. Multi-sensor image registration based on intensity and edge orientation information[J]. *Pattern Recognition*, 2008, 41(11):3356-3365.

[2] Irani M, Anandan P. Robust multi-sensor image alignment[C]//Proc Int Conf Comput Vision. 1998:959-966.

[3] Hrkac T, Kalafatic Z, Krapac J. Infrared-visual image registration based on corners and Hausdorff distance[C]//Proc Scandinavian Conf on Image Analysis. 2007:263-272.

[4] Jarc A, Pers J, Rogelj P, et al. Texture features for affine registration of thermal and visible images[C]//Computer Vision Winter Workshop. 2007:1-12.

[5] Pluim J, Maintz J, Viergever M. Image registration by maximization of combined mutual information and gradient information[J]. *IEEE Trans on Med Imaging*, 2000, 19(8):809-814.

[6] Keller Y, Averbuch A. Multisensor image registration via implicit similarity[J]. *IEEE Trans on Pattern Anal Mach Intell*, 2006, 28(5):794-801.

[7] Guo Y, Lu C. Multi-modality image registration using mutual information based on gradient vector flow[C]//Proc Int Conf Pattern Recognition. 2006:697-700.

[8] Kovesi P. Image features from phase congruency[J]. *Videre: Journal of Computer Vision Research*, 1999, 1(3):1-30.

[9] Reddy B S, Chatterji B N. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 1996, 5(8):1266-1268.

[10] 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. (Chao Zhiguo, Wu Bo. Approach on scene matching based on histograms of oriented gradients. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2):513-516)

Multi-sensor image registration method based on phase congruency and Hough transform

Yu Xuelian<sup>1</sup>, Chen Qian<sup>1,2</sup>, Gu Guohua<sup>1</sup>

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

**Abstract:** Due to the contrast difference of infrared and visible images, the common registration methods based on gradient magnitude are difficult to match correctly. A novel algorithm based on the phase congruency edge detection and Hough transform was proposed by analyzing the imaging mechanism. The Gauss filter and platform histogram equalization method was applied to enhance infrared image contrast. The phase congruency algorithm with image contrast invariance was used to extract the edge of the two images. And the longest line was selected by Hough transform as the similar characteristics. Then the modified phase correlation method was used as the similarity measurement to compute geometric deformation parameters of two images under the log-polar domain. The experimental results indicated that the algorithm could achieve higher precision and robustness for infrared and visible image automatic registration.

**Key words:** image registration; phase congruency; Hough transform; phase correlation; log-polar transformation