

获取均匀控制点的遥感影像自动空间匹配方法

张 翼 曾庆业 唐 婷

(中国科学院遥感应用研究所图像处理研究室,北京 100101)

摘 要 提出了两种可以获得均匀分布的控制点的遥感高分辨率影像空间域匹配方法。常规的灰度模板匹配方法为先进行手工选点粗匹配,然后用特征提取算子在原始图像中提取控制点,最后根据控制点提取灰度模板进行精匹配。基于上述方法,提出了两种控制点均匀化方法,分别为在控制点提取时和模板匹配后对控制点进行均匀化,并用实验证明匹配精度因均匀化的控制点分布得到有效提高。

关键词 遥感影像 图像匹配 控制点均匀化

中图法分类号: TP751-1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)08-1475-05

GCP-equalized Matching Method for Remote Sensing Images

ZHANG Yi, ZENG Qing-ye, TANG Ping

(Image Processing Laboratory, Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Science, Beijing 100101)

Abstract This paper mainly suggested two ways of matching method in spatial domain for high-resolution remote sensing images in order to obtain equalized distributing GCPs. Ordinary matching method first manually acquires a few initial GCPs, then extracts GCPs with feature detection operators. The final step is the template matching. This paper suggested equalizing the GCPs either during the feature detecting or after the template matching. At the end of the paper, experiments proved the effectiveness in accuracy improvement with the proposed methods.

Keywords remote sensing images, image matching, GCP equalization

1 引 言

随着卫星遥感技术的发展,影像遥感在工农业、军事、城市规划等多方面发挥着越来越大的作用。原始遥感影像在空间域上存在一定的几何畸变,经几何精纠正后可用于实际应用。基于控制点的几何精纠正是常用的几何纠正方法,而遥感影像自动匹配是基于控制点的几何精纠正的基础。张祖勋等人提出了一种基于模板匹配的高精度自动匹配方法^[1],将模板匹配的方法应用到遥感影像匹配中,在精度、可靠性和效率上明显优于传统人工选点的方式,但是,其方法以整幅图像为匹配搜索范围,时

间效率较低。张登荣等人于 2007 年提出了基于 Harris 特征点、小波变换的匹配方法^[2],在人工选择 3~4 对控制点进行粗匹配的基础上提取 Harris 特征点进行基于小波变换的多尺度匹配,提高了匹配的精度和效率。季艳等人于 2008 年提出了将小波变换用于自动模板匹配当中,在小波低频域中进行模板匹配,对匹配结果进行小波逆变换,将全局模板匹配的空间复杂度降低^[3]。

常规模板匹配方法得到的控制点分布完全依赖于图像的特征分布,对于提取出的控制点进行匹配和筛选时,通常以相关系数作为唯一筛选依据,对于特征分布不均的高分辨率图像,容易出现匹配出的控制点分布不均匀现象,使基于控制点的几何精纠

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2007CB714406)

收稿日期:2009-05-20;改回日期:2009-05-26

第一作者简介:张 翼(1984 ~),男,中国科学院遥感应用研究所信号与信息处理专业硕士研究生。研究方向为遥感图像处理。

E-mail: windless0530@gmail.com

正难以达到要求。本文提出两种提取均匀控制点的模板匹配方法。方法一为在控制点提取过程中进行均匀化,用均匀化的控制点进行模板匹配;方法二为在常规模板匹配之后对结果控制点进行均匀化处理。在理论阐述后,用实验对两种方法的有效性进行了对比。

2 图像自动匹配流程

常规的基于灰度模板匹配的图像自动匹配的流程包括 3 个步骤:(1) 用人工手动选取少量控制点的办法进行粗匹配;(2) 用特征提取算子(如 Harris^[4]算子)提取出足够多的特征点作为初始控制点;(3) 对每个控制点进行灰度模板提取,用模板匹配的方法完成精匹配。

2.1 图像粗匹配

粗匹配的意义在于建立输入图像和参考图像之间粗略的匹配关系,从而将搜索范围约束在以粗匹配结果为中心的一个相对较小的位置区间内,大大减少时间开销。常规的粗匹配过程为,用相对简单的函数关系(如一次多项式)表示从原始图像到参考图像的变换关系,并通过人工选取少量控制点,根据控制点坐标的求解仿射多项式系数完成粗匹配。以一次多项式为例:

$$\begin{cases} x' = a_0x + a_1y + a_2 \\ y' = a_3x + a_4y + a_5 \end{cases} \quad (1)$$

式中, (x, y) 为控制点在原始图像中的坐标, (x', y') 为控制点在参考图像中的坐标, $a_0 \sim a_5$ 为待求多项式系数。对于一次多项式,最少需要手工选取 3 对控制点进行基于一次多项式的粗匹配。

2.2 图像精确匹配

图像精确匹配通常采用模板匹配方法。传统模板匹配的方法是,先在输入图像中生成足够多的控制点候选点(特征点),再在参考图像中生成每一候选点的粗匹配点。然后以每一对粗匹配点做以下操作:以两点为中心分别以 N 和 M 为边长提取模板和搜索窗口($N < M$),使模板在搜索窗口内平移,在每一个位置计算与搜索窗口的匹配度(匹配度通常取灰度归一化相关系数),匹配度最大值如大于阈值 T_0 ,则以相应匹配位置为该控制点的精匹配结果。 T_0 值的初始值可取经验值,在匹配后可通过人工干预或自适应迭代法调整以达到整体精度需要。

在实际应用中常常要求自动匹配的控制点和人

工选择的控制点具有尽可能相似的特征,如能够提取到道路交叉点、角点或拐点作为控制点候选点。因此,在输入图像中生成控制点候选点时需要使用特征提取算子,该特征提取算子所提取的点特征要尽量地符合目视观察时所感兴趣的特征。Harris 算子^[4]是常用的特征点提取算子,具有阈值依赖性低、抗噪性好、鲁棒性好等特点。Harris 算子是基于梯度分析的特征提取算子,在提取点的数量和目视特征上均能满足要求。

模板匹配首先需要选择模板。如图 1 所示,对于输入图像提取出的每一特征点 p ,以 p 为中心取 $M \times M$ 大小的搜索窗口,根据粗匹配关系可得到参考图像中相应的 $M \times M$ 大小的窗口,其中特征点 p 在参考图像上映射的粗匹配点是 p' 。以 p' 为中心在所映射的窗口 $M \times M$ 中取 $N \times N$ 作为模板。

按上述方法取模板时,需要注意由于粗匹配关系是图像的仿射变换,在参考图像上依照粗匹配关系提取模板时,所获得的参考图像中的相应位置往往不为整数,这时需要利用重采样计算出模板中点的像素值。综合考虑算法性能与采样质量,本文采用双线性插值重采样。

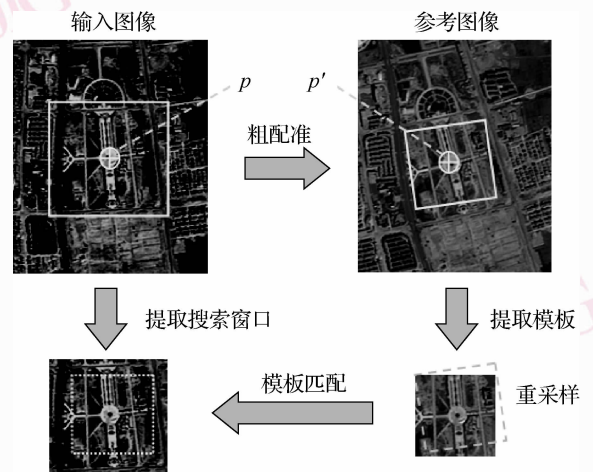


图 1 模板匹配示意图

Fig. 1 Template matching

在模板匹配时,为忽略因亮度因素造成的图像差异,通常采用归一化相关系数(NCC)作为相似度判定准则。归一化相关系数的计算公式如下:

$$\gamma_{u,v} = \frac{\sum_{x,y} [f(x,y) - \bar{f}_{u,v}] [t(x-u,y-v) - \bar{t}]}{\sqrt{\sum_{x,y} [f(x,y) - \bar{f}_{u,v}]^2 \sum_{x,y} [t(x-u,y-v) - \bar{t}]^2}} \quad (2)$$

式中, (u, v) 为当前模板窗口左上角相对于搜索窗口左上角的坐标偏移, 即当前模板位置, $f(x, y)$, $t(x, y)$ 分别为搜索窗口和模板窗口灰度分布函数, $\bar{f}_{u,v}$ 和 \bar{t} 分别为搜索窗口和模板窗口在当前位置 $N \times N$ 大小范围内的灰度均值。

在一个大小为 $M \times M$ 的搜索窗口中, 完成所有相关计算共需计算 $(M - N + 1)^2$ 次 γ , 且 γ 的计算中如下两部分分别需要进行 N^2 次加法, 是算法的性能瓶颈。

$$\bar{f}_{u,v} = \frac{1}{N^2} \sum_{x=u}^{u+N-1} \sum_{y=v}^{v+N-1} f(x, y) \quad (3)$$

$$e_f(u, v) = \sum_{x=u}^{u+N-1} \sum_{y=v}^{v+N-1} [f(x, y) - \bar{f}_{u,v}]^2 \quad (4)$$

如果直接按式(2)计算 γ , 运算量很大, 尤其对大尺寸图像而言, 完成整图匹配, 效率很低。因此简化对 γ 的计算是提升整个 NCC 计算的关键所在。

加速 NCC 计算通常的做法是利用 FFT 进行计算。本文采用了另一种计算 NCC 的快速算法(简称 Fast NCC)加速模板匹配过程。该快速算法由 Lewis 于 1995 年提出^[5], 该算法是一种空间域计算的方法, 核心是在搜索窗口预先计算图像像素及其像素平方的某种和表(sum table)来实现的, 大大简化了 γ 的计算过程, 大幅度减少了运算的时间开销。Briechle 等人于 2001 年提出将其用于模板匹配^[6]。

3 控制点均匀化

通常情况下基于特征点提取算子所提取的特征点分布与地物特征的分布有紧密关联, 导致在地物结构特征复杂的地域特征点聚集度很高, 而在地物结构平坦的地域特征点分布稀疏, 使得整幅图像控制点分布不平衡。控制点均匀化的目的在于使匹配后的控制点有相对均匀的分布, 使得基于控制点纠正的图像有更高的精度。本文提出两种基于网格剖分的控制点均匀化方法。

3.1 控制点提取时均匀化

该方法在控制点提取时即考虑其分布的均匀化问题。以 Harris 算子为例。算出每个像素的兴趣值 q 后, 以一定大小窗口如 3×3 在图像上平移, 窗口中心像元兴趣值为窗口中极大值时, 中心像元被认为是特征点。然后对图像进行网格剖分, 网格大小为 $W \times W$ 。 W 值大小由预期控制点总数估算得出, 并可根据均匀化结果进行手动调整。接着考察每个

网格内的控制点兴趣值, 对每个网格进行筛选, 只保留兴趣值最大的点作为控制点。用筛选后的控制点进行模板匹配。

该方法的均匀化步骤在控制点提取时完成。为使控制点的均匀化分布在模板匹配后能得到较好保持, 模板匹配可适当降低相关系数阈值 T_0 以保证控制点继续呈均匀分布, 并对因降低阈值 T_0 而添加的点进行标记, 在匹配的最后对这些点进行人工审查, 删除因相关系数较低而影响最终精度的点。

3.2 匹配后均匀化

该方法不对控制点提取过程进行干预, 在进行常规模板匹配的过程后进行控制点分布均匀化。该方法在常规模板匹配后将输入图像进行网格划分, 网格大小为 $W \times W$ 。 W 值大小由预期控制点总数估算得出, 并可根据均匀化结果进行手动调整。接着考察落在每个网格内的控制点及其匹配度, 只保留相关系数最大的点为最终匹配点。为保证最终的控制点数量, 模板匹配可适当降低相关系数阈值 T_0 为 T_1 ($T_1 \leq T_0$) 以保证在特征分布相对稀疏的区域也有控制点生成, 并通过人工审查的方式删除因降低阈值 T_0 而添加上的影响精度的点。

如图 2 所示, 实线标记的控制点表示匹配度高的控制点 ($\gamma \geq T_0$), 点线标记的控制点表示匹配度较低的控制点 ($T_1 \leq \gamma < T_0$, 其中 T_1 为调整后阈值)。均匀化时, 在控制点相对较密的网格, 如 B3, 只保留一个匹配度最高的点, 起到“删点”效果; 在控制点相对较疏的网格, 如 E1, 仅有的控制点将被保留; 而在匹配度不高的网格, 如 F4, 将会起到“加点”的效果。对于本身无法提取控制点的网格, 如 G2, 则不强行加点。如此, 经过控制点均匀化处理, 图像上的控制点呈近似均匀分布的状态。

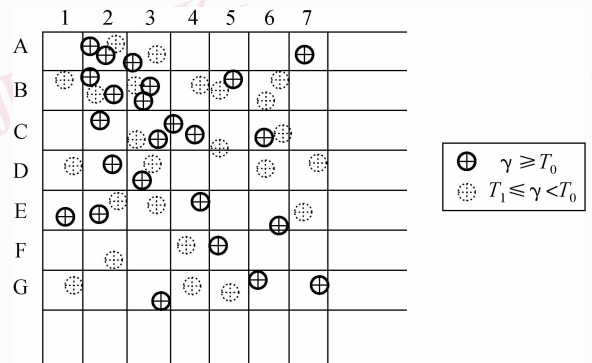


图 2 控制点均匀化示意图

Fig. 2 GCP equalization

4 实验结果

实验的重点是两种均匀化控制点后带来的误差变化方面。对不同数据来源,不同分辨率,不同波段的遥感影像分别进行了匹配实验,即对每组数据分别进行未均匀化和均匀化的模板匹配,在其匹配结果控制点对中,取 70% 的点作为匹配点进行多项式参数的最小二乘拟合,取 30% 为检查点计算误差,计算方式为,将检查点数据代入用匹配点数据拟合后的精匹配多项式,并求出其平均像素误差。其中 3 组实验数据如图 3 所示,分别在 SPOT5 数据和 TM 数据之间进行,选择彩色影像、全色影像和二者的混合,分别进行了相同分辨率和不同分辨率的匹配效果对比实验。

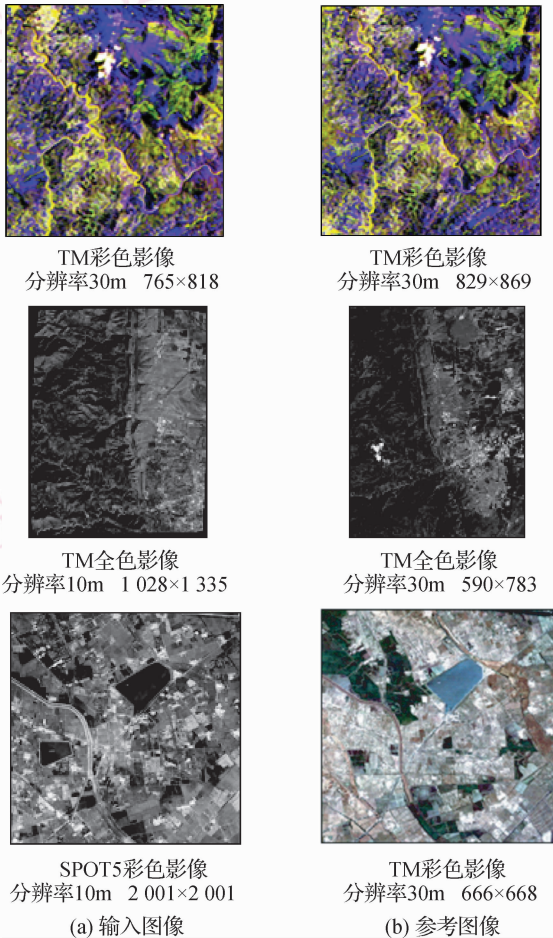


图 3 控制点均匀化实验数据

Fig. 3 Experiment data for GCP equalization

均匀化前后效果对比如图 4 所示。

经过均匀化算法,控制点分布得到了大致的均



(a) 均匀化前



(b) 均匀化后

图 4 均匀化效果

Fig. 4 Result of equalization

匀化。控制点分布过密的区域控制点数被删减,而在个别原本不存在控制点的区域,控制点得到了适量的补充。

表 1 均匀化对比实验结果

Tab. 1 GCP equalization experiment result

组别	平均相关系数	配准方式	控制点数	平均误差
1	0.93	不均匀化	474	2.3×10^{-3}
		策略 1	298	5.5×10^{-4}
		策略 2	283	4.9×10^{-4}
2	0.78	不均匀化	858	2.4×10^{-3}
		策略 1	943	1.7×10^{-3}
		策略 2	710	9.0×10^{-4}
3	0.63	不均匀化	229	3.3×10^{-3}
		策略 1	40	3.0×10^{-3}
		策略 2	123	2.5×10^{-3}

注:平均相关系数为匹配成功的控制点其相关系数的平均值。

从上表 1 中可以看出,控制点均匀化对于精度的提高有着明显的积极作用。3 组数据中,控制点均匀化后的平均误差均得到了有效提高,符合实验预期。平均误差的单位并不是像素,而是归一化像素。因不同图像分辨率不同,为消除分辨率不同对结果造成的干扰,对坐标进行了归一化。

同时还可以看到,策略2效果优于策略1。分析原因,可能在于对控制点提取算子本身的强制性更改不如对匹配结果的调整更能提高精度。策略1同时降低了角点提取兴趣值阈值和匹配相关系数阈值,而策略2只对匹配相关系数容忍了较低阈值点。因此,策略1中对精度产生负面影响的因素更多。同时,策略2只是在匹配完成后进行后处理,对传统模板匹配的整体流程干预度更低,更好地保留了传统模板匹配方法高精度的特点。

5 结论

提出了两种基于模板匹配和控制点均匀化的遥感影像空间域匹配方法。两种均匀化方法均基于网格分割的思想,分别在控制点提取时和模板匹配后进行均匀化,后者在精度上略优于前者。

本文方法已经在实际的工程项目中得到应用。应用结果也表明该方法是一种高效实用的方法,相比传统未经均匀化的匹配方法在精度上有明显提高。

今后的研究将进一步考虑改进均匀化策略,用更复杂而精确的函数,综合考虑匹配后点的位置和其相关系数从而定义新的兴趣值,根据兴趣值对网格内控制点进行筛选。

参考文献 (References)

- 1 Zhang Zu-xun, Zhang Jian-qing, Liao Ming-sheng, *et al.* Automatic precision registration of multi-resolution remote sensing imagery[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1998, **23**(4): 320-323. [张祖勋,张剑清,廖明生等. 遥感影像的高精度自动匹配[J]. 武汉测绘科技大学学报,1998,**23**(4): 320-323.]
- 2 Zhang Deng-rong, Cai Zhi-gang, Yu Le. Study on image automation registration methods based on matching [J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2007, **41**(3): 2-5. [张登荣,蔡志刚,俞乐. 基于匹配的遥感影像自动纠正方法研究[J]. 浙江大学学报,2007,**41**(3):2-5.]
- 3 Ji Yan,Zhang Ying-hui. Method research based on wavelet transformation template match[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2008, **38**(3): 293-296. [季艳,张英慧. 基于小波变换的模板匹配方法研究[J]. 中国科学技术大学学报,2008,**38**(3): 293-296.]
- 4 Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector[A]. In: Proceedings of 4th Alvey Vision Conference [C], Manchester, UK, 1988:147-151.
- 5 Lewis J P. Fast Normalized Cross Correlation [EB/OL]. <http://www.idiom.com/~zilla/Work/nvisionInterface/nip.pdf>, 1998-02-19/2008-12-01.
- 6 Briechle Kai, Hanebeck Uwe D. Template matching using fast normalized cross correlation[A]. In: Proceedings of SPIE, AeroSense Symposium[C], Orlando, Florida, USA, 2001,**4387**:1-8.