

基于二元函数拟合的遥感图像配准方法

王晓飞¹ 阎秋静¹ 张钧萍²

(¹ 黑龙江大学黑龙江省普通高等学校电子工程重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)
² 哈尔滨工业大学信息工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 为了提高寻找光学遥感图像配准控制点的精确度,提出了一种基于二元函数拟合的遥感图像配准方法。利用基于模板的互信息法在可能区域上搜索同名点,与经典的利用区域的互信息最大值的坐标作为同名点坐标不同,对搜索过程中生成的测度矩阵进行二维高斯拟合,以高斯函数顶点位置作为配置控制点的同名点坐标值。利用配准控制点实现遥感图像的配准。分别利用该算法和传统互信息法对某地区的光学遥感图像进行配准,实验结果表明,该算法配准精度高于普通方法,配准误差小于 0.1,精度达到亚像素级。基本满足光学遥感图像配准要求,为后续进一步融合、变化检测等应用提供必要的技术支持。

关键词 遥感;图像配准;相似性测度;二元函数拟合

中图分类号 TP751 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201434.s210001

Registration of Remote Sensing Images Based on Binary Function Fitting

Wang Xiaofei¹ Yan Qiuqing¹ Zhang Junping²

¹ College of Heilongjiang Province Key Laboratory of Senior-Education for Electronic Engineering, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China

² Department of Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract A remote sensing image registration method based on binary function fitting is proposed to improve the accuracy of searching for optical remote sensing image registration control points. Mutual information method based on template is used to search homonymy points in possible areas, metric matrix is generated by two-dimensional Gaussian function in the process of searching and the vertex position of the Gaussian function is set as the coordinate values of homonymy points, which is different from using the maximum coordinate values of mutual information as the coordinate values of homonymy points in the classical used region. The remote sensing image registration is completed by registration control points. This proposed algorithm and traditional mutual information method are used for a particular area of optical remote sensing image registration respectively. The experimental results show that this proposed registration precision is higher than the ordinary method, the registration error is less than 0.1 and the precision achieves sub-pixel level. In general, this method can satisfy the requirement of optical remote sensing image registration basically and provide necessary data support for subsequent further fusion, change detection and other applications.

Key words remote sensing; registration of remote sensing; similarity measure; binary function fitting

OCIS codes 100.2980; 350.2660; 280.4788

1 引 言

随着传感器技术的发展,不同传感器成像时反映了不同的物理特性,综合利用多传感器图像进行数据分析成为一种重要的获取信息的手段。由于各种传感器之间的成像角度、分辨率、时间不同,因此对这些图像

收稿日期: 2014-06-10; 收到修改稿日期: 2014-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(61271348)、黑龙江省普通高等学校电子工程重点实验室项目(D22D20100018)

作者简介: 王晓飞(1977—),男,博士,副教授,主要从事遥感图像处理与应用方面的研究。E-mail: nk_wxf@hlju.edu.cn

进行融合^[1]、变化检测、模式识别时,都要求进行图像配准。这使得图像配准成为近年来发展迅速的图像处理技术之一,在医学、计算机视觉、遥感、军事等方面都得到广泛的应用^[2]。

早期的图像配准方法是由人工寻找待配准图像之间的配准控制点,但是人工确定配准控制点需要专业人员,费时费力,并且精度不高。目前,图像配准方法的研究主要集中在自动配准方法上,自动的配准方法基本上分为两类:1)基于特征的配准方法^[3-4],依赖的是图像中的某些特征,如边缘的拐点、区域的重心和纹理等,主要应用于存在鲜明特征并易于提取的图像,但方法受特征提取误差的影响,很难得到较高的配准精度,而且往往只对某些特定的图像有效;2)基于灰度统计特性的配准方法^[5-6]。此类方法依赖图像的一些灰度统计信息,如利用相关、互信息等作为相似性测度,比较适合于灰度分布上有线性关系的图像。但传统方法存在着仅在输入图像的离散坐标位置搜索配准控制点,无法得到更高精度的配准结果。

为克服这种不足,实现高精度的配准,本文分析了以互信息法为相似性测度进行配准的原理,并对经典方法进行了改进,利用模板搜索后生成的互信息矩阵进行二维高斯拟合的方法来寻找配准控制点,使配准精度较经典方法得到提高。

2 基于二元高斯函数拟合的配准控制点提取算法

2.1 互信息法配准原理

对于取自同类传感器的同一场景的两幅图像或者多幅图像来说,可以认为获得的图像是真实图像经过某种退化的过程。退化模型如图1所示,在这个模型中,图像退化过程被模型化为一个作用在输入图像 $f(x,y)$ 上的系统 H 。它与一个加性噪声 $n(x,y)$ 的联合作用导致产生退化图像 $g(x,y)$ 。

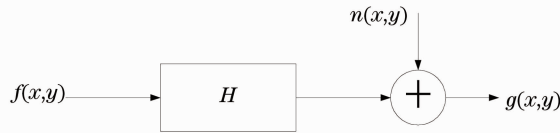


图1 简单的通用图像退化模型

Fig. 1 Simple degradation model of universal image

设 $g_1(x,y)$ 和 $g_2(x,y)$ 为不同传感器获得的遥感图像,则两幅图像与真实的地物图像 $f(x,y)$ 就具有如下关系:

$$g_1(x,y) = H_1[f(x,y)] + n_1(x,y), \quad (1)$$

$$g_2(x,y) = H_2[f(x,y)] + n_2(x,y), \quad (2)$$

式中 H_1 和 H_2 为两个不同的系统,由传感器特性及大气等自然情况决定。当不考虑大气的折射等可能引起图像变形的因素时,可近似认为系统为线性移不变系统。对(1)、(2)式分别进行傅里叶变换可得:

$$G_1(u,v) = F(u,v)H_1(u,v) + N_1(u,v), \quad (3)$$

$$G_2(u,v) = F(u,v)H_2(u,v) + N_2(u,v). \quad (4)$$

则两幅图像之间存在如下关系:

$$G_2(u,v) = \frac{H_2(u,v)}{H_1(u,v)}G_1(u,v) + N_2(u,v) - \frac{H_2(u,v)}{H_1(u,v)}N_1(u,v). \quad (5)$$

这样,可以认为图像 $g_2(x,y)$ 为图像 $g_1(x,y)$ 经过一个有噪声信道后得到的。当两幅图像配准时,互信息值要大于两幅图像发生偏差时的情况。

2.2 互信息的计算

对于两个随机变量 X,Y ,其像素值 x,y 的边缘概率分布分别为 $P_X(x), P_Y(y)$,联合概率为 $P_{XY}(x,y)$,则它们的互信息为^[7]

$$I(X,Y) = E(X) + E(Y) - E(X,Y). \quad (6)$$

这里 $E(X)$ 和 $E(Y)$ 分别是随机变量 X 和 Y 的熵,而 $E(X,Y)$ 则是它们的联合熵。 X,Y 的熵和联合熵为

$$E(X) = - \sum_x P_X(x) \log P_X(x), \quad (7)$$

$$E(Y) = - \sum_y P_Y(y) \log P_Y(y), \quad (8)$$

$$E(X,Y) = - \sum_{x,y} P_{X,Y}(x,y) \log P_{X,Y}(x,y). \quad (9)$$

整理后得到：

$$I(X,Y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(x_i, y_j) \log \frac{P(x_i/y)}{P(x_i)}. \quad (10)$$

而实际中,往往边缘概率分布 $P_X(x)$, $P_Y(y)$ 和联合概率 $P_{XY}(x,y)$ 未知,可以估计为

$$P_X(x) = \sum_y P_{X,Y}(x,y), \quad (11)$$

$$P_Y(y) = \sum_x P_{X,Y}(x,y), \quad (12)$$

$$P_{X,Y}(x,y) = \frac{h(x,y)}{\sum_{x,y} h(x,y)}, \quad (13)$$

式中 h 是这两幅图像的联合直方图,它是一个 M 行 N 列的二维矩阵。

$$h = \begin{bmatrix} h(0,0) & h(0,1) & \cdots & h(0,N-1) \\ h(1,0) & h(1,1) & \cdots & h(1,N-1) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ h(M-1,0) & h(M-1,1) & \cdots & h(M-1,N-1) \end{bmatrix}.$$

2.3 搜索配准控制点

如图 2 所示,设 F 为参考图像, G 为输入图像,可以根据相关系数法配准原理,通过分窗口相关的方法在 F 和 G 上搜索配准控制点,当 F 和 G 的分辨率大小不一样时,需要对低分辨率图像进行放大,使两幅图像的像素点对应的地面面积相同。具体的寻找配准控制点步骤如下:

1) 先在参考图像上选取以参考点为中心,大小为 $m \times n$ 的区域作为目标区域 T_1 。然后确定搜索图像搜索区 S_1 ,其大小为 $J \times K$,要求 $J > m, K > n$;

2) 将模板 T_1 放入搜索区 S_1 内搜索同名点。从左至右,从上到下,逐像素的移动模板来计算目标区和搜索区内与模板同大小区域间的相关系数,将其存储在一个相关系数矩阵 $\mathbf{R} = (r_{i,j})_{M \times N}$ 中,其中 $M = (J - m + 1), N = (K - n + 1)$ 。认为相关系数矩阵 \mathbf{R} 中绝对值最大的元素所对应的区域与模板区域为同一地物,以两区域中心做为配准控制点;

3) 选取下一个目标区,重复 1), 2) 以得到其在搜索区的配准控制点。

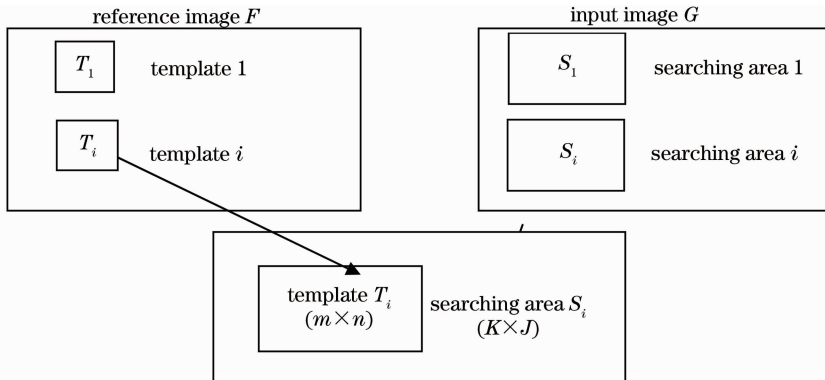


图 2 模板和搜索区的构成

Fig. 2 Constitution of templates and searching areas

2.4 二元高斯函数拟合

经典的互信息法在配准控制点提取过程中,所采用的模板移动步长是离散的,因此最终所获得的控制点

也只能是离散的值。而实际上在基准图像中选取的控制点在输入图像对应点的坐标不一定位于这些离散的位置,这样在进行控制点选取时将产生较大的量化误差,使配准结果无法达到较高的精度。事实上图像像素点的灰度值与其邻域点的灰度值并不是独立的。因为图像能量密度函数可近似认为是二维高斯分布^[6],而这种相关性的存在,使互信息矩阵(将模板与搜索区域间的互信息与平移坐标对应后得到的矩阵)在当两幅图像配准时取得最大值后,矩阵中最大值附近点的值近似呈现一种高斯函数形式的下降。对此提出一种二维高斯拟合的方法来改进经典方法的不足,即对在搜索配准控制点时生成的互信息矩阵 $\mathbf{I}(x, y)$ 进行高斯拟合,以拟合曲面 $f(x, y)$ 最大值点的坐标作为控制点坐标。这样,配准控制点的位置将更为准确。

一个二维高斯方程可以表示为

$$f(x, y) = G \exp \left\{ - \left[\frac{(x - x_0)^2}{2\delta_x^2} + \frac{(y - y_0)^2}{2\delta_y^2} \right] \right\}, \quad (14)$$

式中 G 为高斯分布的幅值, δ_x, δ_y 为两个方向上的标准差。对(14)式两边取对数,并同乘以 $f(x, y)$, 整理得到:

$$f \ln f = \left[\ln G - \frac{x_0^2}{2\delta_x^2} - \frac{y_0^2}{2\delta_y^2} \right] \cdot f + \frac{x_0}{\delta_x^2} x f + \frac{y_0}{\delta_y^2} y f - \frac{1}{2\delta_x^2} x^2 f - \frac{1}{2\delta_y^2} y^2 f, \quad (15)$$

将 N 个数据点 $\{x_i, y_i, f(x_i, y_i)\}$ (其中, $i = 1, 2, \dots, N$) 分别代入得到方程组

$$\mathbf{A} = \mathbf{BC}, \quad (16)$$

式中 \mathbf{A} 为 $N \times 1$ 向量,其元素为

$$a_i = f_i \cdot \ln f_i, \quad (17)$$

\mathbf{B} 为 $N \times 5$ 矩阵,其行向量为

$$[b_i] = [f_i \quad f_i x_i \quad f_i y_i \quad f_i x_i^2 \quad f_i y_i^2], \quad (18)$$

\mathbf{C} 为由待估计的高斯参数组成的向量

$$\mathbf{C}^T = [c_1 \quad c_2 \quad c_3 \quad c_4 \quad c_5] = \left[\ln G - \frac{x_0^2}{2\delta_x^2} - \frac{y_0^2}{2\delta_y^2}, \quad \frac{x_0}{\delta_x^2}, \quad \frac{y_0}{\delta_y^2}, \quad -\frac{1}{2\delta_x^2}, \quad -\frac{1}{2\delta_y^2} \right], \quad (19)$$

当 $N=5$ 即可求出方程的解。为提高精度,在互信息矩阵最大值点周围选取 $N=64$ 个点,利用最小二乘法拟合求出 \mathbf{C} , 这样可以得到高斯拟合的极值点 (x_0, y_0) , 该点即为配准控制点在输入图像中的坐标。

$$x_0 = -\frac{c_2}{2c_4}, \quad y_0 = -\frac{c_3}{2c_5}. \quad (20)$$

3 实验结果及性能分析

将本文算法与经典配准算法生成的互信息图进行比较,如图3所示。图3(a)为搜索过程生成的测度矩阵的三维图。根据最大相似性测度判别准则,将选择点(17, 15)来确定控制点位置。而图3(b)为将测度矩阵进行二维高斯拟合得到的曲面,函数的最大值位置在(17.2731, 14.6569)处。由图3可知,采用本文算法可以避免传统算法仅在离散点位置搜索控制点的不足。

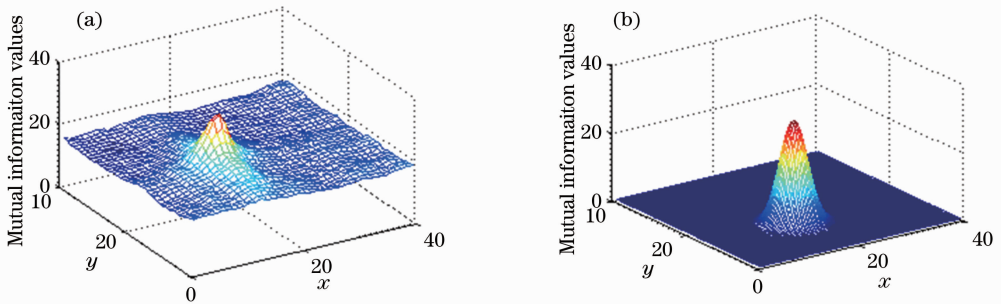


图3 两种方法的互信息三维图。(a)互信息算法;(b)本文算法

Fig. 3 Mutual information three-dimensional map of the two methods. (a) Mutual information algorithm; (b) proposed algorithm

为了进一步验证本文算法的性能,并在一些细节上对传统方法进行改进,采用分辨率为 3 m 的同一地区不同时期光学遥感图像进行配准实验,图像大小均为 522 pixel×522 pixel,256 灰度级。

1) 模板大小的选择

实验中首先要选择合适大小的模板,当模板越大时(13)式中的联合概率 $P_{XY}(x,y)$ 的估计误差越小。但过大的模板会带来计算量的增加。通过对不同大小的模板进行实验得到,当模板大小选择 64 pixel×64 pixel时,互信息矩阵的峰值就比较明显了。

2) 平坦区域的处理

对于平坦区域(如水域,广场,草地等),理想情况下灰度值应为相同值,因此在计算互信息时,模板移动搜索过程中会很难找到真实的对应点位置。这时容易产生错误的配准控制点对。为了避免这种情况的出现,实验过程中对平坦区域将不再搜索控制点,这样,不仅可以减少大误差控制点的出现,而且可以减小计算量,提高计算效率。

3) 不同方法的对比

为验证本文方法的有效性,实验分别采用经典的互信息法和本文方法进行配准。图 4(a)、(e)、(f)为三组不同数据的参考图和对第一组数据采用不同方法的进行配准的结果图像。表 1 为从中任意选取 4 对配准控制点的误差对比,其中误差评定采用的是均方根误差(RMSE)^[8]。由图 4 可知,采用本文方法可以提高配准控制点精度。

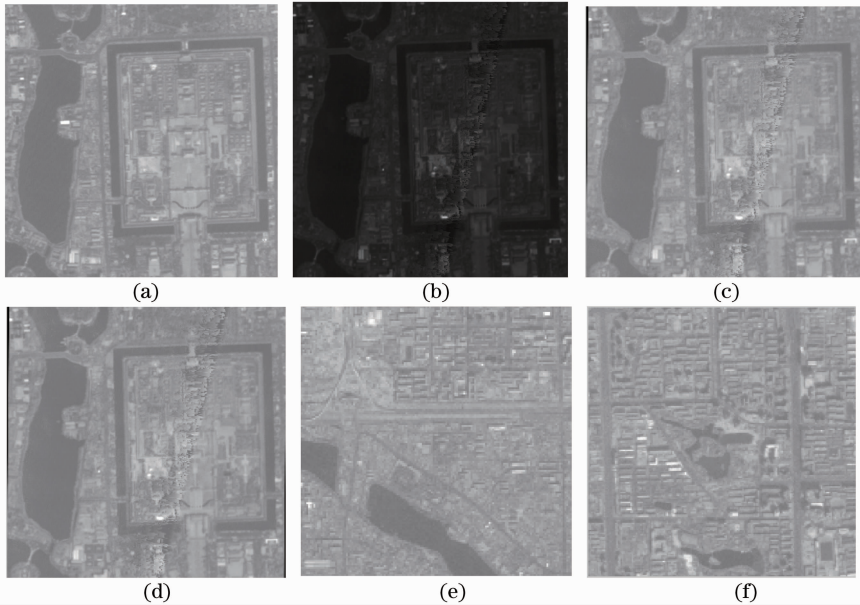


图 4 原图与配准结果图。(a)第一组参考图像;(b)第一组输入图像;(c)互信息法配准结果图;(d)改进的互信息方法结果图;(e)第二组参考图像;(f)第三组参考图像

Fig. 4 Results map of original image and registration. (a) The first set of reference images; (b) the first set of input image; (c) the registration results based on mutual informationin algorithm; (d) the registration results based on improved mutual information algorithm; (e) the second set of reference images; (f) the third set of reference images

表 1 不同方法配准控制点精度对比表

Table 1 Accuracy comparison of registration control points based on different methods

	Reference image control		Input image control point			Input image control point		
	point coordinates		coordinates (classical method)		RMSE	coordinates (proposed method)		
	x	y	x	y		x	y	RMSE
1	50.0000	170.0000	54.0000	173.0000	0.281	54.3107	172.9874	0.0931
2	130.0000	270.0000	134.0000	272.0000	0.314	133.8259	271.9549	0.1014
3	290.0000	130.0000	289.0000	132.0000	0.351	288.8742	132.1501	0.0985
4	390.0000	350.0000	388.0000	352.0000	0.381	388.4316	352.3037	0.0501

与互信息配准类似,对利用相关系数作为相似性测度的方法进行实验,也得到较好的效果。同样还对其他两组不同时期的光学遥感图像进行配准实验,图 3(e)、(f)为这两组数据的参考图像。由表 2 可知,利用本文方法,可将传统相似性测度配准方法的配准精度提高 3 倍多。

表 2 不同方法配准结果对比表

Table 2 Results comparison of different methods

	Mutual information algorithm			Improved mutual information algorithm		
	Group 1	Group 2	Group 3	Group 1	Group 2	Group 3
RMSE	0.31	0.32	0.31	0.09	0.09	0.10

4 结 论

在分析利用互信息相似性测度进行配准的原理基础上,对其进行改进,提出了一种基于高斯拟合的图像配准方法。与经典的互信息方法仅在整数点上搜索配准控制点这一局限相比,该方法可以在实数范围内看过控制点,从而得到更为准确的同名像素位置,进而实现高精度的遥感图像配准。并且实验结果表明,在多组具有不同特点的图像配准实验中,该方法都表现出了较好的配准效果。

参 考 文 献

- 1 Yin Wen, Li Yuanxiang, Zhou Zeming, *et al.*. Remote sensing image fusion based on sparse representation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0428003.
尹 雯, 李元祥, 周则明, 等. 基于稀疏表示的遥感图像融合方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0428003.
- 2 M Zhao, B W An, T Z Wang. A graph matching algorithm based on filtering strategy of Bi-directional K-Nearest-Neighbors [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2014, 33(1): 78–83.
- 3 Wang Zhishe, Yang Fengbao, Ji Li'e, *et al.*. Optical and SAR image registration based on cluster segmentation and mathematical morphology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0215002.
王志社, 杨风暴, 纪利娥, 等. 基于聚类分割和形态学的可见光与 SAR 图像配准[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0215002.
- 4 Z Kai, X Z Li, J X Zhang. A robust point-matching algorithm for remote sensing image registration [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(2): 469–473.
- 5 Z L Song, J Zhang. Remote sensing image registration based on retrofitted SURF algorithm and trajectories generated from Lissajous figures [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(3): 491–495.
- 6 Wang Junduo, Wang Riwei, Wen Xianbin, *et al.*. Fast matching algorithm of lunar CCD image [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 011102.
王君铎, 汪日伟, 温显斌, 等. 月球 CCD 影像的快速匹配算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(1): 011102.
- 7 Li Enrong, Chen Mingliang, Gong Wenlin, *et al.*. Mutual information of ghost imaging systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1211003.
李恩荣, 陈明亮, 龚文林, 等. 鬼成像系统的互信息[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1211003.
- 8 Zhu Jigui, Zou Jian, Lin Jiarui, *et al.*. Error-compensation algorithm with high-accuracy for photographic image processing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0912004.
郝继贵, 邹 剑, 林嘉睿, 等. 摄影测量图像处理的高精度误差补偿法[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0912004.

栏目编辑: 张浩佳