

数字影像匹配质量的一种自动诊断方法*

李德仁 王树根

(武汉测绘科技大学摄影测量与遥感系,武汉市珞喻路 39 号,430070)

摘 要 利用欲诊断的影像匹配结果(DEM),由左、右片影像自动生成数字正射像片对和立体正射像片对,然后用影像匹配方法自动量测其高程和高程改正值,从而自动诊断并自行改正原来影像的匹配结果,同时提供 DEM、数字正射影像和立体正射像片对 3 种产品。

关键词 正射像片;立体正射像片;影像匹配;质量自动诊断;数字高程模型

分类号 P231.5

目前,数字影像匹配算法大都是利用多条核线、多点二维整体匹配、多层影像金字塔、带几何约束条件的松弛法,并将基于特征和基于灰度的匹配方法结合在一起^[1-3]。然而,由于影像匹配本身是一个病态的求逆过程,它的成功率不仅取决于地形表面复杂程度和影像的结构与纹理等特征,也取决于匹配算法的适应性。因此,自动影像匹配能否适用于生产,关键在于能否有一个自动诊断匹配质量的方法和系统,以便在人工干预之前指出哪些点是匹配成功点,哪些点匹配不成功而需要人工量测。

本文的立足点在于:(1)根据原始左、右片影像和影像匹配提供的待查 DEM,导出 2 张正射影像。若待查 DEM 正确,且地面无高程障碍物(房屋、树木和垂直断裂),则这 2 张正射像片应构成零立体;(2)由待查 DEM 和右片影像可制作立体正射影像配对片。根据 Kraus 等人的研究^[4],立体正射像片对可以进行高程量测,且其高程量测精度要高于原始的 DEM 精度 2~3 倍。由此,可利用立体影像匹配方法对正射像片和立体正射像片对进行自动高程量测,根据自动量测结果便可进行质量自动诊断^[5]。

1 基于正射影像和立体正射影像的影像匹配质量自诊断原理

1.1 基于正射影像对的立体匹配质量控制原理

正射影像的获取是由已匹配结果生成的 DEM 加上原始影像的外方位元素,通过共线方程变换而取得的。因而,正射影像同 DEM 之间有着必然的联系。若原始匹配结果发生错误,必然会在 DEM 和正射影像上体现出来。因此,通过检查正射影像的质量可以发现和改正原始匹配结果的错误。

由左、右影像立体覆盖范围产生的 2 个正射影像理论上应该是一致的。对由左、右片制作的 2 个正射影像进行匹配,其左右视差应为 0。若有视差存在,则可能有两种原因:①定向参数有错,从而导致左右正射影像不一致,或利用正射影像对的再匹配过程本身有错;②用以生成正射影像的 DEM 有错。如果排除第一种可能,那么此时在正射影像对上出现的视差便是 DEM

收稿日期:1994-08-18。李德仁,男 55 岁,教授,博士生导师,中国科学院院士,中国工程院院士,现从事 3S 集成理论与应用研究。

* 国家测绘局测绘科技发展基金资助项目。

错误的直接反映,而 DEM 有错恰恰是由于原始影像的错误匹配造成的。图 1 是基于 2 个正射影像的视差自动量测来检查和改正原始 DEM 错误的原理图。

设地面点 A 的高程为 Z_A ,当由原始影像匹配得到的 DEM 高度含有误差 Δh (比实际应有高度低)时,则由左、右正射影像可量得其左右视差为 A_0A_0'/M (M 为正射影像比例尺分母),即

$$A_0A_0' = M \cdot \Delta P_a \quad (1)$$

此时, ΔP_a 为正,即

$$Z_A = h_{DEM} + \Delta h \quad (2)$$

由图 1 的关系可导出:

$$\text{tg}\theta_1 = \frac{X_A - X_{S1}}{Z_{S1} - Z_A}, \quad \text{tg}\theta_2 = \frac{X_{S2} - X_A}{Z_{S2} - Z_A} \quad (3)$$

在此基础上可求出在 $\triangle AA'A''$ 中的 Δh :

$$\Delta h = \frac{1}{\text{tg}|\theta_1| + \text{tg}|\theta_2|} \cdot \Delta P_a \cdot M \quad (4)$$

因为在(3)式中, $Z_A = h_{DEM} + \Delta h$,故上述解算需迭代进行,直至达到要求的精度。

1.2 基于立体正射影像高程量测的匹配质量控制

立体正射影像对既然可以用来量测地面点的高程。这里存在一个很有趣的问题:为了制作立体正射影像,必须具备相应地区的 DEM。既然有了 DEM,再用立体正射影像对量测高程似乎是没有意义了。然而,事实并非如此,因为立体正射影像对上所量测的高程精度通常要高于所使用的 DEM 的高程精度^[1,9,10],图 2 可以说明这种关系。

假定由左片制作正射像片,由右片制作立体匹配片(以斜平行投影法为例),并假设 $K = \text{tga} = B/H$ (基线/航高),然后讨论数字高程模型误差产生的影响。

图 2 中的物点 P,按其真实高程 Z 投影到正射像片和立体匹配片的位置为 P_0 和 P_1 ,2 点的视差为 P_s 。若高程模型在 P 处有一误差 d_z ,则按中心透视获得的 2 个像点 P_1 和 P_2 的光线将投影至高程错了 d_z 的水平面上, P 点被分成 \bar{P}_1 和 \bar{P}_2 2 个点。点 \bar{P}_1 在正射像片上的位置为 \bar{P}_0 ,点 \bar{P}_2 在立体匹配片上的位置为 \bar{P}_1 ,2 点的视差为 \bar{P}_s 。由图中几何关系可以证明 $P_s = \bar{P}_s$,即由立体正射像片对计算的高程不受 DEM 高程误差 d_z 的影响。

当然,上述讨论是理想的情况。实际上由于每个点的航高在变化,其基高比也是变化的,而立体匹配片却不可能改变斜平行投影方向,再加上每个物点处的地形不可能象图 2 所示的那样水平,所以,实际的立体正射像片对量测高程时不可能完全不受 DEM 高程误差的影响。根据 Kraus 教授等人的研究,立体正射像片对的高程量测精度比用来制作立体正射像片的 DEM 的高程精度高 3 倍^[1]。

正是由于这个原因,因此可以通过全片的自动视差量测求得匹配窗口中新的 DEM 值,这个 DEM 与原始 DEM 之差通过与上述图 1 所求得的 Δh 向量相比较,可以同时原始影像匹配所建立的 DEM 进行质量自检。

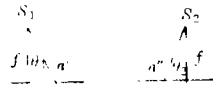


图 1 基于正射影像对的 DEM 检测改正原理

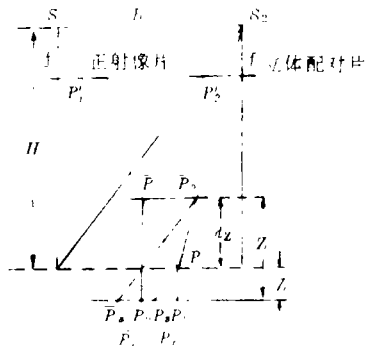
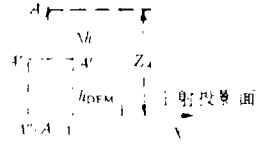


图 2 立体正射影像对上高程模型误差的影响

需要说明的是,对于给定的 DEM,为了获得立体正射像片上最大的高程量测精度,必须使用相邻 2 张像片的重叠范围分别制作正射影像和立体匹配片^[9]。另外,用右片制作立体匹配片对通常有两种投影方法可供选择,即斜平行投影和对数投影。由于用斜平行投影法制作立体匹配片可能会造成立体正射像片上获得相同的左右视差,而实地却对应不同的高差,从而带来难以解决的问题^[4,6]。因此,在利用基于立体正射影像的高程量测来实施影像匹配质量控制时,建议采用对数投影法来制作由右片导出的立体匹配片。

综合上述内容,我们可以这样来归纳基于正射影像和立体正射影像相结合的匹配质量控制原理:如果用 $(DEM)^0$ 表示由原始影像匹配提供的数字高程模型, $\Delta(DEM)$ 表示由 2 个正射影像之间的匹配求得的对 $(DEM)^0$ 的改正矩阵,而用 $(DEM)^1$ 表示由立体正射影像对之间的匹配求得的新的数字高程模型,那么,通过再匹配,我们希望得到如下等式:

$$(DEM)^0 + \Delta(DEM) = (DEM)^1 \quad (5)$$

若上式成立(实际上由于匹配本身精度限制,上式不可能严格相等,只能在一定精度范围内成立),则原则上可以将 $[(DEM)^0 + \Delta(DEM) + (DEM)^1]/2$ 作为该匹配区域最终的数字高程模型。

对地表光滑的匹配区域,上述思想是可以接受的。但当地表有房屋、树木等具有一定高度的人工或自然目标时,则需利用其它手段来区分 $\Delta(DEM)$ 及 $(DEM)^1$ 中多少是由于 $(DEM)^0$ 错误引起,多少是由于房屋和树木等引起。若能做到这一点,就可以用上述原理在对检定出的错误匹配结果进行自动改正的同时,测定出地表具有一定高度的人工或自然目标的高度。为此需要引入稳健估计、特征提取和模式识别等技术,本文暂不讨论。

2 试验和分析

为了验证上述影像匹配质量控制方案的可行性与正确性,在 386 微机上编制了一整套相应的软件,主要包括正射影像和立体匹配影像的生成以及基于此的相关系数法影像再匹配质量控制过程。整个试验设计包括用实际数据进行计算和用模拟数据进行计算,对实际数据的计算试验又包括航片和 SPOT 影像两种构像方式的情况。下面逐一加以介绍。

2.1 航片实际数据试验之一

采用湖北广水地区的一个立体像对进行试验,像幅大小为 $18\text{cm} \times 18\text{cm}$,摄影比例尺 1:1.5 万,主距为 209.522mm,数字影像扫描像元大小为 $100\mu\text{m}$ 。试验用影像重叠范围内 DEM 是在 C100 解析测图仪上采集得到的,DEM 格网间隔在 X、Y 方向均为 50m,试验窗口大小 500 像元 \times 500 像元,所制作的正射影像比例尺 1:2 万。

表 1 航片数据再匹配质量控制结果(总点数 323)

方法	视差范围	迭代次数及点数		
		初次视差检测	第一次迭代	第二次迭代
正射 影像	$P_r \leq \delta_1$	305	312	314
	$\delta_1 < P_r < \delta_2$	9	2	0
	$P_r \geq \delta_2$	9	9	9
匹配		质量控制后视差中误差为 0.240 像元		
立体正 射影像	$P_r \leq \delta_1$	294	314	
	$\delta_1 < P_r < \delta_2$	20	0	
	$P_r \geq \delta_2$	9	9	
匹配		质量控制后视差中误差为 0.291 像元		

对航片资料的试验包括基于正射影像的再匹配和基于立体正射影像的再匹配,其结果列于表 1。试验中所取控制阈值 δ_1 为 0.65 像元, δ_2 为 3.0 像元,即在影像匹配质量控制迭代计算过程中,凡视差值小于或等于 δ_1 的数据点,认为原始匹配结果正确,无需改正;对于视差介于 δ_1 和 δ_2 之间的数据点,需进行迭代改正计算其高程;而对于视差等于或大于 δ_2 的数据点,则认为该点已失去相关,要求人工干预。 δ_2 的取值可视具体情况而定,且可随迭代次数增加而适当减小其值。

从两种方法相关结果的影像显示情况看,表中 $P_i \geq \delta_2$ 的点都对应着影像上同一范围,正好落在影像上信息量最不丰富或左右片灰度差悬殊的点上,这也正好说明上述相关系数法影像匹配过程是正确的。

从影像匹配质量自诊断观点看,可以将(5)式左右片的 DEM 按双观测值计算其精度:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{[AA]}{2n}} = 1.22\text{m}$$

式中, A 为(5)式左右两片 DEM 之差值, n 为匹配点数(此例中 $n=323$)。进而可求得 $|A| \leq 1.0\sigma_0$ 的点数为 298 点, $\sigma_0 < |A| \leq 3\sigma_0$ 的点数为 3 点, $|A| > 3\sigma_0$ 的点数为 22 点。若规定 $|A| > \sigma_0$ 的点需要干预,则此例人工干预量为 7.7%,而且计算机可以自动指出需要人工干预点的位置,从而起到自动诊断的作用。

2.2 航片实际数据试验之二

该立体像对取自高原山区,地面高差达到 400m,像幅 23cm×23cm,摄影比例尺 1:1 万,主距为 152.888mm,像元尺寸为 100 μm ,数字化影像是在平台式扫描仪上获得的。原始的 DEM 由武汉测绘科技大学 WuDAMS 全数字化测图系统软件包进行数字影像匹配而获得。DEM 的格网间距为 10m。

质量自诊断取试验窗口大小为 500 像元×500 像元。正射影像比例尺 1:1 万, δ_1 取为 0.5 像元。利用本文的方法对正射像片对进行零立体影像匹配,全部 2 303 个点上的视差均小于 δ_1 ,视差中误差 $m_r = \pm 0.055$ 像元。这表明原始匹配结果的质量是可信的。

对同一试验区按斜平行投影法制作立体匹配片,然后对立体正射影像对进行再匹配,结果是只有 85% 的点,其视差 $\leq \delta_1$,而另外 15% 的点被诊断为需进行人工干预。

分析其原因,作者认为主要是由于该影像属于高差较大的山区,平均航高约 1 529m,而地面高差却达到 400m,地面最大坡度达到 45°以上。从匹配过程的影像显示可看到:左片上相邻 2 个格网点在右片的同名影像合成一个点,从而导致立体正射影像对匹配的困难和较大的误差。这表明,在地形起伏大的地区应以零立体正射影像对作为质量自诊断的主要手段。

2.3 SPOT 影像实际数据试验

试验资料为法国马赛地区的一个像对,影像尺寸 6 000×6 000 扫描行,像元尺寸 25 μm ,轨道平均高度 832km,主距为 2 087.4mm,其它参数详见文献[7,8]。试验所用 DEM 是从 1:5 万地形图上采集得到的,DEM 间隔为 100m,所制作的正射像片比例尺 1:20 万,试验窗口大小为 340 像元×520 像元,窗口上半部分落在城区,下半部分落在山地。对 SPOT 影像的试验同样包括基于正射影像和立体正射影像的再匹配,试验结果列于表 2。

表 2 中 δ_1 取值为 1.2 像元,这与 SPOT 影像外方位元素的精度有密切关系。 δ_2 的值则是从迭代开始时的 5.0 逐渐降至 3.0。另外,在用立体正射影像进行匹配时出现的 17 个 $P_i \geq \delta_2$ 的点均落在窗口下半部分所属的山区地带,可能导致对立体正射影像对进行匹配的困难。

表 2 SPOT 影像再匹配质量控制结果

方法	视差范围	迭代次数及点数			
		初次视差检测	第一次迭代	第二次迭代	第三次迭代
正射影像 匹配 (总点数 352)	$P_x \leq \delta_1$	278	330	352	
	$\delta_1 < P_x < \delta_2$	74	22	0	
	$P_x \geq \delta_2$	0	0	0	
质量控制后视差中误差为 0.892 像元					
立体正射 影像匹配 (总点数 336)	$P_x \leq \delta_1$	174	284	318	319
	$\delta_1 < P_x < \delta_2$	160	35	1	0
	$P_x \geq \delta_2$	2	17	17	17
质量控制后视差中误差为 0.575 像元					

2.4 模拟数据试验结果

考虑到实际原始影像匹配结果一般仅在部分点上有粗差,因此,我们在经质量控制后的实际 DEM 数据中,随机地在某些点上(按 5%~10%的错误率)加入 5~15m 的粗差,然后按本文建议的方法,对零立体正射影像对和立体正射影像对进行再匹配,并用迭代方法进行自改正。所用影像同上文 2.1 中的试验数据,试验结果列于表 3。

表 3 部分 DEM 点上加粗差后再匹配检测改正情况(/m)

点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
加粗差大小	-10.0	-5.0	+10.0	+10.0	-10.0	+15.0	+10.0	-15.0	-10.0	+10.0
正射影像匹配 初次检测改正值	+5.10	+4.42	0.00	-9.68	+7.58	-16.90	-4.97	+10.81	+5.78	-5.05
立体正射影像匹配 初次检测改正值	+11.66	+7.56	-10.30	-8.79	+13.10	-15.58	-8.16	+13.68	+11.71	-9.19

通过上述方式的模拟试验进一步证明,影像匹配迭代改正 DEM 的计算过程是收敛的。通过基于正射影像和立体正射影像的再匹配过程,可以检测出并改正由于原始影像错误匹配而导致的 DEM 错误。

3 初步结论

综合全文,可初步得出如下几点结论:

(1) 利用正射影像所具有的正射特性及零立体效应来检测原始影像匹配结果 DEM 的正确与否,其理论是正确的。由于正射影像已基本消除了因地形起伏而引起的像片变形,故对其利用相关系数法进行再匹配可获得较高的匹配精度。

(2) 理论上可以证明,基于立体正射影像对的高程量测精度要高于用来制作立体正射影像的 DEM 的精度。因此,利用基于立体正射影像对的再匹配过程所求得的匹配窗口中新的 DEM 值,可以作为对仅仅利用正射影像的再匹配质量控制过程的补充,以提高对原始 DEM 检测结果的可靠性。但是,在地形起伏很大, $\Delta h/H$ 较大地区,斜平行投影的立体正射像片对不宜采用。

(3) 通过对 3 幅实际影像资料进行试验和部分模拟试验表明,本文所提出的影像匹配质量控制方法可以发现并且改正原始影像匹配所得结果 DEM 中的错误。检测和改正 DEM 的迭代计算过程是收敛的,一般只需迭代 2~3 次即可达到要求的精度。因此,利用该方法作影像匹

配质量控制对地表光滑且具有密集型 DEM 格网的地区是可行的。

参 考 文 献

- 1 Helava U V. State of the Art in Digital Photogrammetric Workstation. Washington ;ASPRS, 1992. 10~18
- 2 Ackermann F, Schneider W. Experience with Automatic DEM Generation. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXIX, Part B4. Washington; Comm. IV ISPRS. 1992. 986~989
- 3 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量的发展. 测绘遥感信息工程国家重点实验室年报, 1991; 38~48
- 4 卡尔·克劳斯. 摄影测量信息系统的理论和实践. 北京: 测绘出版社, 1989.
- 5 王树根. 数字影像匹配质量自检的自动方法: [学位论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1993
- 6 李德仁, 郑肇葆. 解析摄影测量. 北京: 测绘出版社, 1992.
- 7 王树根. 用 SPOT 影像在 ORI 上制作正射像片. 测绘通报, 1990(1): 16~19
- 8 程家瑜. SPOT 影像的摄影测量处理: [学位论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1988
- 9 Finsterwalder R. 立体正射像片的精度. 见: 国际摄影测量学会第十四届大会译文选译. 冶金部勘察科学技术研究所, 1982. 264~268
- 10 Van Wilk M. Geometrical Quality of Stereo-orthophoto Produced from Automatic Image Correlation Data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1979(10): 1438~1441

An Automatic Quality Diagnosis Method for Digital Image Matching

Li Deren Wang Shugen

(Dept. of Photogrammetry and Remote Sensing, WTUSM, 39 Luoyu Road, Wuhan, China, 430070)

Abstract An orthophoto pair has the property of zero-stereo and a stereo-orthophoto pair can be used for accurate elevation measurement. Based on these two points, an automatic quality diagnosis method for digital image matching is presented in this paper. The main idea of this method is that after automatic generation of orthophoto pair and stereo-orthophoto pair from the DEM to be tested, derived from the image matching or original left and right images, an automatic measurement procedure will be done in order to determine the heights or the corrections of height. This automatic diagnosis system gives a quality control and points out the positions where the matching is failure and needs operator interactive work. The final products are corrected DEM, digital orthophoto and stereo-orthophoto pair. The correctness and feasibility of the suggested method are tested using aerial photographs, SPOT stereo images and simulated data.

Key words orthophoto; stereo-orthophoto pair; image matching; automatic quality diagnosis; digital elevation models (DEM)