

一种基于三角网约束的立体影像 线特征多级匹配方法

张云生¹ 朱庆² 吴波³ 邹峥嵘¹

(1 中南大学地球科学与信息物理学院,长沙市麓山南路 932 号,410083)

(2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(3 香港理工大学土地测量及地理资讯学系,香港九龙红磡,999077)

摘要:针对直线匹配可靠性问题,提出了一种基于三角网约束的立体影像线特征多级匹配方法。首先采用 SURF 算法匹配一部分可靠的种子点,利用这些种子点约束其邻域内的直线匹配;然后,将这些种子点构建三角网,利用三角网约束直线匹配的搜索范围,进行三角网约束下的线-线匹配;再次,在三角网的约束下,进行线-面匹配。为了提高直线匹配相似性测度的可区分性,提出了基于移动窗口的自适应直线相关方法,不仅在表面非连续区域能取得可靠匹配,在纹理缺乏区域也能取得可靠匹配结果。利用具有典型纹理特征的近景影像和航空影像进行了试验分析,结果表明,本方法能获取可靠的直线匹配结果。

关键词:直线匹配;三角网约束;直线相似性测度;多级匹配

中图法分类号:P237.3; P208

近年来,利用直线信息来重建人工地物三维模型在摄影测量和计算机视觉领域中都引起了广泛的关注^[1-2]。要利用影像的直线信息重建三维目标,直线匹配是其瓶颈问题之一。在过去几十年中,国内外的研究学者开展了大量针对直线匹配的研究。已有方法大致可以分为以下两类:①单直线的匹配,利用核线或者可靠种子点进行约束,再使用相似性测度确定匹配直线^[3-5]。仅利用核线几何约束时,同名直线匹配搜索范围依然较大,如果仅利用种子点约束,则只能匹配种子点周围的直线。②组直线匹配,通过几何约束条件、辐射信息约束条件确定候选匹配,然后通过动态规划、松弛标记等优化方法得到整体最优解^[6-7]。整体匹配方法可以利用更多的几何条件如平行等拓扑关系减少匹配歧义性,但是计算复杂,而且拓扑连接、端点的不可靠等因素使得直线匹配很困难。

因此,针对立体影像线特征匹配缺乏有效约束的难点问题,本文提出了一种基于三角网约束

的线特征多级匹配方法,利用三角网约束条件减少线特征匹配搜索范围,并提出了一种基于移动窗口的自适应线特征相关系数法衡量直线的相似性,保证了直线匹配的可靠性。

1 基于三角网约束的直线匹配方法

本文基于三角网约束的直线匹配方法流程图如图 1 所示。先利用 EDSION 算法提取边缘^[8],并将提取结果细化成单像素边缘,在此基础上将曲线近似为直线段,对近似得到的线段进行最小二乘拟合,拟合的直线作为本文的直线匹配基元。然后将立体影像上的直线按照长度排序,并记录直线中点。再计算每条直线与经过直线中点核线的夹角 A_0 作为直线的方向信息^[9]。因为立体影像往往来自于不同视角,影像之间的纹理和颜色都存在一定的差异,或者由于成像环境的影响,导致影像部分区域过亮或过暗。因此,在特征提取之前先利用 Wallis 滤波对影像进行预处理以锐

化影像的纹理并提高影像的信噪比^[9]。

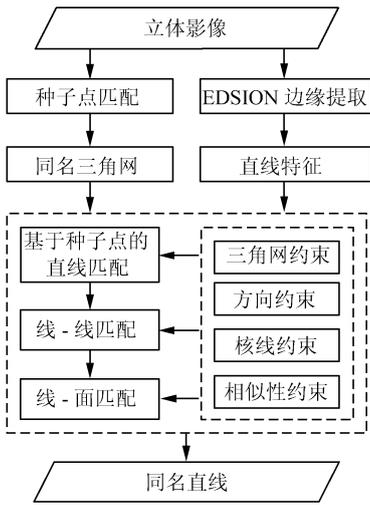


图 1 直线匹配流程图

Fig. 1 Flowchart of Line Matching

1.1 匹配约束条件

匹配搜索范围的确定和直线相似性测度是直线匹配的两个关键问题,如果同名直线搜索范围过大,则增加了匹配错误的几率,而且耗时加长;如果搜索范围过小,则正确的匹配也可能被排除在外。为了提高线特征匹配的可靠性,并同时保证效率,需要确定合理的搜索范围。核线约束、方向约束与相似性约束是比较常用的直线匹配约束条件^[9]。根据影像的成像几何关系,直线在不同影像上的投影直线方向存在有一定的联系,本文采用直线与对应的核线的夹角作为直线的方向信息,当立体影像上两直线的方向差在给定阈值 t 范围内时(本文 t 取 30°),才有可能为同名直线。但核线约束和方向约束对直线搜索范围的约束有限,而传统的相似性约束缺乏自适应性,因此,本文提出了以下两种新的直线匹配约束条件。

1.1.1 三角网约束

三角网用于约束直线匹配即指同名直线经过同名三角网,如图 2(a)中,对于直线 l (黑色加粗标记),其经过的三角网为图 2(a)所示 6 个三角形,则其同名直线应位于其对应三角网中。相反,以 l 的每一条候选匹配直线作为待匹配直线,在左影像上寻找同名直线,则其候选匹配也应该在对应的三角网中。匹配过程中,先寻找与对应三角网外接矩形有交集的直线,再判断是否与三角网相交。在三角网的约束下,直线匹配不需要在整个影像范围内搜索或者是核线包围盒内搜索,搜索范围可以得到很大程度上的减小。

如图 3(c)中的一条直线,如果使用文献[3]中的核线约束条件,一共存在 204 条候选匹配直

线,如图 3(d)所示。而使用本文方法时,首选跟踪出直线经过的三角网,如图 3(e)所示;一共经过 7 个三角形,对应的候选匹配直线一共有 5 条,如图 3(f)所示;从实验可以看出,本文的三角网约束相对于传统的核线约束能减少直线候选匹配数量。

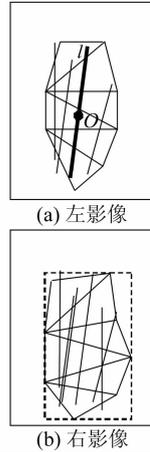


图 2 三角网约束
Fig. 2 Triangle Constraint

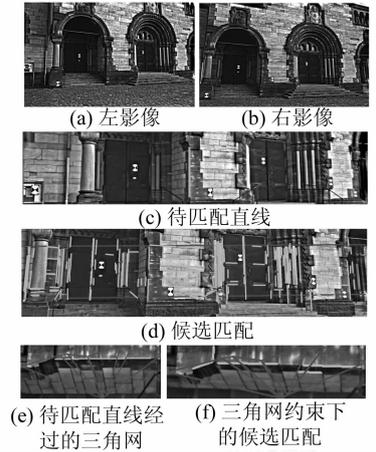


图 3 直线候选匹配
Fig. 3 Line Matching Candidates

1.1.2 自适应相似性约束

在三角网及方向约束下,待匹配的直线依然可能有多余一条的候选匹配存在,需要进一步利用直线周围的灰度信息或者颜色信息计算相似性测度来确定正确匹配。一个有效的相似性测度,需要有较高的区分性(distinctiveness),从而可以将正确匹配的直线匹配出来。本文提出了一种基于移动窗口的自适应直线相关方法(shiftable self-adaptive line cross correlation, SSLCC),作为直线的相似性测度。SSLCC 的计算过程如图 4 所示。利用核线与直线的交点确定直线重叠部分,采用一个固定宽度为 w 的矩形窗口(本文 w 取 15),窗口的其中一边与匹配直线 l 平行,沿着垂直与 l 的方向以一定步长滑动(本文取为 2),如图 4(a)所示虚线箭头方向滑动,滑动距离设为 r ,直线两侧滑动等长的距离,即从直线的左边(窗口边缘为当前待匹配直线)滑动到直线的右边。对于每一个窗口,计算归一化相关系数(NCC)。为了加快相关系数计算,窗口内的每个像素坐标由窗口的四个角点坐标双线性内插计算得到,每个坐标的灰度也采用双线性内插计算。获取每个平滑窗口相关系数后,取相关系数最大值作为直线的相关系数。如果取固定窗口计算相关系数,窗口过小,则参与计算的信息量过小,在纹理缺乏区域,相似性测度的可区分性将下降。因此,在窗口

滑动完之后,再进行一次自适应增长,即如果滑动窗口在直线右侧获取极大值,则往右增长,如图4(c)、4(d)所示;反之,则往左,每次同样以一定步长增长(本文取2个像素),直到SSLCC不在增大或者达到扩张次数最大值(扩张次数最大值设置为4)。当直线位于断裂处时,SSLCC将更多利用直线其中一侧的信息,而直线位于非断裂处时,可以有效利用直线两侧的信息,从而增加了直线相似性测度的可区分性。

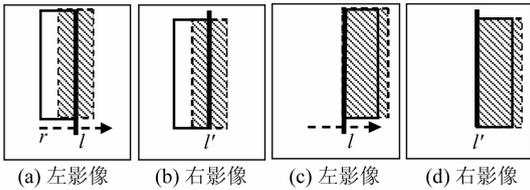


图4 基于移动窗口的自适应直线相关系数

Fig. 4 Shiftable Self-adaptive Line Cross-Correlation

综上所述,本文的直线匹配约束条件一共采用了4个约束条件,首先利用三角网将直线候选匹配约束到一个较小的范围,然后利用方向约束进行宽松的约束,快速地减小候选匹配数量以减少后续相似性的计算量,核线约束主要用于确定立体影像间直线的重叠范围以用于相关系数的计算,相似性约束用于最后确定匹配直线。

1.2 基于种子点约束的直线匹配

文献[10]提出的SURF算法,具有尺度和旋转不变等特性,而且效率较高。本文在没有立体像对定向保留的同名点时,利用SURF算法提取特征点以及描述符,并在核线约束下匹配一定数量的种子点,进一步采用双向匹配一致性检测来提高种子点匹配的可靠性。在此基础上,利用最小二乘影像匹配计算每个同名点的相关系数,保留相关系数大于0.75的同名点作为种子点约束后续的直线匹配。获取种子点后,建立同名三角网。种子点一定邻域内的直线,则利用这些种子点约束进行匹配,其主要步骤如下。

1) 利用种子点确定候选匹配:循环选取每一对种子点,获取距离种子点在一定范围内(本文取3个像素)的直线集合。则左影像(参考影像)和右影像(搜索影像)都可能有多条直线存在,再循环选取参考影像上直线集合中的与核线夹角超过一定阈值 t_θ (本文取 10°)的每条直线,搜索影像上确定的直线集作为候选匹配进行下一步的匹配。

2) 利用匹配约束过滤候选匹配:利用确定的候选匹配,再比较待匹配直线的方向,如果方向夹角在给定阈值内(本文取 30°),则转到步骤3)。

3) 利用SSLCC确定直线匹配假设:对于经过步骤2)剩下的候选匹配,由核线与直线的交点,计算直线的重叠部分,并计算自适应直线相关系数。取相关系数最大值对应的直线为该直线的匹配假设。

4) 双向一致性检测:以上步获取的匹配假设为待匹配直线,进行一次从右到左的匹配,如果两个方向的匹配结果一致,则认为获取了一组匹配直线。这些直线将不再参与后续的匹配。

5) 重复处理完当前种子点相关的所有直线,进入下一个种子点的匹配。

1.3 基于三角网约束的线-线匹配

在直线匹配过程中,当直线与核线平行或者近似平行时,不能直接利用直线与核线相交来确定用于计算SSLCC的直线重叠范围。因此,将待匹配直线离散成独立的像素,并在三角网的约束下,逐点寻找待匹配直线像素的同名点^[11]。在独立匹配情况下,由于纹理重复等原因,在匹配结果中可能存在一些错误匹配,本文根据同一条直线上像素对应的视差变化连续的特点^[12],基于RANSAC算法拟合一条匹配同名点的视差直线^[13],来剔除可能的错误匹配点。基于三角网约束的线-线匹配的主要步骤如下。

1) 利用同名三角网确定候选匹配:对于左影像中的一条直线,确定中点所在的三角形,并跟踪出该直线经过的所有三角形,从而得到右影像上的同名三角形,由这些三角形确定外接矩形,选取经过矩形的所有直线为候选匹配。在此基础上,再滤掉没有经过任何一个三角形的直线。然后判断当前直线与核线的夹角,如果夹角小于给定阈值(本文取 30°),则转到步骤4),否则余下的直线将进一步利用其他匹配约束条件进行过滤。

2) 候选匹配过滤:比较待匹配直线与候选匹配的方向,如果方向夹角在给定阈值内(本文取 30°),则转到步骤3)。

3) 利用SSLCC确定直线匹配假设:对于剩下的候选匹配,由核线与直线的交点,计算直线的重叠部分,并计算SSLCC。取相关系数极大值对应的直线为匹配假设,如果极大值大于给定的阈值(本文取0.6),则转到步骤6)。

4) 独立像素匹配:在三角网约束下,将搜索影像上与待匹配直线中点对应核线夹角小于给定阈值的直线都作为直线候选匹配。将待匹配直线离散成像素,在中心像素 3×3 邻域内计算Harris兴趣值^[14],并按兴趣值大小排序。在三角网约束下,按照兴趣值由大到小的顺序独立匹配

每个像素。

5) 视差拟合:利用 RANSAC 算法拟合一条匹配同名点的视差直线,当拟合函数的内点个数超过给定阈值时(本文取 50%的同名点),取所有内点的相关系数之和作为直线候选匹配的相似性系数。取相关系数极大值对应的直线为该直线的匹配假设,如果极大值大于给定阈值(本文取 0.6),转到步骤 6)。

6) 双向一致性检测:由于影像上遮挡等原因影响,经过以上步骤确定的同名直线可能存在有错误匹配,因此引入双向一致性检测,验证直线匹配假设。以确定的匹配假设为待匹配直线,左影像上对应的三角网内的所有直线作为候选匹配,进行一次从右到左的匹配过程,如果两个方向的匹配结果相容,则认为获取了一组正确匹配。对于匹配成功的直线,将不再作为其他直线的候选匹配。

1.4 基于三角形约束的线-面匹配

由于受光照以及成像角度等原因的影响,有一部分直线特征的对应同名直线在搜索影像上并没有被成功提取出来。因此针对这一部分直线的匹配也将待匹配直线离散成一定间隔的像素(本文取所有像素),并在三角网的约束下,独立匹配每一个像素。对匹配得到的同名点基于 RANSAC 算法拟合一条视差直线,过滤掉可能的错误匹配点,当拟合函数的内点个数超过给定阈值时(本文取 50%的同名点),如果所有保留内点的相关系数平均值超过给定阈值(本文取 0.6),则在此基础上,利用 SSLCC 计算整条直线的相似性系数作为该条直线匹配的相关系数,如果该系数超过给定阈值(本文取 0.6),则以右影像为参考影像,匹配所获得的直线作为待匹配直线,进行一次从右到左的匹配;如果匹配得到的直线与原始左影像上的参考影像的直线距离小于给定阈值(本文取两个像素),则左/右匹配结果相容,认为获得一组正确的匹配直线。

2 试验分析

为了验证本文方法的有效性,一共采用了两组试验数据进行试验,第一组为图 2(a)、2(b)所示的立体像对。该立体像对为典型的建筑物近景立面影像,图像大小为 1 536 像素×1 024 像素,重复纹理较多;第二组为图 5 所示的航空立体像对,为局部数码航空影像,大小为 1 000 像素×1 600 像素,影像集中在人工建筑物密集区域,存在有大量的建筑物边缘,表面非连续区域。

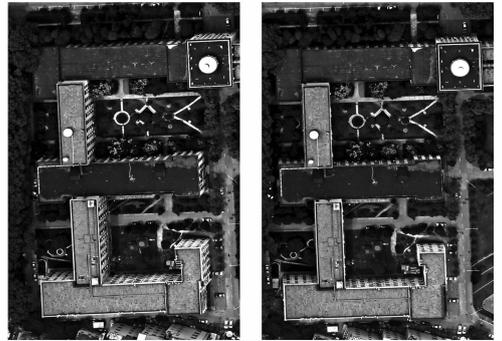


图 5 航空立体像对

Fig. 5 Aerial Stereo Images

为了进行对比,本文还实现了文献[3]的直线匹配方法,另外,为了对比本文的自适应直线相关系数计算方法,还分别利用文献[15]采用的基于半平面的直线相关系数法(窗口宽度取 15)和文献[4]采用的传统固定窗口直线相关系数法(相关窗口垂直于直线方向的宽度取 15)来代替本文 SSLCC 进行直线匹配,结果如表 1 所示。其中基于文献[15]计算相关系数的结果在表 1 中用半平面表示,基于文献[4]计算相关系数的结果在表 1 中用固定窗口表示。为了验证本文方法的可靠性,试验中采用人工方法判断直线匹配的正确率。鉴于篇幅,本文只用图 6 表示文献[3]方法和本文方法的直线匹配结果。

表 1 直线匹配结果

Tab. 1 Line Matching Result

立体像对	提取直线 结果(左/右)	文献[3]方法		固定窗口		半平面		本文方法	
		共匹配	正确	共匹配	正确	共匹配	正确	共匹配	正确
近景立 体像对	689/779	492	335 (68.1%)	499	493 (98.8%)	512	507 (99.0%)	565	560 (99.1%)
航空立 体像对	323/304	136	96 (70.6%)	141	136 (96.4%)	146	137 (93.8%)	201	193 (96.0%)

对于近景立体像对,经过直线提取后,保留位于种子点构成的三角网范围内且长度大于 30 个像素的直线,左影像一共有 689 条直线,右影像有

779 条直线,如图 6(a)所示。使用文献[3]的方法一共匹配了 492 条直线,其中 335 条直线匹配正确,正确率为 68.1%,主要原因是因为立体像对

存在较多重复纹理,而核线束约束搜索范围较大,从而导致了较多的错误匹配;而采用本文三角网约束后,采用固定窗口的相关系数法、半平面相关系数法、本文自适应相关系数法,正确率分别达到98.8%、99.0%、99.1%。在采用本文三角网约束下的情况下,3种相关系数法对应的正确匹配数目分别是493、507、560,表明本文方法能够获取最多数目的匹配直线,且保持了最高的匹配正确率。

对于图5(b)所示航空立体像对,经过直线提取后,保留直线长度大于30的直线,左影像一共有323条直线,右影像有304条直线,直线提取结果如图7(a)所示。使用文献[3]的方法直线匹配

结果如图7(b)所示,成功匹配直线136条,其中96条直线匹配正确,正确率70.6%;而采用本文三角网约束后,采用固定窗口的相关系数法、半平面相关系数法、本文自适应相关系数法时,正确率分别达到96.4.8%、93.8.0%、96.0%(图7(c))。在采用本文三角网约束下的情况下,3种相关系数法对应的正确匹配数目分别是136、137、193。虽然基于固定窗口的相关系数法获取了最高的正确率,但匹配的直线数目最少,本文自适应相关系数法正确率相当,但是匹配的数目大于其他两种相关系数法。可以看出,当影像中存在大量的非连续表面时,本文方法能取得可靠直线匹配结果。



图6 近景立体像对直线匹配结果

Fig. 6 Line Matching Result of Close-range Stereo Images

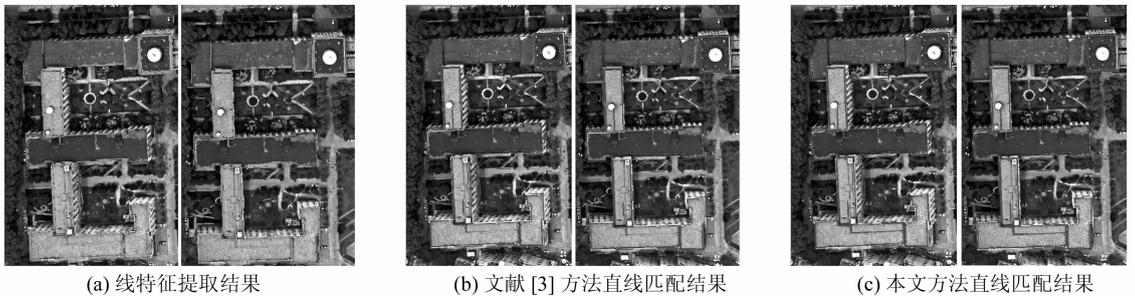


图7 航空立体像对直线匹配结果

Fig. 7 Line Matching Result of Aerial Stereo Images

3 结语

本文提出了一种基于三角形约束的立体影像线特征多级匹配方法,并选取具有代表性的立体像对进行了试验。三角形约束可以有效减少立体影像线特征匹配搜索范围,提高了直线匹配的可靠性;多级线特征匹配方法的结合,弥补了线特征提取的不足,提高了线特征匹配的成功率;基于移动窗口的自适应直线相关系数法能够在表面非连续处也取得较好的结果,有效保证了线特征匹配的可靠性。对于近景影像中存在的脱离物体表面的树木、电线杆等物体,本文的三角网约束还存在一定的局限,需要进一步研究。

参 考 文 献

[1] Baillard C, Schmid C, Zisserman A, et al. Automatic Line Matching and 3D Reconstruction of

Buildings from Multiple Views[C]. ISPRS Conference on Automatic Extraction of GIS Objects from Digital Imagery, Munich, Germany, 1999

[2] Zhang Y, Zhang Z, Zhang J, et al. 3D Building Modeling with Digital Map, Lidar Data and Video Image Sequences [J]. The Photogrammetric Record, 2005, 20(111): 285-302

[3] Schmid C, Zisserman A. The Geometry and Matching of Lines and Curves Over Multiple Views[J]. International Journal of Computer Vision, 2000, 40(3): 199-233

[4] 刘亚文. 基于 TIN 的半自动多影像同名线段匹配算法研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(4): 342-345

[5] Tian Y, Gerke M, Vosselman G, et al. Automatic Edge Matching Across an Image Sequence Based on Reliable Points[C]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, 2008

- [6] 文贡坚. 一种基于特征编组的直线立体匹配全局算法[J]. 软件学报, 2006, 17(12): 2 471-2 484
- [7] Wilson R C, Hancock E R. Graph Matching with Hierarchical Discrete Relaxation[J]. Pattern Recognition Letters, 1999, 20(10): 1 041-1 052
- [8] Meer P, Georgescu B. Edge Detection with Embedded Confidence[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(12): 1 351-1 365
- [9] Zhang L. Automatic Digital Surface Model (DSM) Generation from Linear Array Images [D]. ETH Zurich, Switzerland; Institute of Geodesy and Photogrammetry, 2005
- [10] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-Up Robust Features (SURF)[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110(3): 346-359
- [11] Zhu Q, Zhao J, Lin H, et al. Triangulation of Well-defined Ppoints as a Constraint for Reliable Image Matching[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2005, 71(9): 1 063-1 069
- [12] Eric W, Grimson L. Computational Experiments with a Feature Based Stereo Algorithm[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1985, 7(1): 17-34
- [13] Fischer M A, Bolles R C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Application to Image Analysis and Automated Cartography[J]. Communication of the ACM, 1981, 24: 381-395
- [14] Harris C, Stephens M. A Combined Corner and Edge Detector[C]. Alvey Vision Conference, Manchester, UK, 1988
- [15] 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

第一作者简介:张云生,讲师,博士后。研究方向为数字摄影测量、数字影像与激光扫描数据的集成处理。

E-mail:zhangys@csu.edu.cn

A Hierarchical Stereo Line Matching Method Based on a Triangle Constraint

ZHANG Yunsheng¹ ZHU Qing² WU Bo³ ZOU Zhengrong¹

(1 School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, 932 South Lushan Road, Changsha 410083, China)

(2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3 Department of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, 999077, Hong Kong, China)

Abstract: A hierarchical stereo line matching method based on a triangle constraint is proposed to enhance the line matching reliability. The method includes three steps where the first step is to match seed points based on SURF algorithm. The seed points are then used to constrain the nearby line matching. The second step is to triangulate the seed points to reduce the search range of the remaining line matching. A line-line matching process is then performed. The third step is a line-area matching process under the constraint of the triangles. To reduce the ambiguity of line matching, a shiftable self-adaptive line cross correlation method is proposed for discontinuous surfaces and with poor textural information. Experimental studies are carried out with typical close-range stereo images and aerial stereo images, and the results reveal that the proposed method is reliable for line matching.

Key words: line matching; triangle constraint; line similarity measure; hierarchical matching

About the first author: ZHANG Yunsheng, lecturer, postdoctor. Main research: digital photogrammetry, integrated processing of digital images and laser scanning data.

E-mail: zhangys@csu.edu.cn