

文章编号:1001-1595(2009)03-0216-07

一种综合利用像方和物方信息的多影像匹配方法

袁修孝^{1,2}, 明 洋¹

1. 武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079; 2. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079

A Novel Method of Multi-image Matching Using Image and Space Synthesis Information

YUAN Xiuxiao^{1,2}, MING Yang¹

1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430049, China; 2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430049, China

Abstract : A novel method is introduced for multi-image matching by synthesizing image and space information. Four level pyramid images are generated firstly according to the rule that the next level pyramid is generated from the previous level using the average gray values of the 3×3 pixels, and the first level pyramid is generated from the original image. The initial horizontal parallaxes between the reference image and each searching image are calculated in the highest pyramid level. Then corresponding image points are searched in each stereo pairs from the third level pyramid images, and the matching results in all stereo pairs are integrated into the object space, by which the mismatched image points can be eliminated and more accurate spatial information can be obtained for the subsequent pyramid image matching. The method based on correlation coefficient with geometric constraints and global relaxation optimization is introduced in the process of matching. Finally, the feasibility of the method proposed in this paper is verified by the experiments using a set of actual digital aerial images with big overlap. Compared with the traditional matching with two images, the accuracy of DSM generated using our method shows that multi-image matching can eliminate the mismatched points more effectively and improve the success ratio of matching more significantly.

Key words : multi-image matching; DSM; image matching based on correlation coefficient with geometric constraints; relaxation matching; accuracy

摘 要: 提出一种综合利用像方和物方信息的多影像匹配方法。首先对各原始影像采用 3×3 像元平均法生成 4 层金字塔影像,并在最高层金字塔影像中计算各搜索影像与基准影像的初始视差;然后从第 3 层金字塔影像开始进行基准影像与各搜索影像的匹配,并对各立体像对的匹配结果进行物方融合,剔除部分误匹配点,获得较精确的物方空间信息,以用于下一层金字塔影像的匹配。此过程融入带几何约束条件的相关系数法匹配和整体松弛法匹配策略;最后通过对某地区一组大重叠度数码航空影像的匹配试验,证实该方法的有效性。通过检测所生成的 DSM 精度,表明相对于传统的双片影像匹配方法,多影像的匹配可以有效剔除误匹配点并显著提高影像匹配的成功率。

关键词: 多影像匹配;数字表面模型(DSM);带几何约束条件的相关系数法匹配;松弛法匹配;精度

中图分类号: P231 **文献标识码:** A

基金项目: 国家自然科学基金(40771176);国家创新研究群体科学基金(40721001)

数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)被广泛应用于城市规划、虚拟现实、交通、通信各个领域,是摄影测量和计算机视觉的重点研究内容之一。基于立体影像生成 DSM 的过程主要涉及影像匹配得到同名像点及在物方空间对表面进行 3 维重建两大核心技术,关键在于如何快速得到密集、可靠的同名像点。随着数码航摄仪的日益广泛使用,获取大重叠的数字航空影像已经变得越来越容易,将成为航空摄影的一种通用作业模式。由于一个物点能同时构像于多张影像上,为摄影测量数据处理提供了大量的冗余信息。如

何充分利用这些冗余信息约束影像匹配,以提高影像匹配的成功率和可靠性,为自动生成高精度的 DSM 提供密集的 3 维点云数据,就成为本文的研究重点。

多影像匹配可以有效减少由于遮挡、重复纹理等带来的一系列问题。Gabet 等提出了用高冗余影像匹配方法自动生成城区 DSM 的思想^[1]。它是通过获取序列影像得到具有不同基高比的立体像对,经对每个立体像对采用不同的匹配算法生成视差图并融合,以获取每个像素最可靠和精确的高程值,但计算量很大。Okutomi 和 Kanade

提出了多影像相似性测度的概念^[2],通过设定高程值来实现基准影像与搜索影像同名点的关联。Canu 等使用平均归一化相关系数^[3]、张力采用 SNCC(Sum of Normalized Cross-correlation) 自动生成高精度 DSM 的方法^[4]。综观以上各种方法,如果摄影基线较大,相似性测度的计算会非常复杂;如果影像外方位元素不精确,会造成较大的投影误差,即使同一个地物点在不同影像上的构像也不一定能够当作同名像点被识别出来。为此,Zitnich 和 Webb 提出了将匹配得到的所有候选点直接投影到物方空间、经松弛优化而确定正确匹配点的方法^[5]。虽然这在一定程度上弥补了以上方法的不足,但是要找出正确的物方组合需要进行十分复杂的分析。

有鉴于此,本文研究一种针对自动 DSM 生

成的综合利用像方和物方信息的多影像匹配方法。其基本思想是:在一组重叠影像中,取中央影像作为基准影像,其余的待搜索影像分别与之构成立体像对。先利用带几何约束条件的相关系数法进行各立体像对的初匹配;再利用松弛法整体影像匹配技术进一步确定基准影像特征点在搜索影像上的同名点;然后通过带选权迭代粗差检测功能的多光线前方交会方法实现各立体像对匹配结果在物空间的融合,从而获得准确的高程信息。以上各步骤均采用由粗到精的匹配策略,且从上层金字塔影像匹配获得的高程信息用于约束和引导下一层金字塔影像的匹配,直至完成原始影像层的匹配。图 1 示意了为生成 DSM 所进行的 3 张影像匹配算法的流程图,更多影像的匹配策略可依此类推。

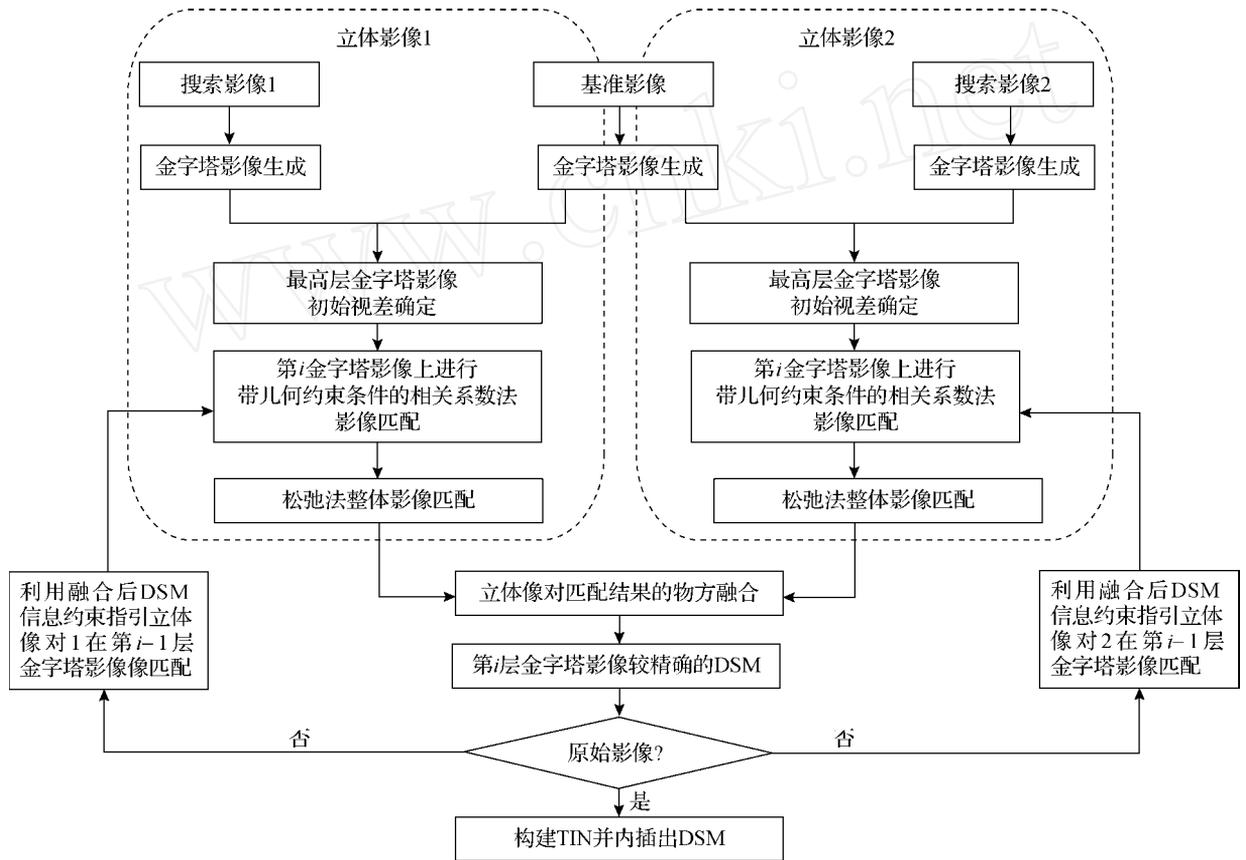


图 1 为自动生成 DSM 所进行的多影像匹配流程图

Fig. 1 Workflow of DSM generation based on multiple image matching

1 多影像匹配的关键技术

1.1 基准影像选择

基准影像可选择中央影像或是质量最好的影

像^[6-7],也可以依次选择每一张影像^[1]。一般选择中央影像作为基准影像。当遮挡情况比较严重时,最好选用每一张影像为基准影像,此时可以充分利用每张影像提供的信息,但计算量很大。

1.2 金字塔影像生成

金字塔影像生成可以采用像元平均法、小波变换法、拉普拉斯法等多种方法^[8-10]。像元平均法因具有实用、简便等优点而被广泛采用。本文采用 3 × 3 的像元平均法将待匹配的所有影像生成 4 级金字塔影像。首先对原始影像的每 3 × 3 个像元计算其平均灰度值,并赋给第一级金字塔影像的对应像元,生成第一级金字塔影像。依此类推,直至生成第四级金字塔影像。

1.3 初始视差确定

基准影像与各搜索影像间初始视差的确定在第 4 层金字塔影像上进行,需要利用各影像的外方位元素和影像覆盖区域的平均高程 \bar{Z} 。首先将基准影像中心某一特征点 (x_1, y_1) 投影到平均高程面上得到其物方坐标 (X, Y, \bar{Z}) ,然后利用共线条件方程将 (X, Y, \bar{Z}) 反投影到搜索影像上得到相应像点的坐标 (x_2, y_2) ,最后计算搜索影像上同名像点与基准影像特征点的坐标差 $(x = x_2 - x_1, y = y_2 - y_1)$ 得到影像间的概略偏移量。当地形起伏较大时,需利用模板匹配求相关系数最大值的方法获取基准影像上的特征点在搜索影像上的同名点,以得到更加准确的初始视差。试验发现,由该方法确定的初始视差精度为 100 ~ 200 个像素。

1.4 带几何约束条件的相关系数法影像匹配

如果已知基准影像和搜索影像的方位元素,将基准影像的每层金字塔影像划分成 10 × 10 的规则格网,首先在每个格网内使用 Förstner 算子提取特征点,然后采用带几何约束条件的相关系数匹配算法^[4]从各搜索影像上寻找同名候选点,并由上层金字塔影像匹配中获得的同名点经前方交会得到其近似物方坐标 (X_0, Y_0, Z_0) ,再由邻域点的高程确定高差范围 Z ,则点 p 的正确位置应该位于垂线段的 2 个端点 $p_{\min}(Z_0 - Z)$ 和 $p_{\max}(Z_0 + Z)$ 之间。如果将该线段投影到像方,则 p 点位于过像底点的直线,且 p 点的正确匹配点也必位于该投影线段上。考虑到影像外方位元素的误差,一般在投影线段附近 1 ~ 2 个像素范围内进行搜索。在此搜索范围内,以归一化相关系数为相似性测度,设定较低的阈值(这里设为 0.5),便可确定匹配候选点。

1.5 松弛法整体影像匹配

松弛法是利用邻域内的上下文信息,考虑对象之间的一致性,使得同名点能够得到较大的邻

域支持。松弛迭代过程中,正确候选点的概率得到增加,错误候选点的概率不断减小,迭代收敛时即可获得正确匹配点。对于基准影像上的特征点 I_i 可以采用带几何约束条件的相关系数匹配算法来寻找候选点。假设在搜索影像上共找到 m 个候选点 $I_j (j = 1, 2, \dots, m)$,对应的相关系数为 $r_j (j = 1, 2, \dots, m)$,则 $I_i \leftarrow I_j$ 的匹配概率为

$$P(i, j) = \frac{r_j}{\sum_{k=1}^m r_k} \quad (1)$$

在找到每个特征点的匹配候选点后,按 8 邻域进行松弛迭代。设 I_k 是 I_i 的一个邻域点, $I_l (l = 1, 2, \dots, n)$ 是其对应的匹配候选点,则可定义如下的相容系数来描述匹配 $I_i \leftarrow I_j$ 与邻域匹配 $I_k \leftarrow I_l$ 的相容性

$$C(i, j; k, l) = T \cdot e^{- (p_x^2 + p_y^2) / \sigma^2} \quad (2)$$

式中, $p_x = (x_j - x_l) - (x_l - x_k)$ 为 I_i 与 I_k 的 x 视差, $p_y = (y_j - y_l) - (y_l - y_k)$ 为 I_i 与 I_k 的 y 视差。 p_x 越大,所得的相容系数越小。这相当于对匹配结果加入了地形平滑约束,试验证实 T , 分别取 1 和 25 较为合适。

获得匹配候选点对应特征点 8 邻域的支持率 $Q^{(n)}(i, j)$ 后,可重新计算它们的匹配概率

$$P^{(n+1)}(i, j) = \frac{P^{(n)}(i, j) \cdot Q^{(n)}(i, j)}{\sum_{s=1}^m P^{(n)}(i, s) \cdot Q^{(n)}(i, s)} \quad (3)$$

式中, $Q^{(n)}(i, j) = \sum_{I_k \in (I_i)} P^{(n)}(k, l) C(i, j; k, l)$ 。其中, ω, α 为松弛系数, n 为迭代次数, (I_i) 表示点 I_i 的 8 邻域。

按式(3)计算,当所有特征点都存在一个匹配概率大于 0.9 的匹配候选点或达到最大迭代次数时,终止迭代。此时,具有最大匹配概率的匹配候选点就被认为是该特征点真正的同名像点。

1.6 影像匹配结果的物方融合

当基准影像与各搜索影像所构成的立体像对按上述方法进行匹配后,待匹配特征点可能在某些立体像对上匹配成功,而在其他立体像对上匹配失败,或者虽然找到了匹配候选点,但匹配结果在物方空间并不满足约定的几何关系,即存在误匹配。为此,本文采用多光线前方交会方法^[11],从而实现各立体像对匹配结果的物方融合。

设某特征点在 n 张搜索影像上均找到各自的同名点,当已知影像的内外方位元素时,设其对应

的地面点坐标为未知数,由共线条件方程可对这
些同名像点列出如下误差方程:

$$\left. \begin{aligned} v_x = & -a_{11} X - a_{12} Y - a_{13} Z - (x - x^0) \\ v_y = & -a_{21} X - a_{22} Y - a_{23} Z - (y - y^0) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中各符号的意义可参考文献[11]。

对于特征点和各搜索影像上找到的同名点,按式(4)可以列出 $2n + 2$ 个方程,但只有 3 个未知数,可根据最小二乘平差原理求解。平差迭代计算中,采用选权迭代粗差检测方法^[12],通过对验后方差分量的假设检验来重新设定各像点坐标观测值的权。如果匹配候选点含有粗差,其像点坐标观测值的权会越来越小,直至变为 0,使其在平差过程中不起作用,从而有效消除错误匹配点对物方 3 维坐标计算的影响。迭代收敛后,可根据单位权中误差是否小于给定阈值(设为当前金字塔影像的 1 个像元大小)来决定该点的取舍,以保证物方空间信息的精度和可靠性,并用于指引各立体像对在下层金字塔影像中的匹配。

2 试验及其结果分析

2.1 试验介绍

为了验证上述多影像匹配策略的效果,笔者从国内某地拍摄的一组黑白航空数码影像中选择了一条航线内重叠的 5 张影像(图 2 为其缩略图)进行了影像匹配和自动生成 DSM 试验。该组影像像元大小为 $9 \mu\text{m}$,相应的地面空间分辨率为 0.1 m ,航向重叠达 80% 。首先利用 POS 辅助光束法区域网平差软件 WuCAPS 对该地区 176 张影像实施带四角平高地面控制点的 GPS 辅助光束法区域网平差^[13],获得全部影像的 6 个外方位元素和 2 526 个加密点的地面 3 维坐标。经由 45 个平高地面检查点统计出来的加密点坐标精度:平面为 $\pm 7.1 \text{ cm}$,高程为 $\pm 4.8 \text{ cm}$ 。

从图 2 可以看出,试验影像中覆盖的地形较为平坦,包含有许多的建筑物、大片的纹理重复区域(如 a 区所示)和纹理缺乏区域(如 b 区所示)。根据本文的匹配策略,对所选影像进行匹配寻找同名点,得到大量的离散地面点后可构建 TIN,经内插得到了图 3 所示的规则格网 DSM。

从图 3 可以发现,所生成的 DSM 基本上反映了该地区的地形地貌特征。对于大片纹理重复区域(a 区)可以有效地排除多峰值的干扰,得到正确的匹配结果;对于纹理缺乏区域(b 区)亦取

得了较好的匹配效果;同时,建筑物也被正确地表示出来了。

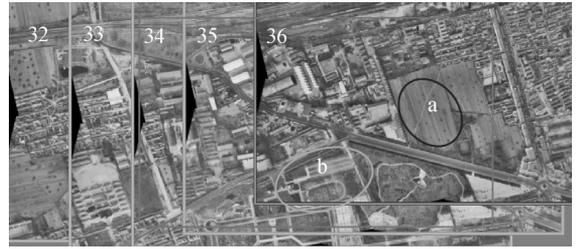


图 2 试验影像缩略图

Fig. 2 Overview of the experimental images

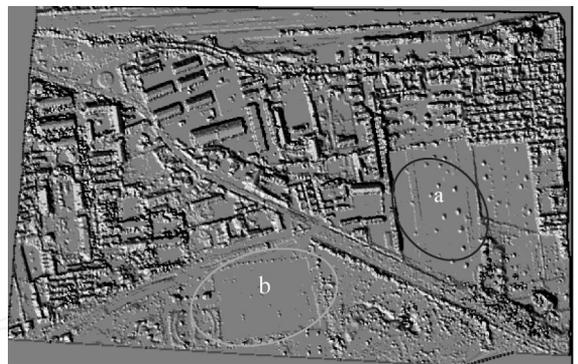


图 3 多张影像匹配生成的 DSM

Fig. 3 DSM generated by multiple image matching and interpolation

2.2 不同影像组合生成 DSM 的比较试验

为了定量评价所生成的 DSM 精度,以区域内 176 个地物点的摄影测量加密坐标为基准,通过计算其高程值与从 DSM 内插得到的高程值之差予以统计分析。对于图 2 中的 5 张影像,试验选定影像 34 为基准影像,分别与其他影像组合,表 1 比较了由各种不同影像组合进行影像匹配所生成的 DSM 结果,表 2 列出了部分加密点的高程差值。

表 1 不同影像组合所生成 DSM 精度的比较

Tab. 1 Comparisons of DSM accuracy generated by different image combinations

影像组合	匹配成功率 / (%)	误差绝对值均值 / m	中误差 / m
33/ 34	68.9	0.224	0.571
33/ 34/ 35	76.7	0.183	0.366
33/ 34/ 35/ 36	77.3	0.170	0.355
32/ 33/ 34/ 35/ 36	79.2	0.153	0.326

表 2 加密点在不同影像组合匹配生成 DSM 中的高程较差

Tab. 2 Comparisons of the interpolated elevation of check points from the DSMs generated by different image combinations

点号	加密点 高程	33/34		33/34/35		33/34/35/36		32/33/34/35/36		/ m
		内插高程	较差	内插高程	较差	内插高程	较差	内插高程	较差	
5021000	504.621	510.080	- 5.459	504.546	0.074	504.546	0.074	504.556	0.065	
5010615	503.762	503.331	0.431	503.334	0.428	503.334	0.428	503.772	- 0.010	
5041681	506.013	505.748	0.265	505.939	0.074	505.972	0.041	505.979	0.034	
5051819	503.286	503.466	0.180	503.466	0.180	503.257	0.029	503.259	0.027	
5051737	507.770	507.560	0.210	507.560	0.210	507.652	0.118	507.652	0.118	
4061362	506.636	506.374	0.262	506.493	0.143	506.560	0.076	506.560	0.076	
5031463	513.997	512.040	1.958	514.209	- 0.212	514.209	0.212	514.152	- 0.155	
5031464	514.078	514.328	- 0.251	514.225	- 0.147	514.225	0.147	514.137	- 0.059	
6031331	505.426	505.767	- 0.340	505.285	0.141	505.285	0.141	505.285	0.141	
4030965	502.211	502.566	- 0.356	502.234	- 0.023	502.234	- 0.023	502.229	- 0.018	
5061595	511.021	510.535	0.486	510.842	0.179	510.815	0.206	510.815	0.206	
5041681	506.013	505.748	0.265	505.939	0.074	505.972	0.041	505.979	0.034	
4041203	503.855	504.133	- 0.279	503.904	- 0.049	503.824	0.031	503.824	0.031	

分析表 1 和表 2 结果可以发现:

1. 随着参与匹配的影像数目的增加,影像匹配成功率在不断提高,从双像匹配时的 68.9% 显著提高到了 79.2%。究其原因在于,影像匹配过程中充分利用了各张影像在物方的融合结果。如果一个点在某个立体像对中匹配失败,但仍然可以利用它在其他立体像对中匹配成功的结果来引导和约束匹配;如果匹配错误,但可以利用多个立体像对融合后的物方信息在下一层金字塔影像匹配来纠正它,从而大大提高其寻找同名点的成功率。

2. 随着参与匹配的影像数目的增加,所生成 DSM 的误差在不断减小、精度逐渐提高。相对于双像匹配时的结果,3 张影像匹配所生成的 DSM 精度提高了 $(0.571 - 0.366)/0.571 = 35.9\%$,4 张影像匹配所生成的 DSM 精度提高了 $(0.571 - 0.355)/0.571 = 37.8\%$,5 张影像匹配所生成的 DSM 精度提高了 $(0.571 - 0.326)/0.571 = 42.9\%$ 。当使用 5 张影像匹配来自动生成 DSM 时,其高程精度达到了地面上的 0.326 m,约为 3.3 pixels。这是因为,在 3 张以上影像匹配时,可以充分利用匹配结果之间的几何约束关系,有效地剔除了单个立体像对中的误匹配点。从表 2 中的 5021000 和 5031463 匹配结果可以发现,由 33/34 立体像对匹配获得的 5021000 高程较差为 - 5.459 m,带有明显的错误,经过带粗差检测功能的多光线前方交会可以将其剔除,在 5 张影像的整体匹配中可使其高程较差降为 0.065 m。同样地,5031463 点高程较差也由单个立体像对匹

配时的 1.958 m 降到了 5 张影像整体匹配时的 - 0.155 m。

3. 相对于传统的双影像匹配,3 张影像的匹配所生成的 DSM 精度得到了明显改善。原因在于,利用 3 张影像匹配时,如 1 所述,通过物方和像方空间信息的交叉使用,可以显著提高匹配的成功率,且多光线前方交会可以增大交会角,提高点的高程精度,在加大点的密集程度同时改善了单个点的质量,有效降低 DSM 的内插误差,从而使生成 DSM 的精度显著改善。随着搜索影像数目的增加,因误匹配点已得到很好删除、匹配成功率提高速度放缓、多光线前方交会提高点高程精度作用有限,使得生成 DSM 的精度虽有所提高,但越来越不明显。总的说来,充分利用多条同名光线提供的冗余信息,能有效地提高地面点坐标的精度和可靠性。

由于只利用了有限检查点对所生成的 DSM 进行精度评定,未必能完全反映出它们之间的区别。下面分别从 2 张和 5 张影像匹配所生成的 DSM 中选取了局部区域进行比较,图 4 为 3 个细部的放大效果图。

从图 4 可以看出,由 2 张影像匹配所生成的 DSM 在平地 and 纹理贫乏区仍然有很多如颗粒状的斑点,房屋边缘变形比较厉害,这说明存在有较多的误匹配点。而采用本文方法,由 5 张影像匹配生成 DSM 时,可以有效克服上述问题,所生成的 DSM 在视觉效果上更加清晰和干净。

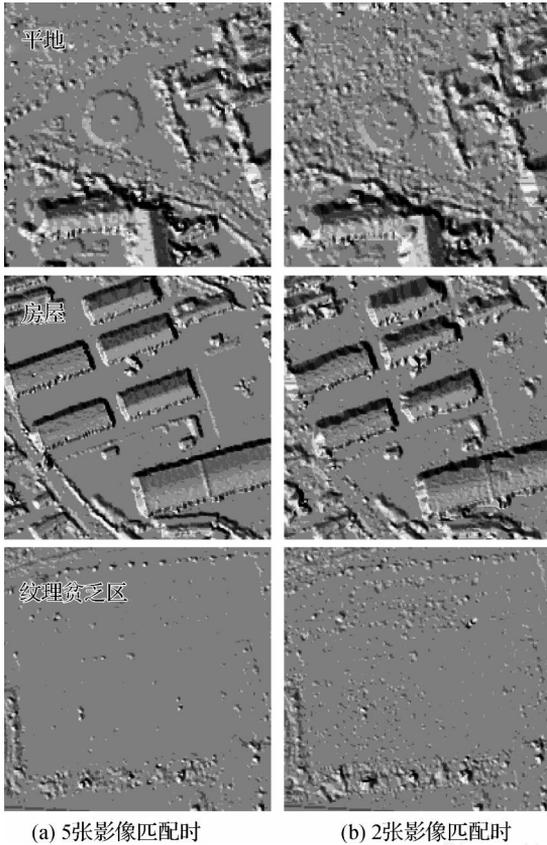


图 4 所生成的 DSM 局部放大图

Fig. 4 Enlarged views of local DSM generated by the method proposed in this paper

2.3 匹配方法比较试验

为了验证本文方法的优越性,对所选择的试验影像同时采用两种常用的匹配方法来自动生成 DSM。方法 I 取自文献[1],基准影像与各搜索影像构成单个立体像对的匹配,通过物方融合得到最终的 DSM;方法 II 取自文献[4],以 SNCC 为相似性测度,通过松弛迭代法寻找最优高程。表 3 比较了采用 3 种匹配方法所生成 DSM 的结果,图 5 示意了某一局部 DSM。

表 3 不同影像匹配方法所生成 DSM 的比较

Tab.3 Comparison results of different matching methods

匹配方法	匹配成功率	误差绝对值	中误差	CPU 耗时
	/ (%)	均值 / m	/ m	/ h
方法 I	73.7	0.157	0.340	1.91
方法 II	80.2	0.177	0.327	1.88
本文方法	79.2	0.153	0.326	1.10

分析表 3 和图 5 结果可以得出如下结论:

1. 本文方法和方法 II 的匹配成功率都接近 80%,由所得到的密集点云生成 DSM 的精度几乎一致,且优于方法 I。

2. 与方法 I 不同的是,本文方法是在每层金字塔影像匹配后,利用了多光线前方交会技术实现多个立体像对匹配结果在物方的融合,使得各立体像对间不是孤立的,综合利用了多张影像像方和物方的信息。方法 II 是基于物方空间的匹配,通过 SNCC 相似性测度,充分利用了同名像点在多张影像上的灰度近似性。这样势必会提高匹配的成功率和可靠性,最终改善生成 DSM 精度。从图 5 显示的局部 DSM 结果可以发现(A 区所示),方法 I 结果在房屋屋脊线处有比较明显的变形,而方法 II 和本文方法都可以取得较满意的结果。

3. 方法 II 的优势是在匹配过程中可以同时充分利用多张影像的辐射和几何约束信息,其代价是必须定义一个在物方空间的相似性测度,比如 SNCC。为计算 SNCC,必须进行匹配窗口变换,文献[4]中虽然利用 4 个角点求取变形参数的方法来实现对搜索匹配窗口的重采样,在一定程度上减少了计算量,但从表 3 可知,其计算量仍然是相当可观的。而本文方法虽是在像方进行匹配,但仍用到了多张影像的几何约束关系,在与方法 II 取得相当结果的同时,CPU 耗时却大大减少了。

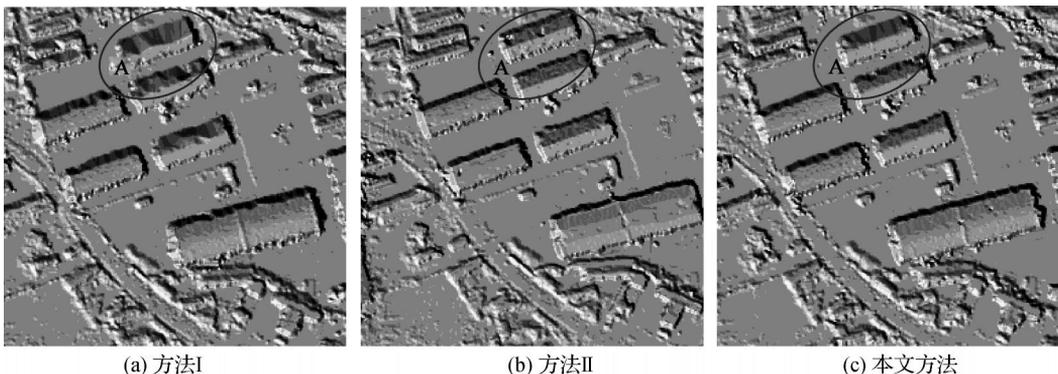


图 5 3 种匹配方法生成的局部 DSM

Fig. 5 Partial results of DSM generated by three methods

3 结 语

本文采用的多影像匹配策略是通过像方匹配信息不断精化物方信息、再由物方信息反过来引导和约束所有影像的匹配。影像匹配过程中,按照从粗到精的金字塔影像匹配原则,采用融入带几何约束条件的相关系数法和松弛法整体影像匹配算法,有效提高了影像匹配的可靠性和成功率。通过对一组大重叠度的数码航空影像进行不同组合的影像匹配自动生成 DSM 的试验发现,本文匹配方法既可考虑影像匹配自身的独立性,灵活采用现有的各种成熟影像匹配算法,又可充分顾及多影像间的内在几何约束关系,使得各个像对的匹配并不是孤立的。通过综合利用匹配过程中像方和物方的融合信息,可以有效地剔除单个立体像对中的误匹配点,保证了影像匹配的高可靠性。试验结果也揭示,相对于传统双片影像匹配,3张影像的匹配可以有效剔除误匹配点并显著提高匹配的成功率,所生成 DSM 的精度得到明显改善,但随着参与匹配影像数的增加,因误匹配点已得到很好的删除、匹配成功率提高速度的放缓,所生成的 DSM 精度的改善程度越来越小。

参考文献:

- [1] GABET L, GIRAUDON G, RENOARD L. Automatic Generation of High Resolution Urban Zone Digital Elevation Models [J]. International Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1997, 52(1): 33-47.
- [2] OKUTOMI M, KANADE T. A Multiple-baseline Stereo [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(4): 353-363.
- [3] CANU D, AYACHE N, SIRATJ A. Accurate and Robust Stereovision with a Large Number of Aerial Images [C]// Proceedings of SPIE on Satellite Remote Sensing II. Paris: SPIE—the International Society for Optical Engineering, 1995(2579): 152-160.
- [4] ZHANG Li. Automatic Digital Surface Model (DSM) Generation from Linear Array Images [D]. Zurich: ETH, 2005.
- [5] ZITNICK C, WEBB J A. Multi-baseline Stereo Using Surface Extraction [R]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 1996.
- [6] PATERA KI M, BAL TSAVIAS E. Adaptive Multi-image Matching Algorithm for the Airborne Digital Sensor ADS40 [DB/OL]. [2002]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.8.5242>.
- [7] JIANG Wanshou. Multiple Aerial Image Matching and Automatic Building Detection [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (江万寿. 航空影像多视匹配与规则建筑物自动提取方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.)
- [8] ZHANG Zuxun, ZHANG Jianqing. Principles of Digital Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002. (张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.)
- [9] MALLAT S. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674-693.
- [10] PETER J B, EDWARD H A. The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code [J]. IEEE Transaction on Communication, 1983, 31(4): 532-540.
- [11] LI Deren, ZHENG Zhaobao. Principles of Analytical Photogrammetry [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1992. (李德仁, 郑肇葆. 解析摄影测量学[M]. 北京: 测绘出版社, 1992.)
- [12] LI Deren, YUAN Xiuxiao. Error Processing and Reliability Theory [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002. (李德仁, 袁修孝. 误差处理与可靠性理论[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.)
- [13] YUAN Xiuxiao. A Novel Method of Systematic Error Compensation for a Position and Orientation System [J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(8): 953-963.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2008-03-27

修回日期: 2008-11-17

第一作者简介: 袁修孝(1963-),男,博士,教授,博士生导师。主要从事航空航天遥感高精度对地目标定位理论与方法、高分辨率卫星遥感影像几何处理等研究与教学工作。E-mail: yxxqxhyw@public.wh.hb.cn

First author: YUAN Xiuxiao (1963-), male, PhD, Professor, PhD supervisor majors in the research and education in remote sensing (RS), global positioning system (GPS) and their integration, theories and methods for high precision photogrammetric positioning, GPS/IMU-supported aerotriangulation, geometric processing of high-resolution satellite imagery, etc..

E-mail: yxxqxhyw@public.wh.hb.cn