

# 基于互信息和梯度的红外与可见光图像配准新方法

崔 伟,刘圣霞,徐 骞,茅小祥,田裕鹏  
(南京航空航天大学自动化学院,江苏 南京 210016)

**摘 要:**红外与可见光图像配准是常见的多传感器图像配准,在军事、遥感等领域有着广泛的应用。提出了一种基于互信息和图像梯度的红外与可见光图像的自动配准方法:首先,获得图像的梯度信息,然后根据定义的扩展结构获得边缘区域图像,选择最大归一化互信息作为相似性测度,使用 Powell 算法获得最佳配准参数。实验结果证明,本文方法较传统的基于互信息和梯度的配准方法,提高了配准的速度和精度,可以作为一种有效的粗配准的方法。

**关键词:**图像配准;红外与可见光图像;边缘图像;梯度;互信息

**中图分类号:**TP391.4      **文献标识码:**A

## Novel infrared-visual image registration based on combined mutual and gradient information

CUI Wei, LIU Sheng-xia, XU Qian, MAO Xiao-xiang, TIAN Yu-peng  
(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Infrared-visual image registration is a common multi-sensor image processing task, which played an important role in the fields of remote sensing and military. In this paper, a novel and automatic method based on mutual information and gradient information is proposed for the infrared-visual image registration: Firstly, get the gradient information of the image, then the image edge can be obtained by using a structure tensor; the maximum normalized mutual information is used as similarity measure and also the Powell algorithm is used to search for the optimal registration parameters. Experimental results show that compared to the traditional method based on gradient and mutual information, the method proposed in this paper has higher accuracy and needs less time. It can be used as an effective method of coarse registration.

**Key words:** image registration; infrared and visible images; edge image; gradient; mutual information

### 1 引 言

红外与可见光是军事图像融合技术中常用的传感器。红外图像和可见光图像融合后的结果可以有效地应用于自动目标伪装识别。例如,采用可见光与红外成像复合寻的制导技术能更有效地识别目标,并且提高了制导精度。图像配准是图像融合、图像拼接的基础,主要用于匹配取自不同时间、不同传感器或者不同视点的两幅或多幅图像。红外反映景物的辐射信息而可见光反应景物的反射信息,红外

图像与可见光图像的灰度特性相差很大,缺乏一致性特征<sup>[1]</sup>,因此基于特征的红外和可见光图像配准方法往往需要人工干预,其精度和速度无法保证。互信息<sup>[2]</sup> (mutual information, MI) 和归一化互信息 (normalized mutual information, NMI) 作为图像配准

---

基金项目:航空科学基金项目(No. 20090152004)资助。  
作者简介:崔 伟(1984 - ),男,硕士研究生,研究方向是图像配准。E-mail: cuiwei8677464@163.com  
收稿日期:2010-08-30;修订日期:2010-11-20

的相似性准则,已经广泛地应用于医学图像的配准中。如果两幅图像之间的灰度映射关系是全局的,以互信息为测度的方法会取得很好的结果。但是,红外图像和可见光图像的灰度映射关系通常是局部的;而且,对配准十分有用的空间信息在以互信息为准则的方法中也没有用到。因此,以互信息为准则的方法不能直接的用于可见光和红外图像的配准。文献[3]将图像的空间梯度信息和互信息结合起来进行图像配准,文献[4]、[5]也分别提出了类似的基于互信息和梯度的方法,这些方法都是利用梯度相似性作为灰度互信息的加权作为配准的测度。上述基于梯度的方法在优化过程中可能会陷入局部极值;而且所利用的梯度信息的仅限于边缘附近。上述方法产生局部极值问题的根本原因<sup>[5]</sup>是互信息在配准过程中变化不稳定,产生大量局部极值,从而引起误配准;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位置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。

本文提出了一种新的基于图像梯度和互信息的配准方法,首先,获得参考图像和浮动图像的梯度图像,并根据定义的扩展结构<sup>[6]</sup>进一步获得边缘图像;然后计算两幅边缘图像的归一化互信息,使用Powell算法依据最大归一化互信息理论来获得最优配准参数。与文献[3]~[5]不同的是,在计算互信息时,本文使用边缘图像作为计算互信息的输入图像。因为本文方法中获取的边缘图像的高频特征信息比较一致,消除了图像之间灰度特性的差异,进而减少了配准过程中局部极值的产生,提高配准的精度。此外,与原始图像相比,边缘图像的信息量较少,因此还提高了配准的速度。

## 2 互信息理论

互信息<sup>[2]</sup>是信息理论中的一个基本概念,它可以用熵来描述,通常用于描述两个系统间的统计相关性。熵表达的是一个系统的不确定性或者复杂性。图像A的熵定义为:

$$H(A) = - \sum_a p_A(a) \log p_A(a) \quad (1)$$

图像A和B的联合熵为:

$$H(A, B) = - \sum_{(a,b)} p_{AB}(a, b) \log p_{AB}(a, b) \quad (2)$$

其中,  $a \in A, b \in B$ 。式(2)中  $p_A(a)$  为图像A的概率分布,  $p_{AB}(a, b)$  为图像A和B的联合概率分布,通常可用两图重叠部分的边缘灰度直方图和联合概率直方图来估计。两幅图像的互信息可描述为:

$$I(A, B) = H(A) + H(B) - H(A, B) \quad (3)$$

互信息量度量了两幅图像的统计独立程度,当含有相同或相似内容的两幅图像通过几何变换在空间对齐时,则它们的互信息量一般最大。Studholme<sup>[7]</sup>等人认为,互信息对重叠区域的变化很敏感,在配准过程中会导致错误的结果,并给出了归一化的互信息:

$$NMI(A, B) = (H(A) + H(B)) / H(A, B) \quad (4)$$

本文选择归一化互信息作为配准的相似性测度。

## 3 配准变换模型

两幅具有旋转和平移关系的图像分别为参考图像和浮动图像,分别为S和F<sup>[8]</sup>。S(x, y)和F(x, y)表示这两幅图像相应位置处的灰度值,则两幅图像在数学上有如下变换关系:

$$S(\hat{x}, \hat{y}) = L(F(x, y)) \quad (5)$$

式中, L表示二维空间坐标变换,其刚体变换模型为:

$$[\hat{x}, \hat{y}]^T = R[x, y] + t \quad (6)$$

其中, R为旋转矩阵; t为平移向量。这样,对于待配准的图像S和F,基于归一化互信息的图像配准过程就是寻求最优变换 $T_0$ 的过程,即可归结为求解如下优化问题:

$$T_0 = \operatorname{argmax}_T NMI(T(F), S) \quad (7)$$

其中,  $T_0 = (x, y, \theta)$ , x, y,  $\theta$ 分别为垂直平移量、水平平移量和旋转角度。

## 4 边缘图像

### 4.1 预处理

图像梯度信息对噪声非常敏感,并且当噪声较大时,在优化过程中会陷入局部极值。因此,必须对图像进行去噪。Rudin<sup>[9]</sup>等人提出了一种基于全变分(total variation, TV)模型的去噪方法,它能在去噪的同时并且很好地保持图像的边缘。本文采用全变分去噪对图像进行去噪处理。此外,由于红外图像的对比如比较低,使得物体的一些轮廓不清晰,因此需要对图像进行对比度增强处理。本文采用自适应直方图均衡化来调整红外图像的对比度。

### 4.2 边缘图像

首先,定义一个扩展结构Q:

$$Q = \begin{pmatrix} K_p * I_x^2 & K_p * I_x I_y \\ K_p * I_x I_y & K_p * I_y^2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中,符号“\*”表示卷积运算符;  $K_p$ 表示一个标准

差的二维高斯核;  $I_x$  和  $I_y$  分别表示了图像梯度在  $x$  和  $y$  方向的分量。对图像中的每个像素点的  $Q$  进行特征值分解, 都可以得到两个特征向量  $\omega_1$  和  $\omega_2$ , 以及两个特征值  $\mu_1$  和  $\mu_2$  ( $\mu_1 \geq \mu_2$ )。如果一个像素对应的两个特征值之间有较强的差值, 则这个像素点很可能位于图像的边缘上。但是, 强边缘上的点的对应的特征值之间的差值会远大于弱边缘上的点对应的特征值之间的差值。为了使差值与边缘的强弱无关, 对于每个像素, 定义  $c$  如下:

$$c = \begin{cases} 0 & \text{otherwise} \\ (\mu_1 - \mu_2) / \mu_1 & \text{if } \mu_1 > \varepsilon \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $c$  表示了一个像素在边缘上的信心水平, 取值范围是  $[0, 1]$ 。  $c$  的值越大则表示像素位于边缘上的可能性越大,  $c = 1$ , 表示这个像素一定位于边缘

上,  $c = 0$  则表示这个像素不在边缘上,  $c$  的值越接近 1 说明像素位置越靠近边缘。其中,  $\varepsilon$  为阈值, 其作用是防止均质区域中的像素有较大的  $c$ 。  $\varepsilon$  的取值与  $\mu_1$  有关, 应当使具有非零  $c$  值的像素占图像像素总数的比例小于 50%。对每一个像素, 求得对应的  $C$  后, 就得到了边缘图像  $C$ 。图 1 中, 图 1(a) 和图 1(d) 分别为可见光和红外图像, 图 1(b) 和图 1(e) 分别是应用本文方法得到的图 1(a) 和图 1(b) 的边缘图像, 图 1(c) 和图 1(f) 分别是图 1(a) 和图 1(b) 的 canny 边缘检测图像。图像的大小均为  $256 \times 256$ 。由图 1 中可以看出, 应用本文的方法 ( $\varepsilon = 10$ ) 提取的边缘图像不仅能够完整的提取出原图的边缘特征, 而且将边缘扩展到附近区域。

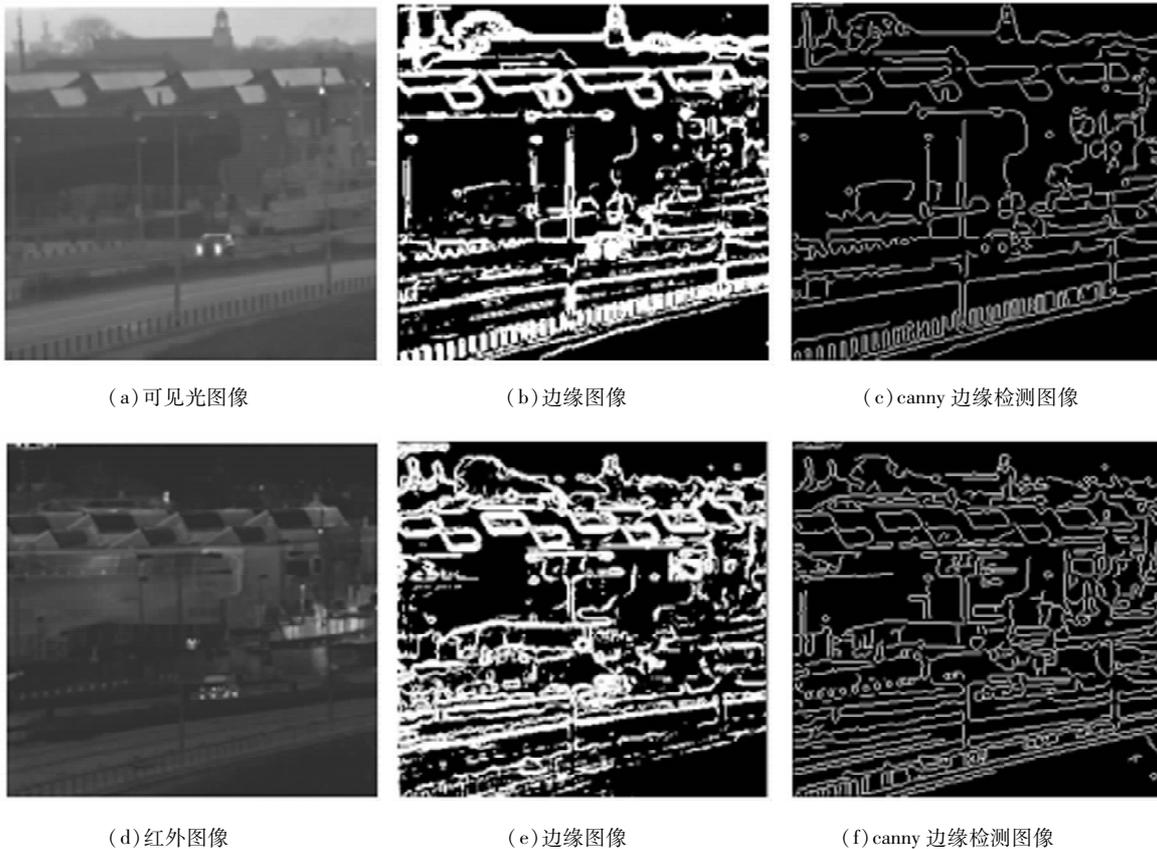


图1 原图及边缘图像

## 5 算法步骤及实验分析

图 2 是本文配准算法的流程图, 配准过程中插值算法采用双线性插值。Powell 算法为局部搜索算法, 相比 PSO 等其他方法, Powell 的搜索速度较快, 因此采用 Powell 算法优化配准参数, 一维优化算法选用 Brent 方法。参数搜索的顺序选择为  $(x, y, \theta)$ 。

Powell 算法初始搜索方向为:  $[1 \ 0 \ 0, 0 \ 1 \ 0, 0 \ 0 \ 1]$ , 初始搜索点选择为  $[0, 0, 0]$ 。Powell 和 Brent 方法的收敛准则分别是  $10^{-7}$  和  $10^{-5}$ 。

文献[3] ~ [5] 提出的互信息结合梯度特征的方法中利用的是图像的梯度边缘特征信息, 本文方法使用的是图像的边缘区域信息。用本文算法对图

1 中的图像进行实验,并与文献[5]中的算法(GMI)进行比较。图 1 中的图 1(a)和图 1(d)是完全配准的,将图像可见光图像作为参考图像,将红外图像进行参数变换(水平与垂直方向的位移、旋转)的仿射变换作为浮动图像,进行配准实验。运行环境为 MATLAB 2008 b, Pentium 4 CPU, 2 GB 内存。首先分别采用文献[5]中的算法和本文算法分别绘制两者的配准函数曲线,以旋转角度为参数的配准函数曲线如图 3、图 4 所示。从图中可以看出,本文方法曲线比较光滑,峰值更尖锐,最优值更加突出;以 GMI 为测度的曲线出现明显的锯齿,对配准算法的收敛会产生不利影响,以致产生误配准。表 1 为部分实验所得参数结果。为了详细地比较两种方法,按照以上叙述的方法进行了 44 次配准,其中沿 X 轴和 Y 轴的平移量: -10 ~ +10 (像素), 旋转角度: -10° ~ +10°。如果所得配准参数与真实参数相差 3 个像素或者 2° 以上,则定义此次配准失败。经统计所得实验结果,方法 1 出现了 14 次误匹配,而本文方法只出现了 4 次;在参考图像和浮动图像只具有旋转或者平移变换的情况下,两种方法都能成功的实现配准,但本文方法得到的配准结果有较小的平均误差和最大误差;当图像之间同时具有平移和旋转时,本文方法仍能比较准确的求出旋转角度,平移参数平均有一个像素的误差。具体配准参数比较结果如表 2 所示。

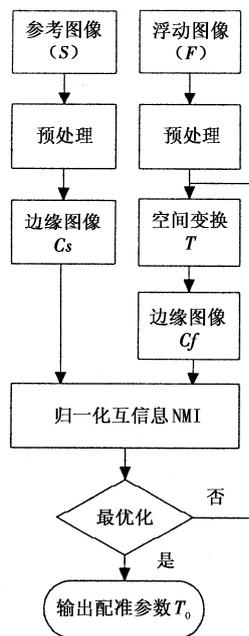


图 2 配准方法流程图

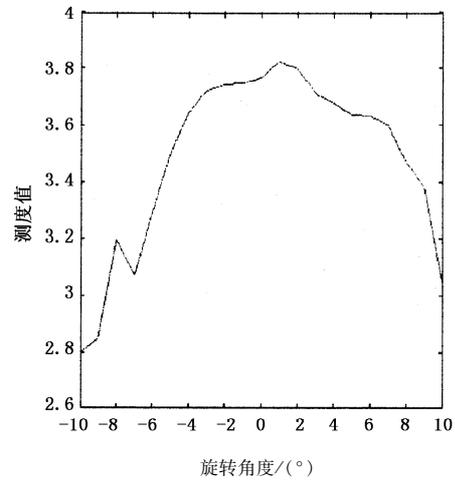


图 3 GMI 方法的配准函数曲线

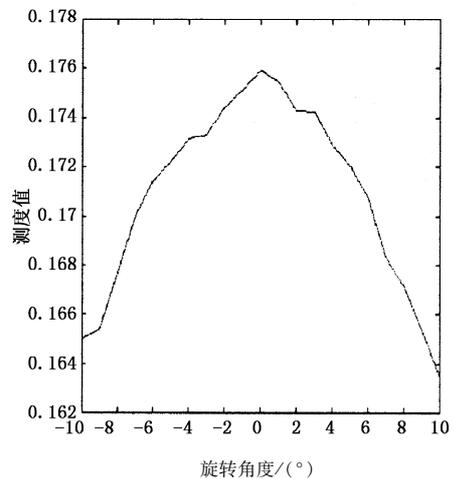


图 4 本文方法的配准函数曲线

表 1 各种配准方法结果

$(x, y, \theta)$	(0,0,5)	(0,0,10)	(6,3,0)	(5,0,0)	(5,8,5)	(8,4,8)	(5,5,10)
方法 1	(0,0,5)	(0,0,10)	(21,2,1)	(18,0,0)	(6,8,7)	(9,2,8)	(5,5,10)
方法 2	(0,0,5)	(0,0,10)	(6,3,0)	(5,0,0)	(5,7,5)	(8,3,8)	(5,4,9)
TR	0.57	0.58	0.37	0.82	0.86	0.82	0.58

注释: TR 为时间比率,为本文方法消耗的时间与 GMI 方法消耗的时间的比值,  $V = (x, y, \theta)$  为变换向量,如,  $V = (5, 5, 5)$ , 表示将图像 1(d) 水平方向向左和垂直方向向下分别平移 5 个和 5 个像素,并以图像中心为基点逆时针旋转 5°; 方法 1 为文献[5]中的方法,方法 2 为本文方法。

表 2 各种配准方法性能参数比较

方法	平均时间 /s	误匹配数 /%	最大误差			平均误差		
			X 方向/像素	Y 方向/像素	旋转角度/(°)	X 方向/像素	Y 方向/像素	旋转角度/(°)
方法 1	39.3	32	3	4	3	1.7	1.3	1.5
方法 2	24.1	9	2	2	1	1.1	0.6	0.8

## 6 结 论

目前,对于红外和可见光图像的配准还没有一种通用的方法。互信息与梯度相结合的方法是一种比较有效的方法。本文方法与传统的梯度与互信息结合的配准方法(GMI)相比,不仅配准速度较快,并且由于减少了配准过程中局部极值的产生,还提高了配准的精度。实验证明,当红外图像和可见光图像之间同时存在着小范围平移( $-10 \sim 10$  像素)和小角度( $-10^\circ \sim 10^\circ$ )旋转变换时,本文方法得到的结果的平均误差是(1.1, 0.6, 0.8),可以作为有效的一种粗配准的方法。

## 参考文献:

- [1] Yuan Jinsha, Zhao Zhenbing, Gao Qiang, et al. Review and prospect on infrared/visible image registration [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(7): 693 - 699. (in Chinese)  
苑津莎, 赵振兵, 高强, 等. 红外与可见光图像配准研究现状与展望 [J]. *激光与红外*, 2009, 39(7): 693 - 699.
- [2] Chen Weiqing, Ou Zongying, Li Guanhua, et al. Medical image registration based on mutual information and gradient similarity [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2009, 49(3): 387 - 390. (in Chinese)  
陈伟卿, 欧宗瑛, 李冠华, 等. 基于互信息与梯度相似性相结合的医学图像配准方法 [J]. *大连理工大学学报*, 2009, 49(3): 387 - 390.
- [3] J P W Pluim, J B A Maintz, M A Viergever. Image registration by maximization of combined mutual information and gradient information [J]. *IEEE Trans. Med. Imag.*, 2000, 19(8): 809 - 814.
- [4] Jiang Xiaotong, Luo Limin, Zhao Zhengxu. Improved image registration by combining mutual information and gradient information [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(9): 1141 - 1146. (in Chinese)  
姜晓彤, 罗立民, 赵正旭. 一种改进的基于互信息和梯度特征的图像配准方法的研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(9): 1141 - 1146.
- [5] Tang Min. A novel image registration method combining morphological gradient mutual information with multiresolution optimizer [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34(3): 246 - 250. (in Chinese)  
汤敏. 结合形态学梯度互信息和多分辨率寻优的图像配准新方法 [J]. *自动化学报*, 2008, 34(3): 246 - 250.
- [6] Jae Hak Lee, Yong Sun Kim, Duhgoon Lee, et al. Jong Beom Ra Robust CCD and IR image registration using gradient-based statistical information [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, 17(4): 347 - 350.
- [7] Studholme C, Hill D L G, Hawkes D J. An overlap invariant entropy measure of 3D medical image alignment [J]. *Pattern Recognition*, 1999, 32(1): 71 - 86.
- [8] Liu Li, Su Min. Medical image registration based on wavelet transformation and mutual information [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(6): 1171 - 1176. (in Chinese)  
刘丽, 苏敏. 基于小波变换和互信息的医学图像配准 [J]. *中国图象图形学报*, 2008, 13(6): 1171 - 1176.
- [9] L Rudin, S Osher, E Fatemi. Nonlinear total variation based noise removal algorithms [J]. *Physica D*, 1992, 60: 259 - 268.